

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PAULO ROBERTO DUARTE BELTRAN

**MICROGERADOR PIEZELÉTRICO TRANSVERSAL ACOPLADO A UMA
PALMILHA**

**Alegrete
2016**

PAULO ROBERTO DUARTE BELTRAN

**MICROGERADOR PIEZELÉTRICO TRANSVERSAL ACOPLADO A UMA
PALMILHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Sidinei Ghissoni.

**Alegrete
2016**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

B331453m Beltran, Paulo Roberto Duarte

MICROGERADOR PIEZELÉTRICO TRANSVERSAL ACOPLADO A
UMA PALMILHA / Paulo Roberto Duarte Beltran. 50 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2016.

"Orientação: Sidnei Ghissoni".

1. Piezeletrecidade. 2. Microgerador Piezelétrico. 3.
Energia Baixo Custo. I. Título.

PAULO ROBERTO DUARTE BELTRAN

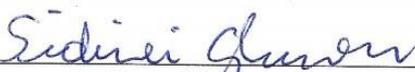
MICROGERADOR PIEZELÉTRICO TRANSVERSAL ACOPLADO A UMA PALMILHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistema Elétrico de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 12 de dezembro de 2016.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Sidinei Ghisoni
Orientador



Prof. Me. Paulo César Comassetto de Aguirre
UNIPAMPA



Prof. Dr. Giovanni Guarienti Pozzebon
UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais, pela oportunidade de chegar até aqui. Aos meus familiares por todo apoio e a minha esposa por sempre estar ao meu lado.

AGRADECIMENTO

Agradeço a Deus, por me guiar sempre pelo melhor caminho e me amparar diante das dificuldades enfrentadas.

Aos meus pais Paulo e Ana Cristina, e a meu irmão Rafael Beltran pelo amor, carinho, dedicação na minha formação social e profissional. Por me darem o melhor exemplo e deixarem a melhor herança, a educação.

Agradecer minha esposa Juliani Benites e todos seus familiares, pelo acolhimento, total carinho, apoio e fortaleza que encontrei para enfrentar as dificuldades. Pelo incentivo e por todos momentos bons.

Aos meus colegas de curso, pela amizade e dedicação em todos esses anos, pela ajuda disponibilizada durante a graduação e, principalmente pelos momentos de distrações. Em especial ao Lucas Cancio, João Paulo da Silva, Gerson Senna e Cleiton Lucatel, Fernando Garcia e Ricardo Jr.

Aos amigos que fiz no decorrer dessa jornada, em especial a Diogo de Rosso, Lucas de Rosso, Eduardo, Thales Lima, Frederico Collazo e Paula Pascoal.

Ao meu orientador Professor Dr. Sidnei Ghissoni, por ter confiado na minha capacidade e ter compartilhado seus conhecimentos e experiência para minha melhor formação.

“Não importa o quanto você bate, mas sim o quanto aguenta apanhar e continuar. O quanto pode suportar e seguir em frente. É assim que se ganha. ”

Rocky Balboa

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo principal a implementação de um dispositivo para a geração de energia elétrica através da utilização de material piezelétrico, em específico a utilização de buzzers. São apresentados os métodos teóricos e práticos da geração de energia elétrica através dos buzzers acoplados em uma palmilha para carregar eletrônicos de pequeno porte. No término do trabalho foi possível gerar a energia suficiente para alimentar um carregador portátil que necessita de uma tensão de 5 V. A energia gerada além de demonstrar ser satisfatória para alimentar um carregador portátil, apontou ser também de baixo custo, com um valor aproximado de 0,55 R\$/mW.

Palavras-Chave: Piezeletricidade, Buzzer, geração, carregar, energia elétrica, baixo, custo

ABSTRACT

This work has as main objective an application of a device for an electric power generation through the use of piezoelectric material, specifically for use of buzzers. They are the theoretical and practical methods of generating electric energy through the bells coupled into a palm tree for small electronic devices. V. An energy generated in addition to a portable charger, with an approximate value of 0.55 R\$/mW.

Keywords: Piezeletricity, Buzzer, generation, charge, electric power, low, cost

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.2.1 – Variação das dimensões quando estimulado eletricamente por uma tensão.....	14
Figura 2.4.1. (a) – Ressonadores Helmholtz.....	15
Figura 2.4.1 (b) – Buzzer piezelétrico.....	15
Figura 2.4.2 – Buzzer piezelétrico utilizado no projeto.....	16
Figura 2.4.3 – Ponto de operação do controle.....	18
Figura 2.4.4 – Exemplo de onda retificada.....	19
Figura 2.5.1 – Geração de Energia Elétrica em função da pressão P.....	19
Figura 2.5.2 (a) – Principais efeitos piezelétricos. Efeito longitudinal.....	20
Figura 2.5.2 (b) – Principais efeitos piezelétricos. Efeito transversal.....	20
Figura 2.6.1 – Relação entre números sobrescritos, subscritos e eixos coordenadas.....	21
Figura 3.2.1- Dois componentes piezelétricos (BUZZER) ligados em série.....	28
Figura 3.2.2 – Esquemático montado no protoboard.....	28
Figura 3.2.3 – Tabela de componentes do esquemático.....	29
Figura 3.3.2- Teste feito com quatro buzzers, capacitor de $1\mu\text{F}$, um resistor de 27ohms e ponte retificadora.....	30
Figura 3.3.3 - Simulação da tensão nula.....	31
Figura 3.3.3.(a) - Palmilha com oito buzzers ligados em série.....	32
Figura 3.3.3.(b) - Oito buzzer piezelétricos pressionado de forma sequencial.....	32
Figura 3.3.3. (c) – Esquemático usado no Ltspice.....	33
Figura 3.3.3.(d).- Simulação da onda retificada no LTspice IV dos oitos buzzer's.....	33
Figura 3.6.1 - Carregador Portátil.....	34
Figura 3.7.1- Equipamento de simulação de pressão (SHIMADZU).....	35
Figura 3.7.2- Multímetro (Agilent U1251B True RMS Multimeter).....	38
Figura 3.7.3 – Gráfico de relação de Força x Deslocamento.....	38
Figura 3.7.4- Componente piezelétrico (BUZZER) no equipamento SHIMADZU.....	39
Figura 3.7.5 - Tensão de Saída ($V_z \times g_{33}$).....	40
Figura 3.7.6 – Tabela de valores.....	40

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Constante de deformação piezométrica polarização positiva.....	21
Equação 2.2 – Constante de deformação piezométrica polarização negativa.....	21
Equação 2.3 – Coeficiente de Poisson.....	22
Equação 2.4 – Constante de deformação na direção z.....	22
Equação 2.5 – Expansão na direção x.....	22
Equação 2.6 – Coeficientes de tensão de saída.....	22
Equação 2.7 – Coeficientes de tensão de saída.....	22
Equação 2.8 – Coeficientes de tensão de saída grandezas mecânicas e elétricas.....	23
Equação 2.9 – Coeficientes de tensão de saída grandezas mecânicas e elétricas.....	23
Equação 2.10 – Modulo de Young.....	23
Equação 3.1 – Área da circunferência	34
Equação 3.2 – Pressão exercida no componente.....	34
Equação 3.3 – Para determinar a velocidade média.....	36
Equação 3.4– Geração do gráfico Vz X g33.....	39
Equação 3.5 – Potência instantânea.....	40
Equação 3.6 – Potência RMS.....	41
Equação 3.7 – Potência de cada ponto.....	41
Equação 3.8 – Potência RMS (ponto).....	41
Equação 3.9 – Para o custo R\$/mW.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Continua

Dip – Dual In-line Package (circuitos integrados conectados a pinos em dois lados)

MP3 – MPEG Layer 3

MP4 – MPEG Layer 4

NPS – Nível de Pressão Sonora

Buzzer- Componente piezelétrico

PVC– Poli cloreto de Vinila

SMD – Surface Mount Devices (dispositivos de montagem superficial)

dB – Decibel

USB – Universal Serial Bus (Porta Universal)

Vpp – Tensão de pico a pico

Gadgets - dispositivo mecânico ou eletrônico, aparelho, equipamento eletrônico em geral pequeno e moderno.

RMS- Root Mean Square (potência média quadrática)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	1
1.2. Justificativa	12
1.3. Organização	13
2. REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1. Introdução.....	14
2.2. Piezoeletricidade.....	14
2.3. Geradores piezelétricos	14
2.4. Microgerador piezelétrico (BUZZER).....	15
2.5. Consequência do gerador elétrico.....	19
2.6. O efeito piezelétrico na geração de energia	20
2.7. Vantagens e desvantagens dos materiais piezelétricos.....	23
2.7.1. Vantagens.....	23
2.7.2. Desvantagens	23
2.8. Buzzer	24
2.9. Especificações do Buzzer	24
2.10. Especificações do componente piezelétrico (Buzzer)	25
2.11. Contribuições	26
3. METODOLOGIA	26
3.1. Introdução.....	26
3.2. Metodologia aplicada	27
3.3. Procedimentos realizados em laboratório	29
3.3.1. Energia por cada buzzer – teste 1.....	29
3.3.2. Como evitar perdas de energia gerada – teste 2	30
3.3.4. Como obter maior eficiência dos buzzers	34
3.3.5. Quantos buzzer seriam necessários para gerar energia para o carregador portátil.....	34
3.3.6. Tempo médio para carregar o carregador portátil na prática – Teste 4.....	35
3.3.7. Ensaio realizado com o equipamento SHIMADZU – Teste 5.....	36
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
5. CONCLUSÕES	43
5.1. Contribuições	44

5.2. Sugestões para continuidade da pesquisa	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

1. INTRODUÇÃO

A Piezeletricidade é a possibilidade de alguns cristais produzirem tensão elétrica por reação a uma pressão mecânica. O termo piezeletricidade deriva do grego “*Piezein*”, que significa apertar/pressionar. Relacionado à geração de corrente elétrica, uniu-se à definição da eletricidade, de modo que, piezeletricidade é representada como a geração de energia elétrica em razão da deformação sobre limitados materiais (BARON, 2010).

Descoberta pelos irmãos Pierre e Jacques Curie na França, em 1880, a eficiência piezelétrica é mostrada em cristais. Os irmãos Curie, no entanto, não notaram o efeito piezelétrico inverso. O efeito inverso foi matematicamente inferido de princípios capitais da termodinâmica por Gabriel Lippmann, em 1881. Os Curie (1880), de imediato confirmaram a presença do efeito inverso, o que demonstrou de forma quantitativa a reversibilidade completa de eletromecânico para as deformações em cristais piezelétricos (BARON,2010).

Os materiais piezelétricos têm propriedades únicas como:

- Rigidez e densidade elevadas, podendo ser elaborados em qualquer dimensão e formato;
- Quimicamente inativo protegido da umidade, e outras situações atmosféricas;
O eixo mecânico e o eixo elétrico podem ser diretamente orientados de acordo com a necessidade da utilidade através do modo de polarização do piezelétrico.

1.1. Objetivos

Os objetivos do presente trabalho consistem em:

- Desenvolver um gerador de energia que, através da deformação do material piezelétrico possibilite a carga de uma bateria recarregável de aparelhos de pequeno porte, tais como: Mp3 e celulares;
- Montar o circuito numa palmilha de tênis que dê a possibilidade da energia elétrica gerada a uma bateria recarregável de até 5V;

Apresentar os dados obtidos de geração elétrica realizados em laboratório e equipamentos da UNIPAMPA com material piezelétrico acoplado na palmilha.

1.2. Justificativa

Com os avanços da tecnologia, é possível a utilização de materiais que são úteis no dia a dia, entre eles, alguns podem gerar energia renovável buscando não causar danos ao meio ambiente. Entre os materiais que possuem essa característica de gerar energia limpa estão os materiais piezelétricos.

Deste modo, esse trabalho tem como objetivo demonstrar a geração de energia elétrica limpa e a possibilidade do uso dela de forma que alcance consumidores de pequenas necessidades de consumo de energia.

Como, por exemplo, para uso de energia de pequeno porte, seria para o consumo no dia-a-dia das pessoas que usam dispositivos portáteis variados segmentos, conhecidos como *gadgets* (smartphones, MP3 ou MP4 players, e outros dispositivos eletrônicos), que são alimentados via cabo USB.

Para consumidores de médio e grande porte existem várias possibilidades como, por exemplo: em lojas, residências, colégios, faculdades, estacionamentos, ruas, rodovias. Observando esta necessidade foi desenvolvida uma placa com *buzzers* piezelétricos, que acopladas ao chão podem gerar energia para consumo no próprio local.

Esta energia poderá ser utilizada no momento da geração, quando o piezo sofre a deformação mecânica gerando a energia ou sendo armazenadas em baterias eletroquímicas recarregáveis, para que o consumo seja feito, quando o usuário achar conveniente.

A dificuldade de desenvolver este projeto é o alto custo do material, que no Brasil, ainda é pouco conhecido e divulgado ao público. No entanto, aos poucos são encontrados alguns tipos dessa geração de energia. Embora, não seja com o dispositivo piezelétrico (*buzzer*), mas é com a utilização de piezeletricidades, como em pequenos trechos de ciclovias de Curitiba e em algumas boates de São Paulo.

Em outros países essa tecnologia é adotada em uma escala bem maior. Em países da Europa, ela é utilizada em rodovias, fazendo com que as estradas, possam ter em suas laterais, postes de iluminação que ficam ligados durante todo o caminho percorrido pelos motoristas.

Nos estádios de futebol, são adaptadas nas colunas das arquibancadas em um efeito de mola. Dessa forma, quando o público pular ou caminhar irá gerar eletricidade para o estádio. O mesmo ocorre em danceterias ou boates, reduzindo assim os seus gastos com energia elétrica.

Pensando nisso, surgiu a ideia de acoplar os *buzzers* em uma palmilha de um calçado visando gerar energia para carregar um carregador portátil que transfere sua carga para outros equipamentos eletrônicos portáteis. Sempre que achar necessário ou precisar de uma nova carga o usuário pode caminhar ou correr permitindo assim, uma fonte de energia.

Com a ideia então surgiram as seguintes perguntas: Qual o valor de energia gerada por cada *buzzer*? Qual a melhor forma de ligação entre os *buzzers*? Como não ocorrer perdas de energia? Como ter maior eficiência dos *buzzers*? Quantos *buzzers* seriam necessários para gerar energia? Quanto tempo levaria para carregar o carregador portátil? Estas e outras perguntas serviram de estímulo para o desenvolvimento do trabalho.

1.3. Organização

O capítulo 1 tem como propósito demonstrar uma breve introdução da piezeletricidade, tais como: a sua descoberta e sua funcionalidade. Também presente nesse capítulo os objetivos e justificativa que levaram para o desenvolvimento desse trabalho.

O capítulo 2 enfoca na revisão bibliográfica, aborda os geradores e microgerador piezelétrico, os efeitos da piezeletricidade na geração de energia, as vantagens e desvantagens dos materiais piezelétrico, o componente piezelétrico (*buzzer*), suas especificações e escolha e as contribuições.

Os capítulos 3 e 4 demonstram a metodologia do trabalho e a apresentação dos procedimentos utilizados nos ensaios em laboratório e os resultados obtidos para a geração de energia.

No capítulo 5 expõe as conclusões e considerações finais deste trabalho, em que são propostos possíveis projetos para a continuidade deste projeto.

2. REVISÃO DA LITERATURA

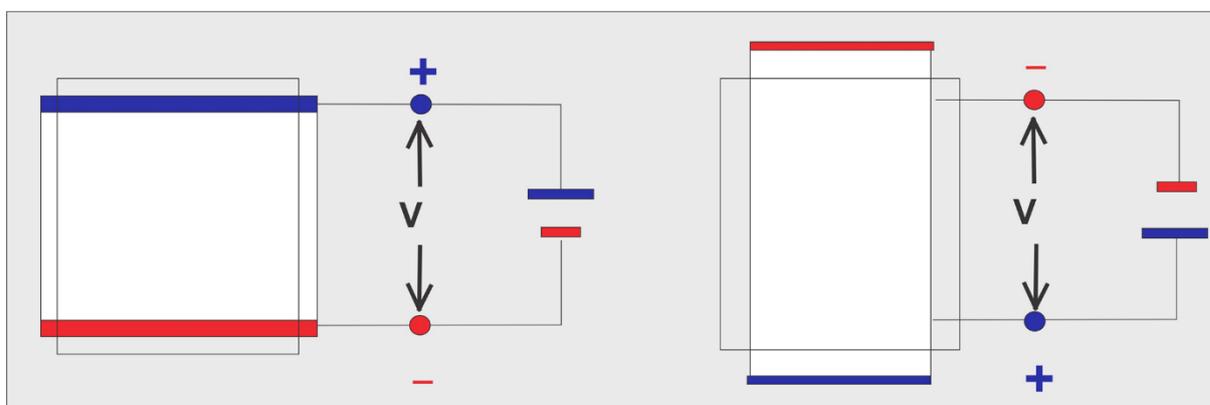
2.1. Introdução

Nesse capítulo será abordado como funciona a piezeletricidade voltada para os objetivos desse trabalho. Explicando como funciona o gerador e o microgerador piezelétrico com a utilização do *buzzer*, suas vantagens e desvantagens e as contribuições para serem alcançadas com o desenvolvimento do mesmo.

2.2. Piezoeletricidade

A piezeletricidade descreve o fenômeno de gerar uma carga elétrica num material, quando sujeito a uma tensão mecânica ou uma pressão dinâmica, e inversamente, uma deformação quando sujeito a um campo elétrico. Quando um material piezelétrico é estimulado eletricamente por uma tensão como indicado na Figura 2.2.1, as suas dimensões modificam-se. (SILVA, 2010).

Figura 2.2.1 - Variação das dimensões quando estimulado eletricamente por uma tensão



Fonte: SILVA (2010)

2.3. Geradores piezelétricos

A geração de energia elétrica em cerâmicas piezelétricas, está relacionada às propriedades piezelétricas do material utilizado, suas dimensões e força aplicada. A bibliografia encontrada apresenta equações e modelos de um material unimorfo, modelos elétricos e mecânicos, ressonância de uma piezocerâmica, ressonância de

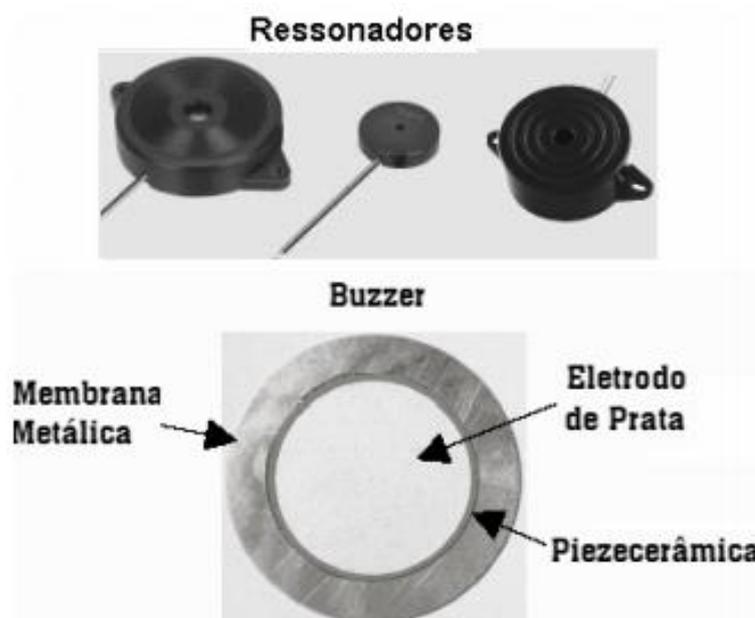
uma membrana deformada, causada pela aplicação de uma força estática, energia elétrica e mecânica de um unimorfo, potência elétrica, entre outros. No entanto, não foi encontrada uma abordagem do ponto de vista das condições de operação existentes nesse projeto. (CARDOSO, 2006)

2.4. Microgerador piezelétrico (BUZZER)

O crescimento de sistemas para microgeração de energia em relação a transdutores piezelétricos de custo baixo (*buzzer*), foi um assunto pouco explorado até o momento no que se refere a piezeletricidade.

Horowitz (2002) utilizou um ressonador acústico de Helmholtz, para a conversão de energia acústica em eletricidade. Nos testes, o gerador atingiu uma potência de 7,4mW sob uma pressão sonora de 147dB e obtendo um rendimento de 37%. Os ressonadores são frequentemente comercializados junto com os *buzzers* a custos bastante baixos (<1U\$). A Figura 2.4.1, ilustrada por Horowitz (2002) mostra alguns modelos de ressonadores e o tipo de *buzzer* encontrado em seu interior, do mesmo tipo do utilizado neste trabalho.

Figura 2.4.1 - a) Ressonadores Helmholtz e b) Buzzer piezelétrico.

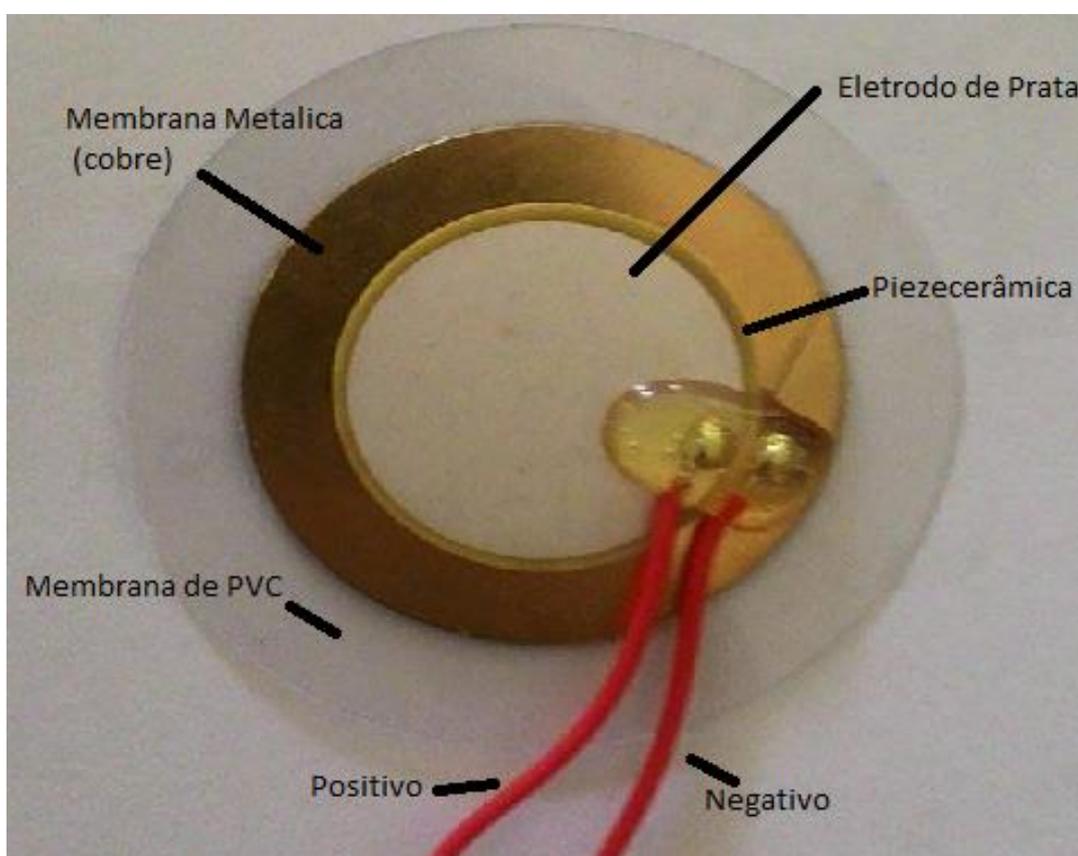


Fonte: HOROWITZ (2002)

O componente piezelétrico (*buzzer*) mostrada na figura 2.4.1 b) é composta por dois materiais: uma membrana metálica e uma piezecerâmica, unidas por um adesivo industrial. (CARDOSO, 2006).

O componente piezelétrico utilizado para a realização desse trabalho além de ter a membrana metálica e uma piezecerâmica possui também diâmetro de 35 mm de cobre e uma membrana de 49 mm de PVC e uma espessura de 3,36 mm mostrado na Figura 2.4.2.

Figura 2.4.2 - Componente piezelétrico (*buzzer*) piezelétrico utilizado no projeto



Fonte: Próprio autor

Umeda (1997) mostrou que as cerâmicas piezelétricas, sob impacto, geram mais energia elétrica se acoplarmos uma massa a piezecerâmica para aproveitar melhor a energia cinética existente. Concluiu que com uma massa acoplada, o aproveitamento da energia cinética aumentou 67%, em comparação ao gerador sem a massa. O piezo gerador conseguiu com eficiência máxima de 52% com a massa acoplada.

O autor também descobriu com esta estrutura, que a forma de onda da tensão da saída muda a função pela resistência de carga, existindo um valor ótimo para a resistência da carga que fornece a eficiência máxima. Outra, descoberta do trabalho foi que é possível aumentar eficiência, se aumentarem o fator de qualidade mecânico e o fator de acoplamento eletromecânico. Além, de se diminuïrem as perdas dielétricas.

Xu (1998) também pesquisou a energia elétrica gerada por uma cerâmica piezoeletrica sob a forma de pressão e ao ser impactada, por uma esfera de aço, recoberta por uma camada de borracha. Encontrou uma energia da ordem $400\mu\text{W}$. A autora descobriu que a cerâmica gera um sinal de tensão elétrica alternada quando recebe uma força mecânica.

Este tipo de sinal alternado também foi encontrado por (Morgan, 2003). Estes dois pesquisadores Umeda (1997) e Xu (1998) apenas realizaram medidas de laboratório, sem nenhum tratamento matemático, enquanto em Keaweboonchuay (2003) se encontra um tratamento matemático de geração elétrica das piezocerâmicas sob impacto e sob pressão.

Estes dados obtidos pelos autores respondem à pergunta de como ter maior eficiência dos piezocerâmicos, que diz que é preciso anexar uma massa ao gerador e mantê-la em contato com a cerâmica do piezo.

A cerâmica piezoeletrica gera em seus terminais, uma tensão alternada (AC) de acordo com o regime de aplicação de força, Keaweboonchuay (2003), enquanto que a bateria necessita de uma tensão DC (corrente contínua).

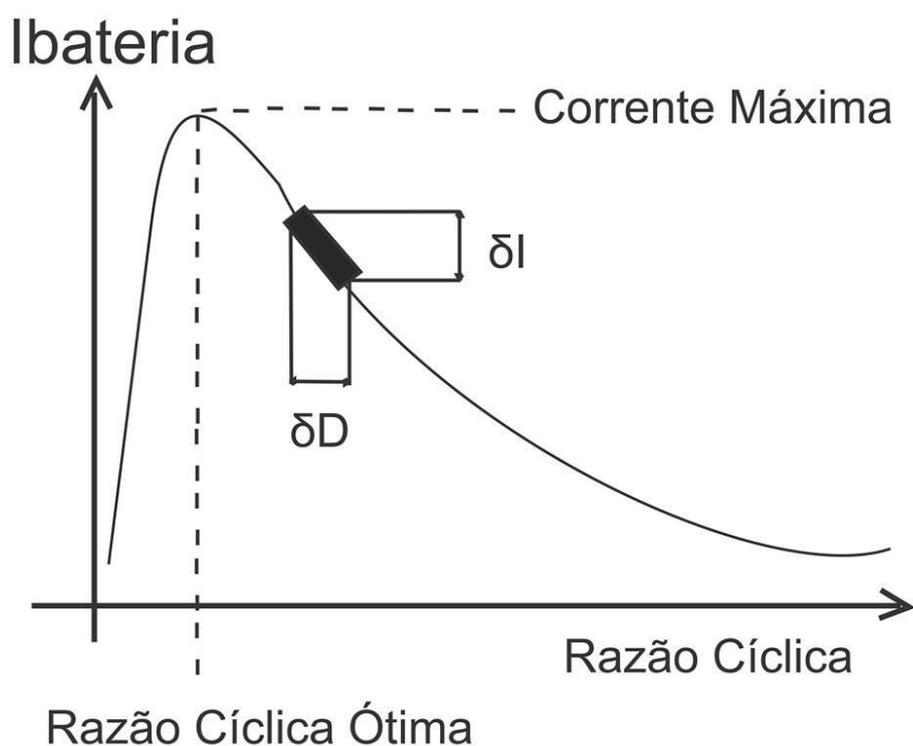
Segundo Hofmann (2002) e Xu (1998) o menor suporte a ser adaptado é retificador de onda completa, pois os retificadores de onda completa são os que proporcionam a maior tensão média na sua saída. A carga de uma bateria direta não é a melhor opção, já que a tensão do gerador piezoeletrico varia de acordo com as vibrações recebidas por ele, então forma-se a imposição de tornar menos rígido a tensão de saída retificada para enviar o máximo de potência possível para a carga e isto poderia ser conseguido através de um conversor DC-DC colocado entre o retificador e a bateria (HOFMANN, 2002). Também existe um valor de impedância da carga que transfere sua máxima potência (XU,1998).

Alguns autores trabalharam com conversores, como Ottman (2002), que utilizou através de um controle PWM (Controle por Largura de Pulso). Este autor

desenvolveu um conversor tipo Buck (porém controle via computador), em que um algoritmo é quem controla a razão cíclica (*Duty cycle*) do PWM.

A razão cíclica de um conversor é a relação entre os tempos de ligado / desligado dos transistores de chaveamento. Através da medição de caída (*slope*) $\partial I / \partial D$, da corrente de carga da bateria, o controle calcula a razão cíclica ótima em que o piezelétrico está no máximo de potência fornecendo mais corrente para a bateria, conforme a Figura 2.4.3.

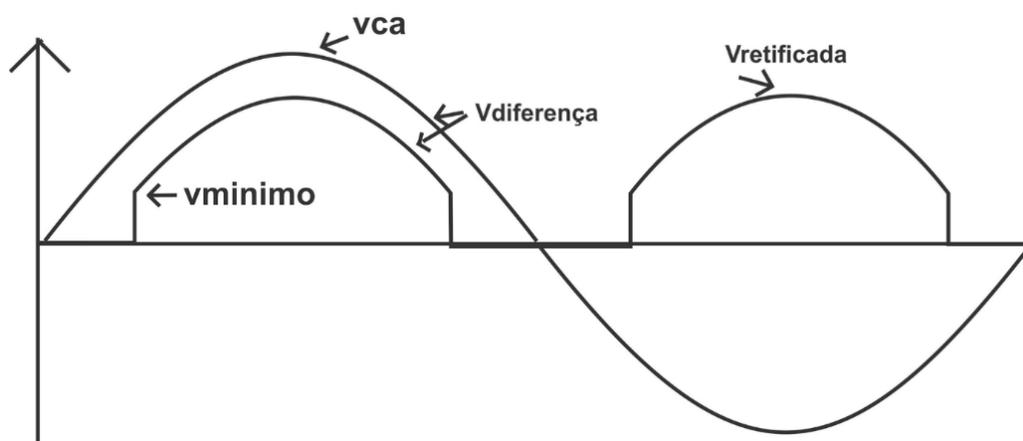
Figura 2.4.3 - Ponto de operação do controle



Fonte: OTTMAN (2002)

Esta forma de controle é a maior contribuição deste autor. A eficiência encontrada estabeleceu-se entre 74-88%, sem considerar as perdas nos diodos da ponte retificadora e no circuito de controle. Estas perdas podem ser significativas quando o piezelétrico forneça tensões da ordem de 2 V a 3 V e os diodos da ponte retificadora infiram uma queda de tensão por condução de 1,2 V por semiciclo, além disso a menor tensão para operar a ponte é de 1,2 V, limitando sua aplicação à circuitos com vibração mecânica de menor amplitude, pois a tensão no piezelétrico depende diretamente da força mecânica aplicada, a Figura 2.4.4 mostra o problema da retificação:

Figura 2.4.4 - Exemplo de onda retificada



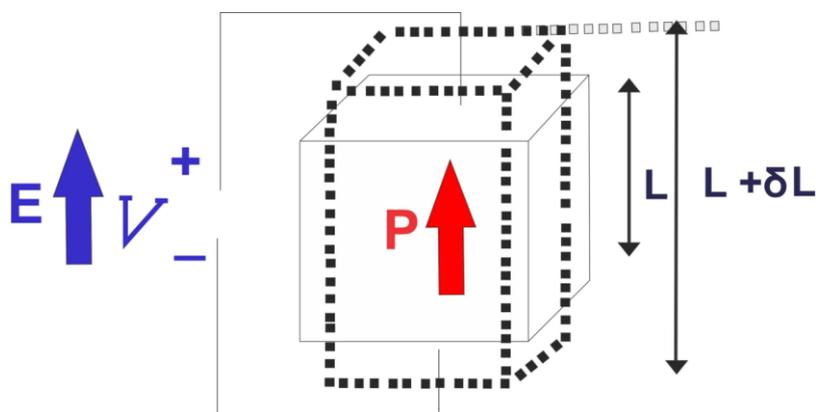
Fonte: CARDOSO (2006)

A Figura 2.4.4 mostra a necessidade de um retificador não convencional para se trabalhar com baixas tensões. (CARDOSO, 2006).

2.5. Consequência do gerador elétrico

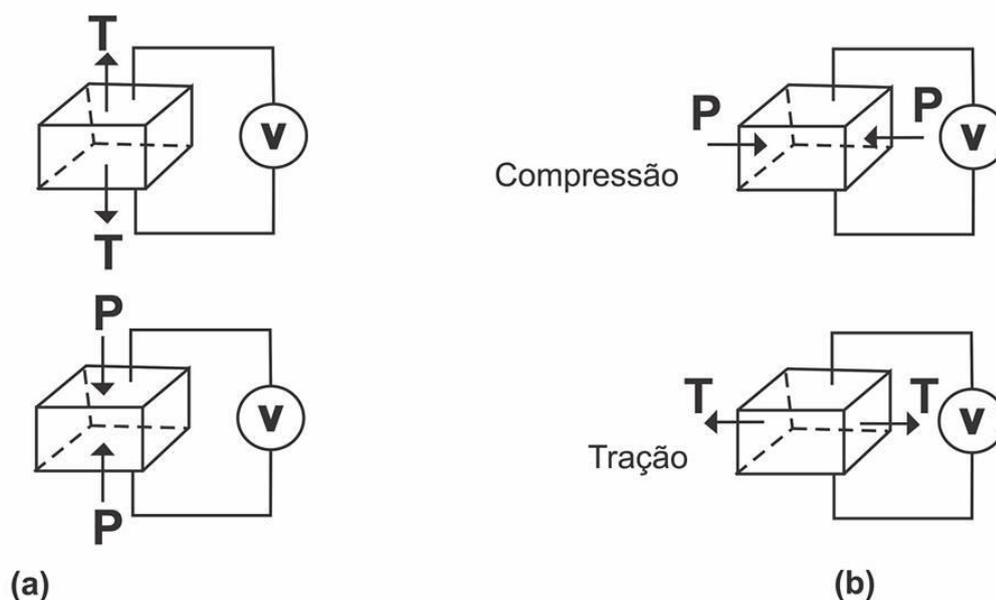
As Figuras 2.5.1 e 2.5.2 revelam que um componente piezelétrico ao ser comprimido ou expandido cria uma tensão elétrica E , à qual tem valores alternados quando é pressionado e solto em seguida. E na Figura 2.5.2 é possível visualizar os dois principais modos de serventia dessa energia (CARDOSO, 2006).

Figura 2.5.1 - Geração de Energia Elétrica em função da pressão P



Fonte: CARDOSO (2006)

Figura 2.5.2 - Principais efeitos piezelétricos: efeito longitudinal (a) e transversal (b)

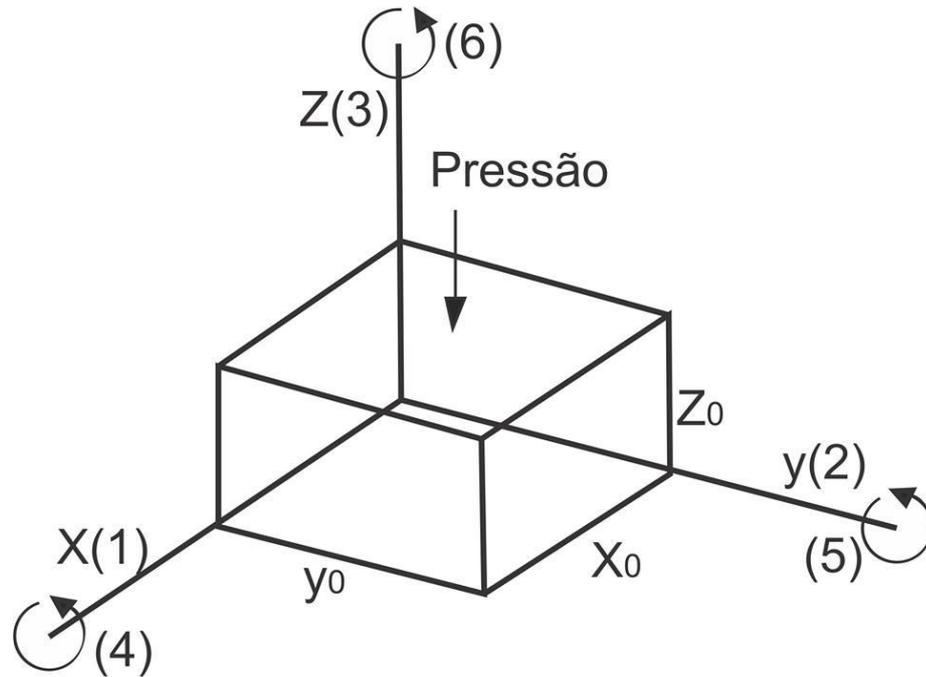


Fonte: CARDOSO (2006)

2.6. O efeito piezométrico na geração de energia

De acordo com Cardoso (2006), a maior parte das expressões que envolvem grandezas de compressão, dilatação e deformação, utiliza, subscritos e sobrescritos, em seus símbolos. O sobrescrito mostra a grandeza que permaneceu constante durante o fenômeno de deformação. Os subscritos indicam o eixo de orientação de atuação do fenômeno do efeito resultante, por consequência. Na Figura 2.6.1 é mostrada a relação dos eixos coordenados x , y e z com os números 1, 2 e 3. Já os números 4, 5 e 6 correspondem aos modos de torção ligados à x , y e z respectivamente.

Figura 2.6.1 - Relação entre números sobrescritos, subscritos e eixos coordenadas



Fonte: CARDOSO (2006)

Os próximos tópicos mostram as grandezas necessárias para a modelagem e estimativa das características de um atuador piezolétrico. Segundo Cardoso (2006) as equações da Constante de Deformação Piezolétrica: d relaciona o campo aplicado em um piezolétrico polarizado com a deformação aplicada nele, expressada pela unidade em m/V.

Em um estado de polarização positiva:

$$\frac{\Delta l}{l} = d \cdot u \quad (2.1)$$

Em um estado de polarização negativa:

$$\frac{\Delta l}{l} = -d \cdot u \quad (2.2)$$

Em que U é o campo elétrico. O coeficiente de Poisson: é a razão entre a expansão transversal e a contração longitudinal quando o material é submetido à pressão com campo constante.

$$v = \frac{S_{31}}{S_{33}} \quad (2.3)$$

Onde:

S_{33} representa a deformação;

$\Delta Z/Z_0$ causada pela aplicação de uma pressão na direção z ;

S_{31} representa a deformação em x causada pela mesma pressão em z .

A direcionalidade da Constante de Deformação Piezelétrica: Quando a deformação for causada por campos elétricos em vez de pressões externas, o coeficiente de Poisson não pode ser utilizado para quantificar as relações de deformação. Neste caso é eletromecânica e não somente mecânica a deformação, assim utilizam-se as constantes de deformação piezelétricas agregadas aos subscritos de direcionalidade, para expressar as deformações relativas a piezeletricidade.

A constante de deformação na direção z é representado por d_{33} (efeito longitudinal):

$$\frac{\Delta z}{z} = d_{33} \cdot E_z \quad (2.4)$$

A expansão na direção x é dado por d_{31} (efeito transversal), pegando como o exemplo da Figura 2.6.1, onde as dimensões x e y são iguais:

$$\frac{\Delta x}{x} \left(\frac{\Delta y}{y} \right) = d_{31} * E_z \quad (2.5)$$

Coeficientes de Tensão de Saída: As expressões relatadas ao efeito piezelétrico reverso são sintetizadas da seguinte forma:

$$V_z = -g_{33} * T_z \quad (2.6)$$

$$V_z = -g_{31} * T_{x,y} \quad (2.7)$$

Onde: T é a pressão aplicada; V_z é tensão gerada no piezelétrico.

As constantes g_{33} e g_{31} são as constantes de tensão de saída e relacionam grandezas mecânicas e elétricas. A constante g está relacionada com a constante d :

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\varepsilon_{33}^T} \quad (2.8)$$

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\varepsilon_{31}^T} \quad (2.9)$$

Modulo de Elasticidade ou módulo de Young E, é a razão da pressão aplicada pela deformação produzida.

$$E = \frac{\textit{pressão}}{\textit{deformação}} \quad (2.10)$$

2.7. Vantagens e desvantagens dos materiais piezelétricos

Os materiais piezelétricos têm suas variantes, como suas vantagens e desvantagens uma série de elementos.

2.7.1. Vantagens

As principais vantagens são:

- Podem ser utilizados para a produção de energia de baixo custo, limpa e sustentável;
- É um campo vasto para pesquisas e resultante no desenvolvimento de novos materiais;

Podem ser implementadas em diversas atividades mecânicas para geração de energia.

2.7.2. Desvantagens

As principais desvantagens são:

- Algumas limitações como temperatura e variações sendo como as principais;
- Envelhecimento natural e acelerado pelas condições de uso;
- Limites de excitação elétrica e mecânica.

2.8. Buzzer

Basicamente, o *buzzer* piezelétrico poder ser chamado de um diafragma piezelétrico. Aplicando tensão elétrica contínua entre os eletrodos de um diafragma piezelétrico, faz-se a distorção mecânica devido ao efeito piezelétrico. A distorção para elementos piezelétricos ocorre em todas as direções dependendo da frequência de excitação, porém, preferencialmente para este elemento, a distorção se destaca numa direção radial. A placa de metal ligada ao elemento piezelétrico não se expande. Por outro lado, quando o elemento piezelétrico se contrai, há deformações do diafragma piezelétrico na direção. Assim, quando a tensão é alternada e é aplicada ao diafragma ocorre uma curvatura (BARON, 2010).

2.9. Especificações do Buzzer

Segundo o catálogo da *Advanced Acooustic Technology Corpoartion* (2016), a escolha do *buzzer* depende de suas características tais como:

- Métodos de condução: A série com o circuito de carro construído será a melhor escolha quando não podemos fornecer sinal de frequência de um sinal sonoro, ele só precisa de corrente contínua. Além disso, há diferentes sons na natureza para você escolher, como contínuo, pulso acelerado e pulso lento;
- Dimensão: A dimensão afeta a frequência, que resulta em um tamanho pequeno em alta frequência;
- Tensão: Impulsionada por ondas quadradas (V_{pp}), os resultados mais elevados de tensão no NPS (Nível de Pressão Sonora) são superiores. Há muitos tipos diferentes a escolher, em primeiro lugar, precisamos saber alguns parâmetros, tais como tensão, corrente, método rígido, dimensão, tipo de montagem, e algo mais importante que é a quantidade de NPS e a frequência que queremos;
- Tensão de funcionamento: Normalmente, a tensão de operação para uma campanha magnética é de 1,5 V à 24 V, por um *buzzer* piezo é de 3 V a 220 V. No entanto, a fim de obter NPS suficiente, sugerimos que contenha, pelo menos, 9 V para dirigir um vibrador piezo;
- Consumo atual: De acordo com a tensão diferente, a corrente de consumo de uma campanha magnética é de dezenas a centenas de amperes, oposta ao tipo piezo

poupa muito mais energia elétrica, só precisa de alguns amperes, e consome três tempos atuais, quando a campainha começa a trabalhar;

- Método de condução: Devido ao circuito de movimentação conjunto interno, a campainha auto drive pode emitir som, enquanto a conexão com a corrente contínua não. Devido ao princípio de trabalho diferente, a campainha magnética precisa ser conduzida por meia ondas quadradas, e o *buzzer* piezo precisa ondas quadradas para obter uma melhor saída de som;
- Dimensão: A dimensão da campainha afeta a sua NPS e a frequência, a dimensão da campainha magnética é de 7 milímetros à 25 milímetros, sendo que o sinal sonoro piezoelétrico é de 12 mm a 50 mm, ou mesmo maior;
- Conectando maneira: tipo Dip, tipo fio, tipo de SMD e tipo parafusado para grande *buzzer* piezo são geralmente vistos.

O componente piezelétrico é geralmente testado a NPS à distância de 10 cm, se a distância duplicada, o NPS decairá cerca de 6 dB, em oposição, a NPS vai aumentar de 6 dB, quando a distância é encurtada por uma hora. A NPS da campainha magnética pode chegar a cerca de 85 dB / 10 cm; o piezo pode ser concebido para emitir som muito alto, por exemplo, as sirenes comuns, são feitos principalmente de um componente piezelétrico.

2.10. Especificações do componente piezelétrico (*Buzzer*)

➤ Dimensões:

- Diâmetro: 35 mm de cobre com 49 mm de membrana em PVC;
- Espessura: 3,36 mm.

➤ Características elétricas:

- Frequência de Ressonância: $2,2 \pm 0,5$ KHz;
- Impedância de Ressonância: 250 Ω ;
- Capacidade estática: 35000pf $\pm 30\%$ a 100 Hz
- Pressão do Nível do som: 85dB / 10 cm
- Tensão de entrada: 30 vp-p Max
- Temperatura Operacional: -20°C ~ +70°C
- Temperatura de Armazenamento: -30°C ~ +80°C

- Identificação Material: Latão

2.11. Contribuições

Quando o cristal de látice sofre uma ligeira modificação acaba gerando um diferencial de potencial elétrico, na grande maioria esse potencial é tão elevado que consegue gerar milhares de volts. Por se tratar de um tipo de energia que não necessita de combustíveis ou aditivos, ela não gera resíduos ou agentes poluentes, o que foi um dos fatores que serviu de estímulo para o desenvolvimento deste projeto que, tem por objetivo apresentar os benefícios e algumas aplicações dessa nova fonte de energia para a sociedade.

Uma aplicação muito interessante é a utilização de placas piezelétricas acopladas na palmilha dos tênis, fazendo que quando a pessoa caminhar ou correr, possibilitará a geração de energia suficiente para dar uma carga, no dispositivo do eletrônico de sua preferência como celular, MP3, etc.

Assim foi pensado em fazer uma palmilha que utiliza componentes piezelétricos (*buzzer*) para a geração de energia elétrica para que com ela seja possível carregar aparelhos eletrônicos de pequeno porte. Para isso, foram realizados testes em laboratório com o piezocerâmico semelhante ao que CARDOSO (2006) usou em sua dissertação que foi usado como base para a realização desse trabalho.

Assim com o auxílio do osciloscópio foi possível ter a noção da energia gerada pelo componente piezelétrico (*buzzer*) e ter uma estimativa de como e quantos *buzzers* serão necessários para ter uma real estimativa de custo e benefício do projeto.

3. METODOLOGIA

3.1. Introdução

Neste capítulo são abordados os métodos que foram aplicados em laboratório para dar continuidade ao projeto.

3.2. Metodologia aplicada

Baseado na ideia de geração de energia limpa, fez-se a escolha inicialmente do tipo de material piezelétrico que se adaptaria para a ideia principal do trabalho, dentre eles o *buzzer* com (membrana metálica, eletrodo de prata e piezocerâmica) que são características semelhantes ao *buzzer* utilizado por CARDOSO (2006). Características essas que servirão de comparação para o trabalho.

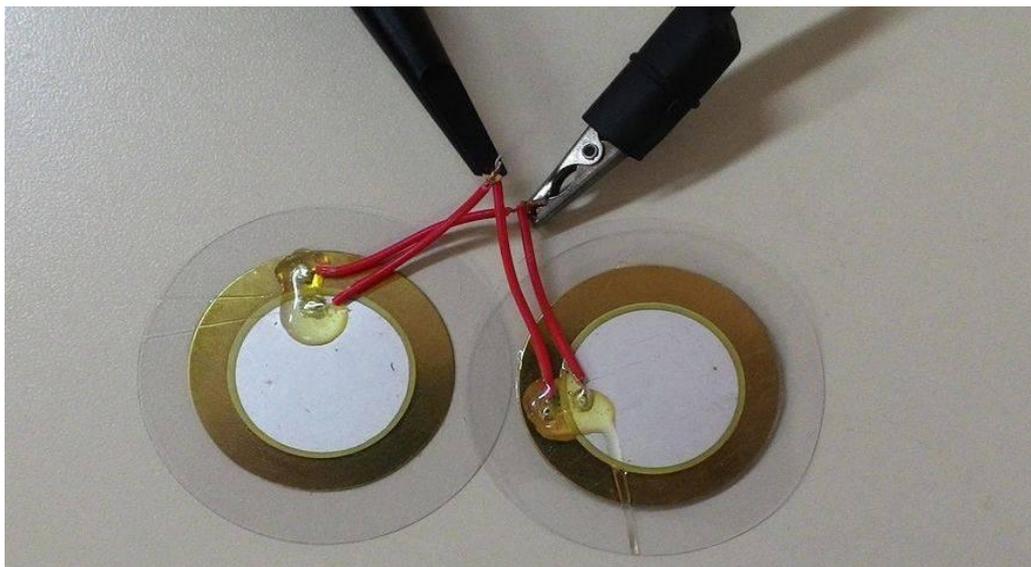
A partir da escolha realizou-se a coleta das formas de onda geradas através dos testes realizados em laboratório e com o auxílio do osciloscópio para saber se seria possível dar seguimento ao trabalho.

De início foram coletados os dados de apenas um *buzzer* que gerou aproximadamente 1,26 V de pico a pico. Com base da impedância obtida pelo fabricante do componente piezelétrico, foi possível determinar a potência gerada através da Equação 3.5.

De posse da potência instantânea então foi necessário coletar mais dados com um número diferente de *buzzer's*, para determinar a carga completa do carregador portátil.

No segundo momento foram conectados dois *buzzer's* em série gerando aproximadamente 2 V. Foram ligados em série conforme Figura 3.2.1 para que quando os *buzzer's* sofressem a deformação para a geração de energia, elas não anulassem a corrente gerada pelos mesmos, o que ocorre quando ligados em paralelo.

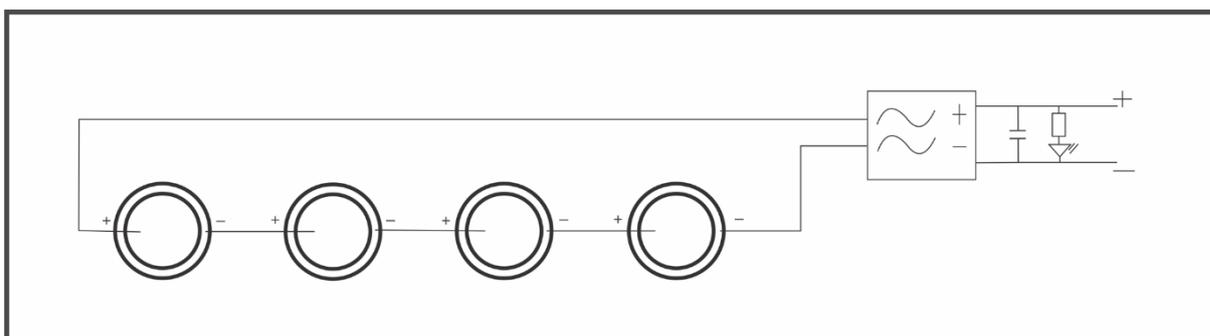
Figura 3.2.1- Dois componentes piezelétricos (BUZZER) ligados em série



Fonte: Próprio autor

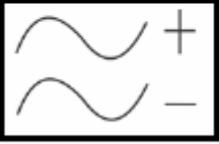
Dando continuação, foi utilizado, um *protoboard* para simular um circuito, alocando quatro *buzzer's* em série para obter uma corrente maior que as anteriores. Assim, foi montado na *protoboard*: quatro *buzzer's* ligados em série, capacitor de $1\mu\text{F}$, resistor de 27 ohms e um LED para verificar se a energia estava sendo gerada, conforme a Figura 3.2.2 e Figura 3.2.3

Figura 3.2.2 – Esquemático montado no *protoboard*



Fonte: Próprio autor

Figura 3.2.3 – Tabela de componentes do esquemático

	COMPONENTE PIEZELÉTRICO (BUZZER)
	PONTE RETIFICADORA
	CAPACITOR DE 1 μ F
	RESISTOR DE 27 Ω
	LED

Fonte: Próprio autor

Foi necessário colocar a ponte retificadora para que não houvesse perdas de reação inversa da deformação na corrente gerada, fazendo com que a corrente alternada (CA), seja convertida em corrente contínua (CC), para evitar perdas inversas devido ao efeito reverso da deformação. A partir disso a ideia é de que o carregador portátil consiga absorver o máximo de energia gerada pelos PIEZO.

3.3. Procedimentos realizados em laboratório

Nesta seção serão apresentados alguns procedimentos realizados com o auxílio dos equipamentos dos laboratórios.

3.3.1. Energia por cada *buzzer* – teste 1

Para dar continuidade com o projeto era necessário saber a tensão que cada *buzzer* piezoeletrico gera quando sofre algum tipo de deformação. Essa deformação mecânica foi feita manualmente pressionando na parte central do *buzzer* adaptado. Para que a parte cerâmica do *buzzer* piezoeletrico não sofresse nenhum tipo de dano físico que afetaria a geração de energia foi colocada sobre ele uma proteção de borracha maleável que não afetaria o *buzzer*, quando esse *buzzer* foi pressionado

causando sua deformação. Através do auxílio do osciloscópio observou-se que ele gerou aproximadamente 1,44 V.

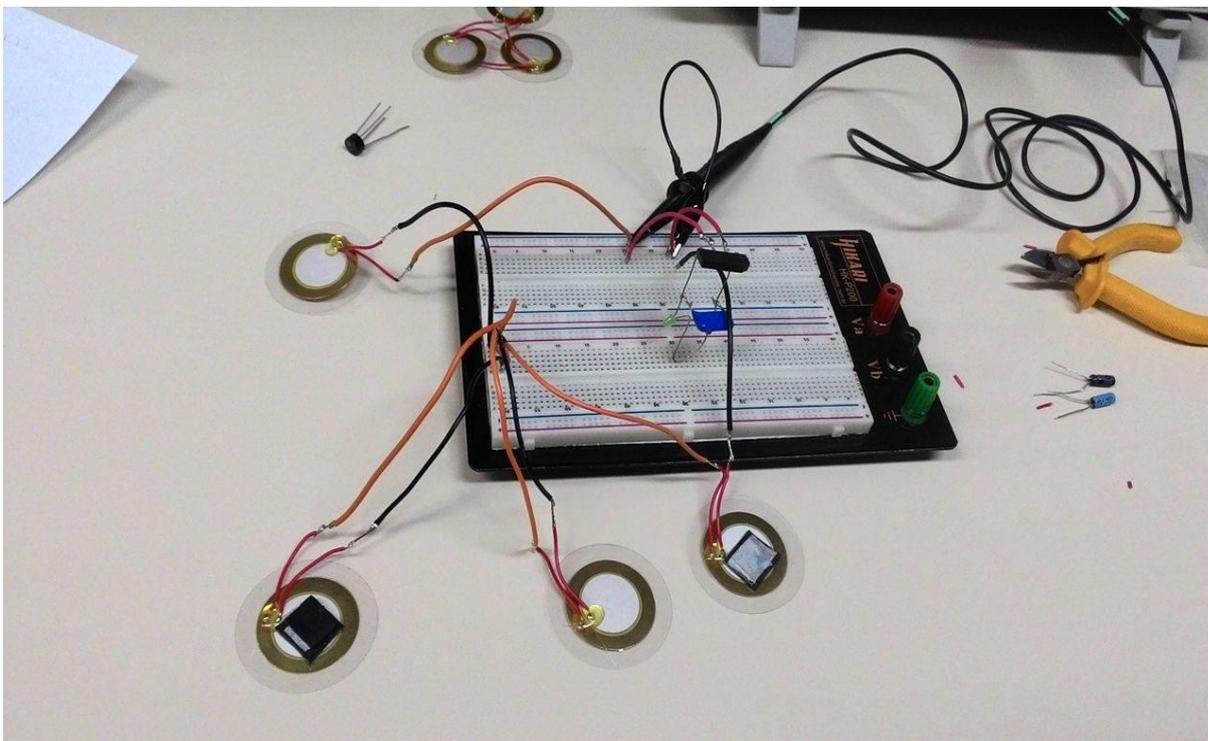
3.3.2. Como evitar perdas de energia gerada – teste 2

Ao realizar o teste dois, foi visto que quando os *buzzers* foram conectados em paralelo os mesmos anulavam a tensão gerada entre eles, o que não ocorreu quando a ligação dos *buzzers* foi feita em série.

Foram conectados no *protoboard* quatro *buzzers* também em série, nesse teste foram pressionados de forma sequencial, simulando como seria um passo de uma pessoa que pisa com o lado externo do calcanhar e se move levemente para dentro, seguindo em linha reta até a elevação do dedão, chamada de “Pisada Normal”.

Foi também acoplado no *protoboard*, além dos *buzzers* um capacitor de $1\mu\text{F}$, um resistor de 27 ohms e um LED mostrada na Figura 3.3.2. Essa ponte retificadora serve para converter CA (corrente alternada) para CC corrente contínua, essa mesma ponte, está dentro do carregador portátil.

Figura 3.3.2- Teste feito com quatro *buzzers*, capacitor de $1\mu\text{F}$, um resistor de 27ohms e ponte retificadora.

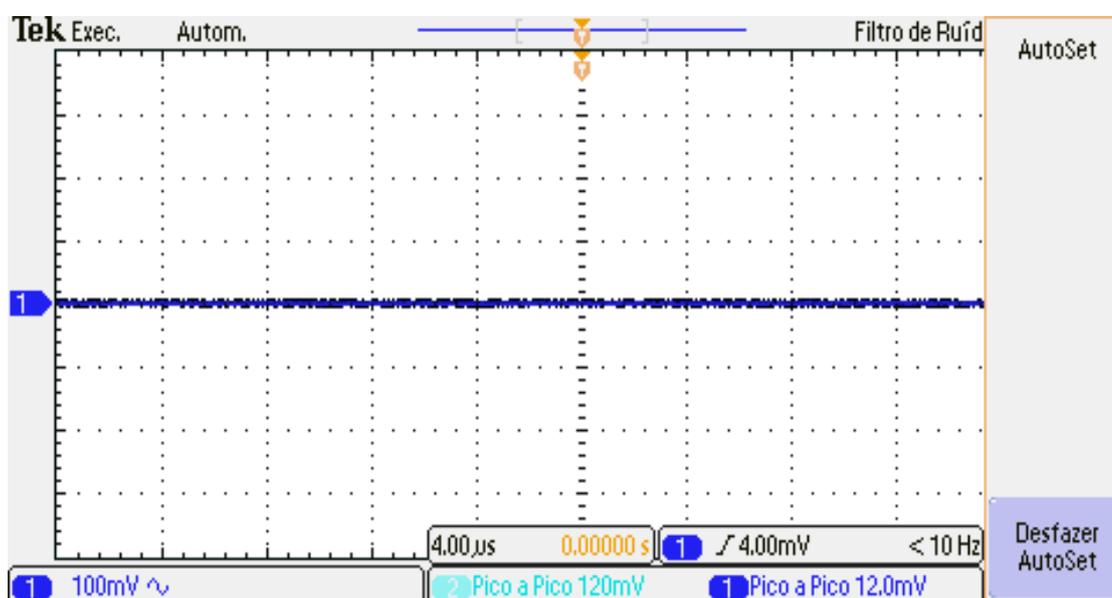


Fonte: Próprio autor

3.3.3. Melhor forma de ligação entre os *buzzer* piezelétricos – teste 3

Primeiramente, os *buzzer* piezelétricos foram colocados em ligação paralela, porém, quando foi realizado o primeiro teste, foi observado no osciloscópio que a tensão gerada era 0 V, porque quando os *buzzer* eram pressionados um sobreposto ao outro com a proteção de uma borracha maleável entre eles, no momento em que ocorria essa deformação, um anulava a tensão gerada pelo outro fazendo com que ela fosse nula. Conforme a Figura 3.3.3.

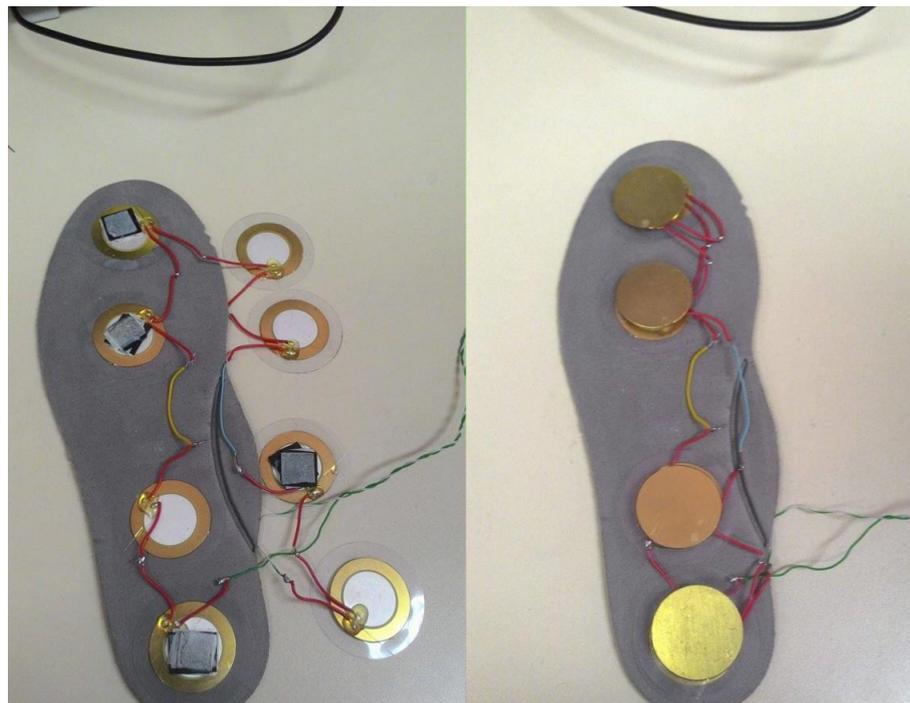
Figura 3.3.3 - Simulação da tensão nula



Fonte: Próprio autor

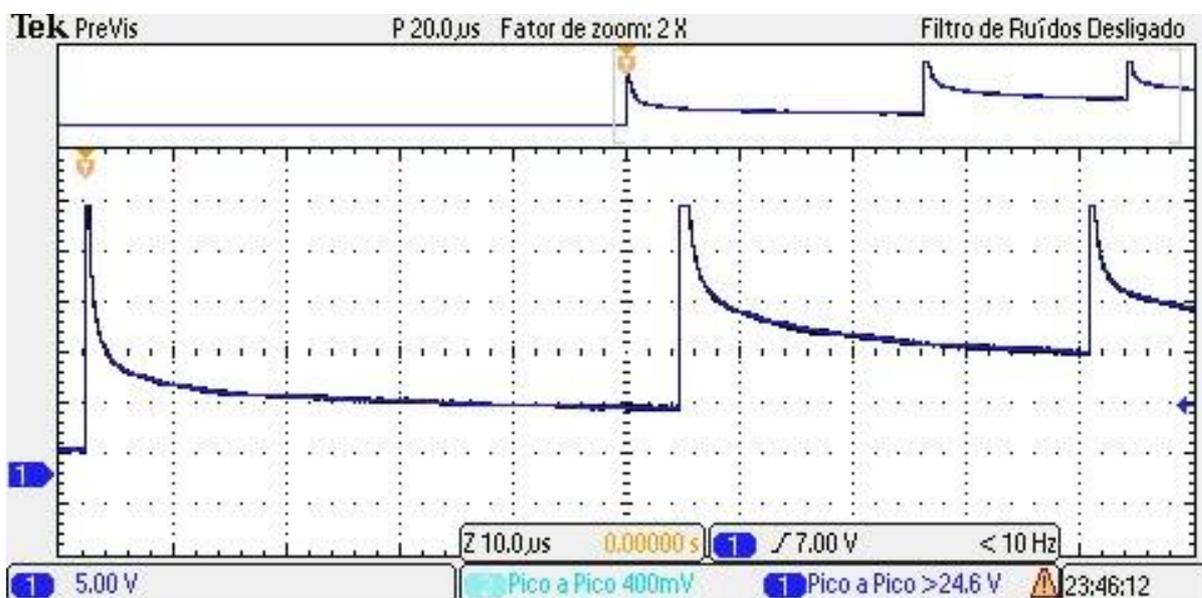
O problema da anulação das tensões foi corrigido fazendo com que a sua ligação, antes em paralelo, fosse modificada e reparada com oito *buzzers* piezelétrico, conforme a Figura 3.3.3.(a). Desta foram, fazendo com que fosse gerada uma tensão de 24,6 V, como mostrado na Figura 3.3.3.(b). Através do uso LTspice IV foi possível gerar a onda retifica mostrada na Figura 3.3.3(d)

Figura 3.3.3.(a) - Palmilha com oito *buzzer's* ligados em série



Fonte: Próprio autor

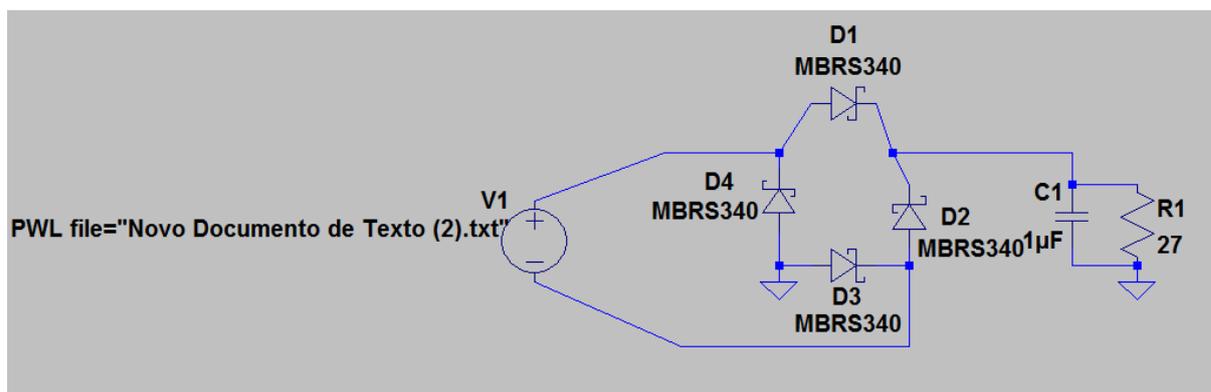
Figura 3.3.3.(b). - Oito *buzzer's* piezelétricos sendo pressionado de forma sequencial.



Fonte: Próprio autor

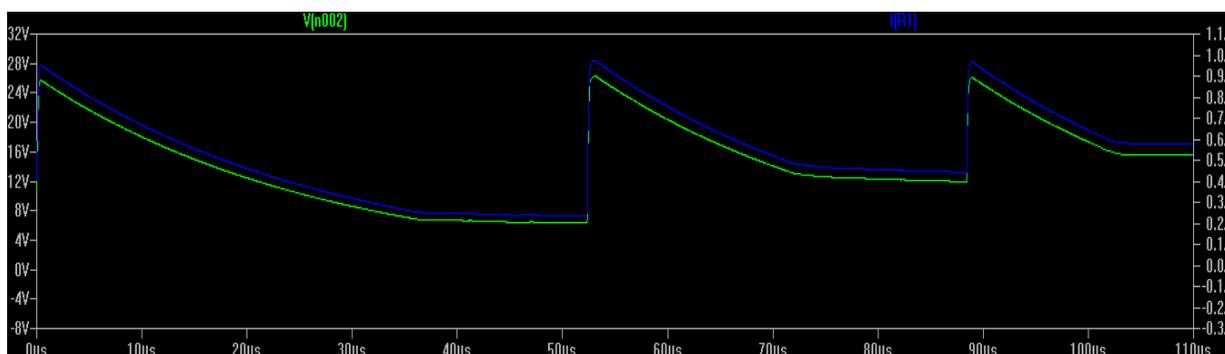
A figura 3.3.3.(c) mostra o esquemático do circuito que foi usado nas simulações do software Ltspice IV, nele foi implementado o diodo mais próximo com o que foi utilizado no laboratório de eletrotécnica.

Figura 3.3.3. (c) – Esquemático usado no Ltspace



Fonte: Próprio autor

Figura 3.3.3.(d).- Simulação da onda retificada no LTspice IV dos oitos buzzer's



Fonte: Próprio autor

O 3.3.3(a) teste foi realizado no laboratório de eletrotécnica da UNIPAMPA, com o auxílio dos técnicos de laboratório. Os componentes piezelétricos foram pressionados com as mãos de forma sequencial, pois não foi possível fazê-lo de outra maneira devido ao equipamento que se dispunha no momento no laboratório de eletrotécnica.

A pressão exercida nesse teste foi de 26,52 N/cm² por par de componente piezelétrico:

- Peso exercido foi de 50kg → 500N
- Diâmetro do componente piezelétrico (BUZZER): 4,9 cm
- Raio do componente piezelétrico (BUZZER): 2,45 cm

Então para encontrar área de circunferência do *buzzer* aplica-se:

$$A = \pi * r^2 \quad (3.1)$$

Onde r é o raio, em função disso a área (A) encontrado é 18,85 cm²

E para a pressão exercida no componente piezelétrico, tendo que a massa (m) é 500N aplica-se a Equação 3.2:

$$p = \frac{m}{A} \quad (3.2)$$

Onde m é a massa e A é a área encontrada na Equação 3.1, sendo assim o valor de p ficou calculado em 26,52 N/cm²

Os valores encontrados em RMS encontrados com o auxílio LTspice foram uma tensão de saída RMS, corrente de saída RMS, e a Potência RMS, sendo que os valores da tensão de 15,713 V e corrente de 0,58196 A foi disponibilizado pelo LTspice e a potência RMS foi calculada através da Equação 3.5 encontrado assim uma potência RMS de 9,14 W.

Observando os dados da figura 3.3.3 (d), dados simulados, com os obtidos da 3.3.3 (b), tem-se praticamente o mesmo comportamento da tensão.

3.3.4. Como obter maior eficiência dos *buzzer's*

Conforme foi apresentado nos itens 3.3.1 e 3.3.3 a melhor aplicação dos *buzzer's* e com eles sendo ligados em série e perfilados em fila um atrás do outro conforme. Figura 3.3.3.(a), assim com o pisar da pessoa, os *buzzer* se pressionado forma sequencial, sofrendo a deformação mecânica que por consequência é convertida em tensão necessária para o carregador portátil.

3.3.5. Quantos *buzzer* seriam necessários para gerar energia para o carregador portátil

Para atender as especificações do carregador é necessário que seja gerada uma tensão mínima de 5V já com as perdas que ocorrem no processo. Partindo da análise da seção 3.3.3, que gera uma potência de 9,14 W e considerando que o carregador pode fornecer 6W (1200mA e 5V) é possível gerar a carga a partir de quatro *buzzer's*. Ou seja, quantidade de *buzzer's* aplicados nos testes foram oito

componentes, mas a partir de quatro componentes piezelétricos já é possível gerar a energia necessária.

3.3.6. Tempo médio para carregar o carregador portátil na prática – Teste 4

O tempo de carga total para o carregador portátil varia de acordo com a pisada, do tempo de caminhada da pessoa e, se a pessoa está correndo ou caminhando. Quanto mais rápido, o indivíduo exerce o movimento, mais rápida é a deformação, no *buzzer* piezelétrico, e mais rápido ele se deforma de modo sequencial. Assim, pode ser aplicado em qualquer tamanho de palmilha. Outro detalhe é o peso que pode ser aplicado ao componente piezelétrico que varia, pois nos testes foi aplicado cargas que variaram de 78 Kg a 96 Kg, sendo pressionado de forma contínua.

Visto que o tempo médio de um passo ao caminhar é de 1 segundo e ao correr esse tempo cai para 0,5 segundos, o peso então não afetaria o dispositivo porque o movimento na maior parte do tempo é contínuo. Assim, o envio de energia para o carregador é realizado em menor tempo.

Desconsiderando a massa do indivíduo a carga completa no carregador varia entre 2 horas e 5 horas dependendo de como os *buzzer's* sofrem a deformação mecânica. A Figura 3.6.1 mostra o carregador portátil e suas especificações.

Figura 3.6.1 - Carregador Portátil



Fonte: Próprio autor

As especificações do carregador portátil são:

- Bateria de lítio; capacidade de 1200mAh;
- Entrada: 5V / 1 A

- Saída: 5V / 1 A
- Dimensões: 9,7cm x 2,25cm x 2,5cm
- Vida útil: 500 cargas/ ciclos
- Peso: 70 gramas.

Esse procedimento foi realizado ao ar livre, em virtude de que os equipamentos disponíveis não poderiam ser utilizados nesse teste em razão da movimentação que seria necessária para realizá-lo.

Colocando a palmilha dentro do tênis e com o auxílio do marcador de tempo do celular foi feita uma média de tempo que leva para o carregado portátil carregar que varia conforme o movimento realizado. Esse teste foi realizado em um tempo médio de uma hora e meia, com alternância entre corrida e caminhada, em um percurso de 6.500 m com uma velocidade média de 4,33 km/h a velocidade foi encontrada a partir da Equação 3.3.

$$v = \frac{d}{t} \quad (3.3)$$

Onde v é a velocidade, d é a distância percorrida e t é o tempo.

3.3.7. Ensaio realizado com o equipamento SHIMADZU – Teste 5

Outra metodologia aplicada foi feita no laboratório dos cursos de engenharia civil e da engenharia mecânica, com a utilização de um equipamento que simula pressões exercidas em vários tipos de materiais. Trata-se do equipamento SHIMADZU, modelo: AGS-X, 10N – 10kN, conforme Figura 3.7.1.

Figura 3.7.1- Equipamento de simulação de pressão



Fonte: Próprio autor

Com a utilização da SHIMADZU, foi possível verificar a tensão de saída apenas no multímetro, mas com o osciloscópio não foi possível. Os valores da tensão de saída não foram possíveis de serem capturados com o osciloscópio pelo motivo de que o deslocamento dos discos de pressão da SHIMADZU ocorreria de forma muito lenta.

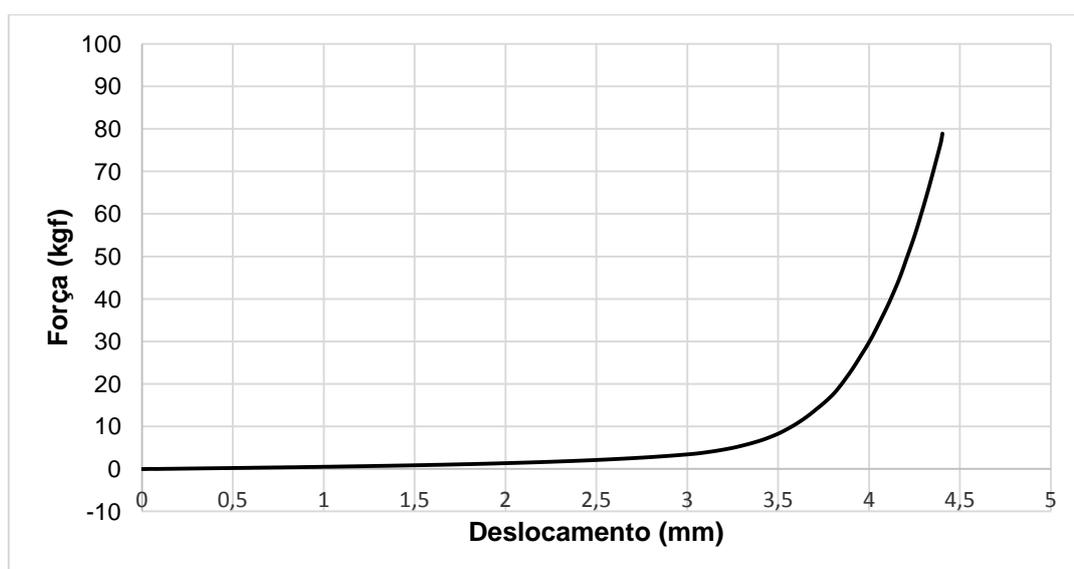
Através dos dados foi possível realizar o gráfico de força versus deslocamento visto na Figura 3.7.2. Os resultados obtidos foram oriundos da deformação de dois componentes piezelétrico (BUZZER) ligados em série, como visto na Figura 3.7.3. Neste experimento foi possível a capturar a tensão gerada com o multímetro (Agilent U1251B True RMS Multimeter) mostrado na Figura 3.7.2, cujo o valor de potencial após a deformação foi aproximadamente de 3,5 V.

Figura 3.7.2- Multímetro (Agilent U1251B True RMS Multimeter)



Fonte: Próprio autor

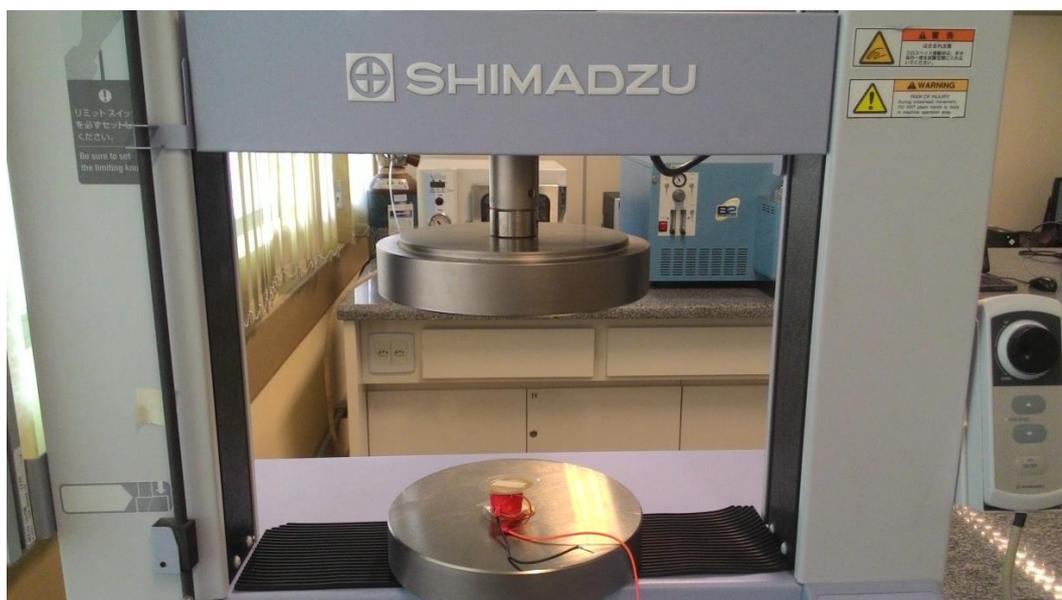
Figura 3.7.3 – Gráfico de relação de Força x Deslocamento



Fonte: Próprio autor

Foi analisado a possibilidade de utilizar os outros equipamentos do outro laboratório do curso de engenharia mecânica, como o pistão dos motores ou os pistões pneumáticos que se encontram no campus da UNIPAMPA. Entretanto, como o uso dos pistões do motor tinha a possibilidade de danificar ou quebrar o próprio equipamento e com os pistões pneumáticos existentes não permitiam fixar o componente piezelétrico inviabilizaram assim, o uso desses dois equipamentos.

Figura 3.7.4- Componente piezelétrico (BUZZER) no equipamento SHIMADZU



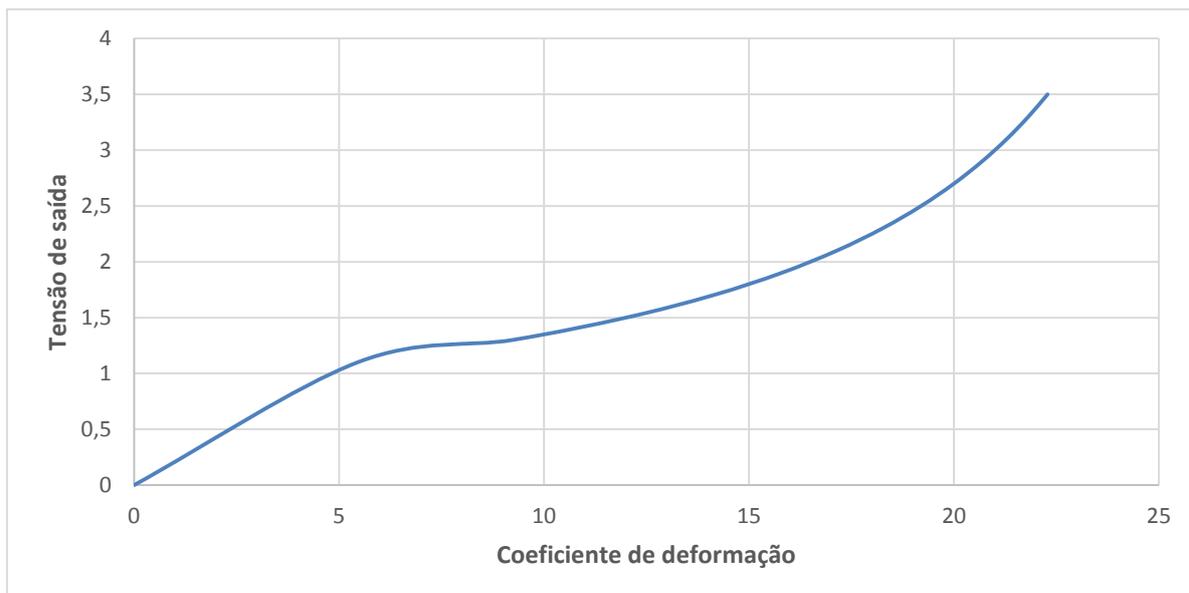
Fonte: Próprio autor

Devido à falta de recursos práticos para determinar um padrão e captura de tensão foi determinada a tensão elétrica a partir das equações características apresentadas no capítulo 2.

Para calcular a tensão de saída aplica-se a Equação 2.6, esse ensaio foi feito com dois componentes piezelétricos, mas para tal cálculo é necessário o valor de g_{33} (valor de deformação do buzzer), que não foi disponibilizado pelo fabricante e não foi possível determiná-lo em laboratório por falta de equipamentos adequados. Para determiná-lo, foi realizado uma interpolação com a Equação 3.4 com os valores da tabela 1, para gerar o gráfico de Tensão de Saída.

$$g_{33} = \frac{T_z}{V_z} \quad (3.4)$$

Figura 3.7.5 - Tensão de Saída ($V_z \times g_{33}$)



Fonte: Próprio autor

Tabela 1- Tensão de saída e coeficiente de deformação

Tz	Tensão de saída	Coeficiente de deformação
78	3,5	22,28571
72	3,3	21,81818
66	3,1	21,29032
60	2,9	20,68966
54	2,7	20
48	2,5	19,2
42	2,3	18,26087
36	2,1	17,14286
30	1,9	15,78947
24	1,7	14,11765
18	1,5	12
12	1,3	9,230769
6	1,1	5,454545
0	0	0

Fonte: Próprio autor

A partir dos dados fornecidos foi possível calcular a potência instantânea através da equação 3.5.

$$P = I * V \quad (3.5)$$

Onde P é a potência, I é a impedância e V é a tensão.

Para o valor tensão foi utilizado o valor de 24,6 V fornecido no ensaio no equipamento da SHIMADZU.

Para determinar a potência gerada pelo *buzzer's* foi calculado a potência RMS. Dada pela equação 3.6.

$$Prms = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dT} \quad (3.6)$$

Onde T é o período.

De posse dos valores de tensão foi determinada a potência de cada ponto através da equação 3.7 :

$$P = \frac{v^2}{R} \quad (3.7)$$

Onde v é a tensão e R é a impedância fornecida pelo fabricante. Através dos dados de potência de cada ponto foi determinada a potência RMS através da equação 3.8.

$$Prms = \sqrt{\frac{x1^2 + x2^2 + x3^2 + \dots + xn^2}{N}} \quad (3.8)$$

Onde $x1^2 + x2^2 + \dots + xn^2$ são os valores dos pontos gerados e N é o número de pontos utilizados na equação.

O valor da potência RMS encontrada equação 3.8 para 14 pontos foi de 0,0263 W.

Levando em consideração o custo dos componentes utilizados, foi possível ter uma estimativa de quanto R\$/mW é obtido a cada dois componentes piezelétricos (*Buzzer*):

- 1 *Buzzer* (R\$ 1,60);
- Par de Palmilhas (R\$ 9,80);
- Carregador Portátil (média de R\$25,00).

Assim o valor do projeto ficou aproximado em R\$ 34,00, levando em consideração que esse valor é apenas com a utilização de (dois *buzzer's*, uma

palmilha e o carregador portátil). Através da Equação 3.5 foi possível chegar no custo de 0,55 R\$/mW.

$$R \$/mW = \frac{R\$}{P} \quad (3.9)$$

Onde $R\$$ é o valor dos dois componentes piezelétricos e P é a potência instantânea calculada.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos nesse trabalho, comparando com os resultados de Cardoso, em sua dissertação. Nesse trabalho com um *buzzer* foi possível gerar 1,44 V enquanto em Cardoso foi possível 1,2 V necessitando 3,5 horas de vibrações contínuas ligando dois *buzzers* em paralelo, mas não indica a tensão gerada por ele.

Com a aplicação dos testes realizados nesse projeto, com ênfase maior no teste 2, foi possível gerar uma tensão de 24,6 V ligando oito *buzzer's*. Esta tensão permite fornecer energia completa ao carregador portátil em um tempo que varia de 2 horas a 5 horas, variando de pessoa a pessoa.

Foi visto também que com base nas simulações através da Equação 3.8 foi encontrado uma potência RMS com valor de 0,0263 W para o uso de dois piezelétricos com a tensão máxima foi de 3,5 V. Para a simulação do LTspice com oito piezelétrico e tensão máxima de 24,6V foi encontrada uma potência RMS de 9,14 W. Vale salientar que usando esses oito *buzzer* cabem em uma palmilha com o número 41.

Com o auxílio da máquina SHIMADZU, foi possível observar que com uma carga de 78Kg aplicada em dois componentes piezelétricos ligados em série geram 3,5 V. Desta forma, o microgerador piezelétrico pode ser montado e acoplado com quatro *buzzer's* ligados em série que desta maneira geram aproximadamente 14 V.

Entretanto, Cardoso fez seu teste com um *buzzer* e esse projeto foi feito com oito *buzzers* em série, baseado nisso a tensão gerada entre as simulações foi maior, mas se comparado com a tensão gerada em um *buzzer* elas são próximas entre as duas simulações.

Levando em consideração o custo do projeto com a relação R\$/mW espera-se que no futuro seja possível a realização de projetos através da utilização de componentes piezelétricos.

De acordo com a proposta apresentada no trabalho e através dos testes realizados, mostraram que é possível a geração de energia piezelétrica de custo baixo. Para trabalhos futuros passa ser uma alternativa para aumentar a maneira de geração de energia elétrica limpa, financeiramente viável e sustentável.

5. CONCLUSÕES

Apesar de poucos materiais piezelétricos conhecidos, principalmente na área de materiais metálicos (Ligas), pode-se perceber a grande importância e a diversidade aplicação destes materiais. Visto que os materiais piezelétricos estão ligados diretamente às inovações tecnológicas que contribuem e podem contribuir ainda mais para a geração de uma energia limpa e sustentável.

Com o sistema de microgeração de energia utilizando o componente piezelétrico (*buzzer*) piezelétrico do trabalho para carregar uma bateria 1200mAh que necessita de 5V, precisaria entre 2 horas e 5 horas dependendo de como o indivíduo a utiliza. Assim, sendo possível a geração de energia através dos *buzzer's* piezelétricos, acoplados em uma palmilha de calçado e permitindo ao usuário carregar seus aparelhos eletrônicos com o auxílio do cabo USB após uma caminhada ou corrida.

Mesmo que o assunto ainda necessite de uma pesquisa mais minuciosa sobre a geração de energia limpa, é possível que através dos *buzzer's* piezelétricos, também tenhamos uma geração em uma escala um pouco maior. O uso em residências urbanas possibilitaria uma economia para seu morador e um alívio para o meio ambiente.

A pesquisa, assim como os protótipos construídos e testes realizados também obtiveram suas contribuições, a partir do desenvolvimento de um tipo de gerador piezelétrico que através da utilização dos *buzzer's*, e verificação das características, favoreceu a geração e aplicação da energia elétrica, de baixo custo.

5.1. Contribuições

Algumas contribuições foram possíveis com o desenvolvimento do trabalho:

- Elaboração de um dispositivo de gerador de energia elétrica que é baseado em um componente piezelétrico de baixo custo.
- Verificação das qualidades de aplicação e geração;
- Estabelecimento de um método de geração de energia através da piezeletricidade, através de um circuito simples e de baixo custo.

5.2. Sugestões para continuidade da pesquisa

Algumas contribuições foram possíveis com o desenvolvimento do trabalho: Para poder aproveitar melhor a ideia da geração de energia através da utilização de componentes piezelétricos, esse trabalho é capaz de oferecer como base para aperfeiçoamento de geradores piezelétricos. Como estudos posteriores pode-se sugerir:

- Investigação e construção de geradores com maior capacidade de geração de energia;
- Realizar um controle com maneiras que possam maximizar o fluxo de potência para a bateria;
- Um modelo de implementação para que a geração de energia através dos dispositivos piezelétricos possa ser feita em maior escala armazenando essa energia com a utilização de super capacitores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARON, L; SILVA, R. **Materiais elétricos: compêndio de trabalhos, volume 7.** 2010.

CABRAL, E. **Piezoelasticidade e Ferroelasticidade**, Física II. 2016.

CANCIO, L. **Piezoelasticidade: a geração de energia limpa e suas aplicações**. 2013.

CARDOSO, J. **Sistema para Aproveitamento de Energia Vibracional Baseado em Transdutores Acústico Piezelétricos de Baixo Custo**. 2006.

ESPINDULA, A. **Efeitos da Piezoelasticidade na Movimentação Ortodôntica**. (1990)

HOFMANN K., OTTMAN, G H.; BHATT, A. C. e LESIEUTRE, G. A. Adaptive Piezoelectric Microgeração Circuit for Wireless, Remote Power Supply. **IEEE Transactions on Power Eletronics**. V 17, No. 5, pp,1-8, 2002

G1, **Jornal Nacional**, julho. 2010. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2010/07/japoneses-transformam-alegria-de-torcedor-em-energia-eletrica.html>> Acesso em 15 out. 2015

Junges, C. **Gazeta do Povo | Economia**, julho. 2016. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/economia/energia-e-sustentabilidade/ciclovias-de-curitiba-terao-piso-que-gera-energia-a-partir-do-movimento-0b1ik6n0ms09rcp3ch33yt6wt>> Acesso em 14 ago. 2016

HOROWITZ, S.; ANURAG,K; FEI,L; DAVID. **Techology Development for Self-Powered Sensors**. Inderdisciplinary Microsystems Group. University of Florida Gainesville, FL. 1st Flow Control Conference. 24-26 2002 / St. Louis, MO.

MARINHO, A; ASSUNÇÃO, J; VILARINHO, L; ALBURQUERQUE, P; SILVA, T. **Materiais Piezelétricos** (2013)

Matheus, M. **Sustentabilidade na Construção civil**, outubro. 2013. Disponível em: <<http://sustentabilidade-uniceub.blogspot.com.br/2013/10/piso-gerador-de-energia.html>> Acesso em 16 set. 2015

MEIRELLES, D. **Tecnologias para carregar baterias gadgets em qualquer lugar**, maio. 2015. Disponível em: <<http://bbaterias.com.br/bateria-notebook/artigos-bateria/7-tecnologias-para-carregar-baterias-de-gadgets-em-qualquer-lugar>> Acesso em: 28 abril. 2016

PIPPI, R. **Projeto e Construção de Motores Rotativos Ultrassônicos de Ondas Viajantes**. (2003)

UMEDA, M.; NAKAMURA, K. e UEHA, S. **Energy Storage Characteristics of a Piezogenerator Using Impact Vibration**. Japan Journal of Applied Physics, Vol. 36, Part 1, No.5b, pp.3146-3151, 1997

Xu, C.N.; AKYAMA, M. and WATANABE, T. **Electrical Power Generation Characteristics of PZT Piezoelectric Ceramics**. IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectric and Frequency Control. V. 45, no.4, 1998.