

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**DANIEL EMILIO MARTINI DE OLIVEIRA
GABRIEL LOPES LOMEU REIS OLIVEIRA
MATHEUS VENTURA DA SILVA**

PIEZOELETRICIDADE NA GERAÇÃO DE ENERGIA

VOLTA REDONDA

2020

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

PIEZOELETRICIDADE NA GERAÇÃO DE ENERGIA

Monografia apresentada ao curso de Engenharia elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Discentes:

Daniel Emilio Martini de Oliveira

Gabriel Lopes Lomeu Reis Oliveira

Matheus Ventura da Silva

Orientador: Prof. M.SC. Cláudio Márcio
Freitas da Silva

VOLTA REDONDA

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

Discentes:

Daniel Emilio Martini de Oliveira

Gabriel Lopes Lomeu Reis Oliveira

Matheus Ventura da Silva

Título do TCC:

PIEZOELETRICIDADE NA GERAÇÃO DE ENERGIA

Apresentado publicamente perante a Banca Examinadora, como parte dos requisitos para a conclusão do Curso de Engenharia Elétrica.

Aprovada em _____ de _____ de _____

Banca Examinadora

Professor Orientador

(Prof.M.SC. Cláudio Márcio de Freitas da Silva)

Professor Avaliador

(Prof.M.SC. Edson de Paula Carvalho)

Professor Avaliador

(Prof.M.SC. Maurício Ferreira Haddad)

À Deus e a nossa família

Agradecimentos

Agradecemos primeiramente à Deus, por nos ter dado a oportunidade de chegar ao final do curso e estar concluindo essa fase da vida, assim iniciando uma nova trajetória e metas.

Também agradecemos as nossas famílias pelo total apoio e ajuda, aos nossos pais, filhos, irmãos, aos amigos de classe os quais passamos essa maior parte do tempo enfrentando esses desafios juntos.

Agradecemos principalmente ao nosso orientador de projeto, o professor M.SC Cláudio Márcio, que nos auxiliou durante toda etapa de desenvolvimento, tirando as dúvidas e a exposição de projetos como base, ao Professor e coordenador de curso Edson de Paula, que também nos ajudou e ao Professor Francisco Roberto Silva de Abreu, que estava presente durante toda etapa de projeto, passando as devidas informações quanto ao tema, formatação e apresentação.

Queremos agradecer de modo geral a todos os professores que fizeram parte de nossa caminhada, pois com eles podemos obter o aprendizado e conhecimento, chegando a onde estamos.

Agradeço também a todo corpo docente do curso de Engenharia Elétrica do UniFOA por todo aprendizado, pela excelência da qualidade técnica de cada um, por todo o conhecimento transmitido, e a todos

aqueles que direta ou indiretamente
contribuíram para o alcance deste objetivo
o meu muito obrigado.

Resumo

No decorrer do tempo, a população mundial tem crescido e utilizado cada vez mais os recursos energéticos disponíveis na natureza tendo em vista que isso afeta não só o estilo de vida das pessoas, mas também a saúde de nosso Planeta. Dessa forma, a necessidade de usarmos meios renováveis de geração de energia elétrica se tornou inevitável para suprirmos a demanda sem agredir o meio ambiente. A piezoelectricidade é o fenômeno em que vamos explorar neste trabalho, levando em consideração a energia cinética o principal fator de geração de energia, os grandes espaços públicos ou equipamentos coletivos são grandes potenciais energéticos devido ao grande volume de pessoas que passam por eles. As pesquisas que abrangem a piezoelectricidade estão caminhando para serem validadas e nosso projeto abordará de forma prática, a real dimensão de como a geração de energia através de cristais é um desafio, mas sobre tudo, ressaltaremos o potencial que esta tecnologia tem de ser empregada no cotidiano das pessoas, em espaços que além de serem comunitários, serão eficientes para geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Recursos energéticos, Meio ambiente, Piezoelectricidade, Geração de energia.

Abstract

Over time, the world population has been growth and used more and more energy resource available in the nature, in view that this affect not just the life style of the people, but the health of the Earth too. Therefore, the necessity of we use renewable ways of electrical energy generation turned inevitable to meet the demand without attack the environment. The piezoelectric is a phenomenon witch we'll work in this final paper, considering the kinetic energy the main factor of energy generation, the big public spaces or equipment are great potential electric energy because of the high volume of people that pass by them. The searches that talks about the piezoelectric phenomenon are in progress to be validate, and also, this Project will explain in a practical way the real dimension of how much challenging generate energy by crystals is, but we'll emphasize the power that this technology has to be used on people's daily lives, in spaces that besides of be used communitarian, they will become efficient points of electric energy generation.

Keyword: Energy resource, Environment, Piezoelectric, Energy generation.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 JUSTIFICATIVA | 15 |
| 3 OBJETIVOS | 16 |
| 3.1 Objetivo Geral | 16 |
| 3.2 Objetivo Específico | 16 |
| 4 METODOLOGIA | 17 |
| 5 HISTÓRIA | 18 |
| 6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 6.1 Constantes de materiais Piezoelétricos | 24 |
| 6.1.1 Sobre característica mecânica de materiais | 26 |
| 6.1.2 Tratamento dos materiais | 26 |
| 6.1.3 Cerâmicas | 27 |
| 6.2 Transdutores | 27 |
| 6.3 Utilização da piezoeletricidade | 28 |
| 6.4 Módulo conversor | 30 |
| 6.4.1 Ponte retificadora interna | 32 |
| 6.4.2 Undervoltage Lockout (UVLO) | 32 |
| 6.4.3 Internal Rail Generation | 32 |
| 6.4.4 Regulador Buck | 33 |
| 6.5 Armazenadores de energia | 34 |
| 7 EXPERIMENTOS | 41 |
| 7.1 Medição de tensão/peso em um transdutor | 41 |
| 7.2 Elaboração do protótipo Piso Gerador de Energia | 42 |
| 7.3 Teste de geração somente do Piso | 46 |
| 7.4 Construção do circuito regulador e armazenamento | 48 |
| 7.5 Teste de geração de energia regulada e armazenada | 49 |
| 7.6 Projeção dos resultados obtidos | 51 |
| 8 APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO | 53 |
| 9 CONCLUSÃO | 54 |
| 10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 55 |

Lista de imagens

Figura 1- Representa a divisão das fontes de energia- EIA 2018

Figura 2- Irmãos e colegas de classe: Jacques (esquerda) e Pierre (direita) Curie, descobridores do efeito piezoelétrico. (APS physics,1880)

Figura 3- Estrutura atômica da cerâmica de PZTs(Luiz C.C.M.Nagamine,2016)

Figura 4– Representação gráfica da microestrutura de domínios, mostrando grãos sem polarização; polarizado parcialmente com domínios de 180°; completamente polarizado, onde apresenta Pr, polarização remanescente no cristal. (M&D DIELECTRICS, 2002)

Figura 5 – Estrutura dos Cristais Piezoelétricos

Figura 6 - Orientação dos polos durante o processo de "pollying" (GmbH&KG,2006)

Figura 7- Transdutor piezoelétrico (autores)

Figura 8– Pista de dança geradora de energia piezoelétrica (Swu,2011)

Figura 9- LTC3588 (Usinainfo, 2020)

Figura 10- Diagrama de blocos do LTC3588 (Datasheet LTC3588,2010)

Figura 11- Representação da ligação do capacitor LTC3588 (Datasheet LTC3588,2010, modificado pelos autores,2020)

Figura 12- Circuito conversor Buck (Datasheet LTC3588,2010)

Figura 13- Sistema de carregamento de bateria, acúmulo de energia (conhecimentocientifico,2020)

Figura 14- Representação do capacitor(obaricentrodamente.com, 2013)

Figura 15- Acúmulo de cargas do capacitor (Sabereletrica,2018)

Figura 16- Simbologia do indutor (sintoniafinadotcom, editado pelos autores,2020)

Figura 17- Tipos de núcleo de indutores (mundodaeletrica,s.d)

Figura 18- Balança com amortecimento (autores, 2020)

Figura 19- Fios pré soldagem (autores, 2020)

Figura 20- Pastilhas pós soldagem (autores, 2020)

Figura 21- Instalação da manta amortecedora (autores, 2020)

Figura 22- Fabricação dos botons de borracha 01 (autores, 2020)

Figura 23- Fabricação dos botons de borracha 02 (autores,2020)

Figura 24- Posicionamento das pastilhas 01 (autores, 2020)

Figura 25- Posicionamento das pastilhas 02 (autores, 2020)

Figura 26- Diagrama de configuração do piso gerador (autores, 2020)

Figura 27- Interno do piso gerador (autores, 2020)

Figura 28- Geração de pico de tensão positivo malha aberta (autores, 2020)

Figura 29- Geração de pico de tensão negativo malha aberta (autores, 2020)

Figura 30- Pilhas AAA em série (autores, 2020)

Figura 31- Geração de pico de corrente positiva malha fechada (autores, 2020)

Figura 32- Geração de pico de corrente negativo malha fechada (autores, 2020)

Figura 33- Conversor BUCK LTC3588 (autores, 2020)

Figura 34- Diagrama de ligação do protótipo (autores, 2020)

Figura 35- Tensão regulada pelo LTC3588 (autores, 2020)

Figura 36- Corrente regulada pelo LTC3588 (autores, 2020)

Lista de abreviaturas

PZTs = Titanato de Zircônio de chumbo

DDP= Diferença de Potencial

CdS= Sulfeto de cádmio

ZnO= Óxido de Zinco

Pb= Chumbo

Li= Lítio

d – Coeficiente piezoelétrico

T– Tensão mecânica

ϵ – Permissividade dielétrica

E – Campo elétrico

e(x) – Deformação

s – Coeficiente elástico

C= Capacitância

Dv= Variação de tensão

Dt= Variação de tempo

Di= Variação de corrente

Q= Carga elétricas

L= Indutância

R= Resistência elétrica

V= Tensão elétrica

I= Corrente elétrica

VACpp= Pico positivo de tensão alternada

VACpn = Pico negativo de tensão alterada

IACpp= Pico positivo de corrente alternada

IACpn= Pico negativo de corrente alternada

mAh= Mili amper hora

mW= Mili Watts

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Forças atuantes que contribuem para o efeito piezoelectrico. (METALMAT, 2005)

Tabela 2 - Materiais Piezoelétricos Relevantes- Engenheiros de materias

Tabela 3– Seleção de tensão de saída LTC3588 (Datasheet ltc3588,2010)

Tabela 4 – Resultado dos testes de geração de energia com e sem amortecimento (autores,2020)

Tabela 5 – Lista de materiais e preço (autores,2020)

Tabela 6- Sistema com um piso (autores,2020)

Tabela 7- Sistema com dez pisos (autores,2020)

Tabela 8- Projeção de Geração (autores,2020)

1 INTRODUÇÃO

Com a descoberta da energia elétrica o mundo sofreu uma transformação tecnológica significativa. Estamos constantemente utilizando esta energia em tudo o que fazemos, desde recarregar os celulares até iluminar o ambiente. A eletricidade tem sido fundamental para o desenvolvimento da humanidade, ela está ligada a tudo em nossa volta, todos os seguimentos industriais utilizam a eletricidade em algum ponto da cadeia produtiva. De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica a geração de energia foi aumentada em 3,6% em relação aos anos de 2017 e 2018, já segundo Rui Altieri, presidente da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, o consumo aumentará em 4,2% em 2020 comparado ao ano de 2019 (Luciano Costa, 2020) esse valor apresenta um elevado aumento dos últimos anos.

Com uma enorme demanda surge um desafio também ainda maior, como gerar energia para suprir tal necessidade e principalmente como gerar eletricidade sem agredir o meio ambiente em que vivemos. Atualmente apenas 1,6% da energia utilizada provem de fontes renováveis segundo dados da IEA 2018 como mostra a o gráfico abaixo.

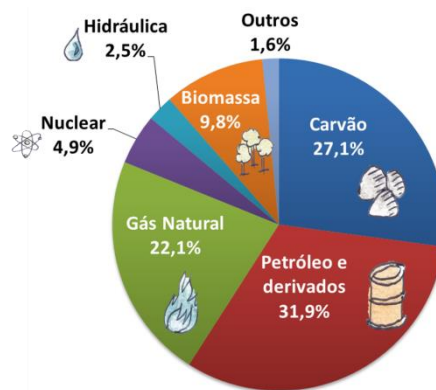


Figura 1- Representa a divisão das fontes de energia- IEA 2018

Com o intuito de discutir uma alternativa para aumentar geração de energia por uma fonte renovável, iremos tratar neste trabalho sobre a Geração de Energia Piezoelétrica, abordando o funcionamento de células piezoelétricas como fontes de energia, além dos desafios para sua implementação.

2 JUSTIFICATIVA

Considerando o atual cenário ambiental do planeta e a crescente demanda por energia elétrica, esse projeto estudará uma fonte de energia de baixo custo, sustentável e limpa, empregada no cotidiano de forma eficiente.

Tal pesquisa se baseará em testes de geração de energia com placas piezoelétricas de modo a observar o comportamento da energia gerada, armazenada e aplicada.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Este projeto tem como objetivo mostrar de que maneira a piezoelectricidade pode ser útil para substituir a geração de energias de fontes não renováveis, contribuindo para tornar o uso da energia elétrica mais sustentável e menos agressiva ao meio ambiente, além de estimular o estudo de geração de energia limpa e servir de base para novas pesquisas.

3.2 Objetivo Específico

Visando a aplicação dos conhecimentos teóricos e práticos adquiridos no decorrer do curso, tem-se como objetivo específico deste trabalho de conclusão de curso desenvolver um estudo prático e teórico na geração de energia limpa e renovável através de materiais piezoelétricos, visando a diminuição da geração de energia por fontes não renováveis as quais gera um impacto negativo no meio ambiente. Com base nessas informações, iremos desenvolver uma estrutura geradora de energia limpa que possa ser inserida no cotidiano das pessoas sem afetar ou modificar suas rotinas, utilizando a nossa capacidade de nos deslocarmos de um lugar ao outro para gerar energia que possa ser utilizada em benefício da sociedade sem interferir no ambiente que for inserido.

4 METODOLOGIA

No intuito de validar e concretizar nosso projeto, utilizamos a seguinte metodologia para o levantamento de dados:

- Pesquisa bibliográfica sobre o tema em artigos, monografias, dissertações e livros sobre gerador piezoelétrico.
- Construção de um piso com geradores piezoelétricos.
- Levantamento de dados sobre a geração de energia piezoelétrica através do protótipo confeccionado.
- Levantamento de locais para utilização da energia gerada.
- Projeção de fornecimento a um potencial maior
- Estudo de viabilidade econômica do projeto.

5 HISTÓRIA

Por volta de 1880 acendia-se uma descoberta revolucionária que ao longo dos anos originou diversas aplicações e passou a fazer parte de outras inovações que contribuíram para que a humanidade chegasse à evolução tecnológica que vivemos hoje. Os irmãos franceses Pierre e Jacques Curie encontraram uma nova forma de gerar potencial elétrico, está novidade extrai tensão elétrica de cristais e foi batizada de Piezoeletricidade. Esta técnica foi aprimorada e utilizada de diversas maneiras mais tarde, inclusive foi utilizada na fabricação de sonares para submarinos na Primeira Guerra Mundial e aplicada em equipamentos de ultrassonografia na medicina, também serviriam em empregos mais simples como os cristais utilizados em isqueiros para gerar centelhas e iniciar a chama.



Figura 2– Irmãos e colegas de classe: Jacques (esquerda) e Pierre (direita) Curie, descobridores do efeito piezoelétrico. (APS physics,1880)

O mais famoso dos irmãos Curie, Pierre Curie, nasceu na cidade de Paris, França, no dia 15 de maio de 1859. Apresentando grande desenvoltura para matemática na juventude, obteve aos 18 anos o equivalente a um grau superior e iniciou-se como instrutor em um laboratório. Pierre se tornaria conhecido por estudar o Magnetismo descobrindo o efeito da temperatura sobre o paramagnetismo onde deixou sua marca com a Lei de Curie. Pierre se casou com a também famosa madame Marie Curie e anos depois dividiram o prêmio Nobel. Mas antes de se tornar mundialmente famoso em 1881 ele e seu irmão fizeram outra descoberta com a Piezoeletricidade, que era possível obter o efeito inverso nos cristais, ao se injetar um campo elétrico o cristal se deformava, este ficou conhecido como Efeito

Piezoelétrico inverso. Pierre Curie faleceu em 19 de abril de 1906 atropelado por uma carroça de equipamentos militares em um dia chuvoso numa esquina movimentada de Paris.

Os dispositivos piezoelétricos pioneiros eram a base de quartzo o que permitiu gerar ultrassons em uma faixa de dezenas de KHZ's, porém como o quartzo depende de geradores de alta tensão tiveram dificuldade de estimular sua produção. Logo após a primeira guerra iniciou-se pesquisas por matérias piezoelétricas sintéticas. Os Estados Unidos terminaram desenvolvendo as cerâmicas piezoelétricas como nós conhecemos, os chamados PZTs, este nome se dá pela sua construção $Pb(Zn.Ti)O_3$.

Os PZts são um misto de zinco/chumbo e titânio/chumbo. A PZT é o material mais comumente utilizadas até hoje, até mesmo pelo seu custo ser reduzido, comparado aos outros tipos.

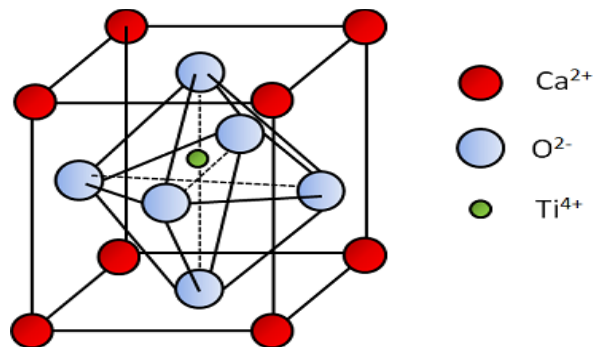


Figura 3- Estrutura atômica da cerâmica de PZTs(Luiz C.C.M.Nagamine,2016)

6 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Basicamente o efeito piezoelétrico acontece em cristais assimétricos (com titânico descentralizado) capazes de gerar um diferencial de tensão ao serem submetidos a uma tensão mecânica, esse efeito é chamado efeito piezo direto, do mesmo modo que pudesse aplicar um campo elétrico nesses materiais e eles se deformarem proporcionalmente, este efeito é conhecido como efeito piezo reverso.

Para compreender a piezoelectricidade nos cristais é preciso entender a microestrutura do material cerâmico. O que rege as propriedades cerâmicas dos cristais piezoelétricos é sua cristalografia ou seja seu arranjo cristalino associados aos defeitos na rede tridimensional da estrutura perovskita (perovskita-classe de materiais que têm fórmula química tipo ABC_3 , com íons de sítio B rodeados por um octaedro de íons de sítio C. Nesses cristais estão presentes característica ferroelétricas, essas características podem ser mais ou menos influenciadas pela ação de campos elétricos externos e pela influência direta de impurezas conhecidas como dopantes na rede cristalina, melhorando sua propriedade ferroelétricas consideravelmente.

É nessa microestrutura de domínio ferroelétrico que o efeito piezoelétrico acontece, ocorrendo especificamente no interior de cada grão. Por possuírem dipolos orientados de forma aleatória (Com eixos polares com orientações diferentes) e devido a ferroelectricidade presente, ao sofrerem ação de um campo elétrico os dipolos se redirecionam na direção do campo elétrico aplicado como mostrado na figura 4.

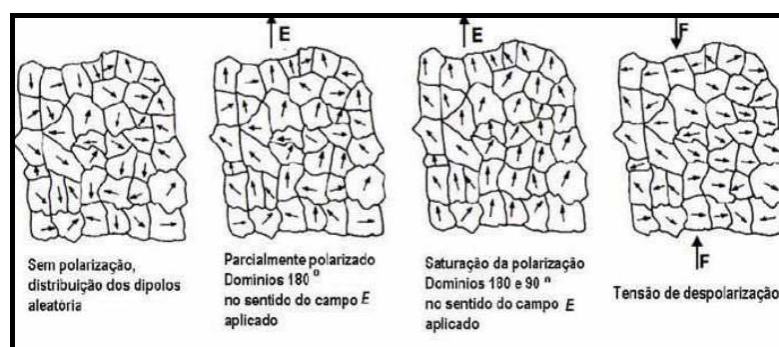


Figura 4– Representação gráfica da microestrutura de domínios, mostrando grãos sem polarização; polarizado parcialmente com domínios de 180° ; completamente polarizado, onde apresenta P_r , polarização remanescente no cristal. (M&D DIELECTRICS, 2002)

Quando determinada tensão elétrica é aplicada a um material piezoelétrico polarizado os domínios ferroelétricos aumentam seus alinhamentos proporcional a voltagem aplicada resultando em uma variação das dimensões do cristal. Essas distorções que acontecem, são provocadas pelo movimento das paredes de domínio.

Os domínios sofrem influência por um campo, e suas paredes de domínio, que são as bordas propriamente ditas que circulam os mesmos, limitando em um espaço, que quando esses são expostos a um campo elétrico intenso, os dipolos dos domínios ferroelétricos são alinhados de maneira mútua ao sentido desse campo (e), devido as suas interações com seus dipolos vizinhos, assim gerando o crescimento desses e sua condução.

Os dipolos dos materiais ferroelétricos já apresentam uma polarização, então sua constante dielétrica é maior que de materiais não ferroelétricos. O PZT de estrutura tetragonal, apresenta em partes suas características devido ao efeito extrínseco e intrínseco, esse efeito é diferente do tipo de material, não correlacionando aos fenômenos de condução. Randall, explica que as propriedades de um material piezoelétricos, dependem fortemente desses efeitos. No que se relaciona a parte intrínsecas, é a conservação da estrutura cristalina do ferroelétrico, e sua deformação gerando uma mudança de deslocamento, já as extrínsecas resultam da polarização dos domínios faladas anteriormente, pela movimentação das bordas de domínio.

A Figura 5 nos mostra a estrutura dos cristais e como a característica piezoelétrica funciona. Os ângulos dos 3 dipolos formados pelo íon A em seu estado normal em (a) geram a resultante nula, os ângulos estão de forma a se anularem. Já em (b) após sofrer uma deformação, os ângulos mudam e aparece uma resultante na direção da deformação:

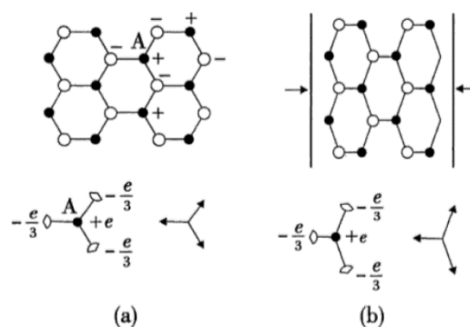


Figura 5 – Estrutura dos Cristais Piezoelétricos(engenheirosdematerias)

É importante observar que não se pode existir piezoeletricidade em cristais com centro de simetria de inversão. A piezoeletricidade não é restrita aos isolantes, ela pode ocorrer em diversos semicondutores como CdS e ZnO.

A aplicação de uma tensão mecânica em certa direção do cristal resulta geralmente em uma polarização em direção diferente, neste caso a relação entre as várias grandezas existentes são tensoriais. Entretanto algumas direções particulares do cristal, os vetores estão na mesma direção. Neste caso as relações são escalares.

As forças atuantes nos cristais piezoelétricos são mostradas na tabela 1. Para o efeito piezoelétrico direto o deslocamento “D” causa uma tensão elétrica. Para o efeito piezoelétrico inverso a deformação “e” é causada pela aplicação de um campo elétrico.

| Força | Efeito |
|-------|--------------------|
| E | D - Deslocamento |
| s | e (x) – Deformação |
| T | s - entropia |

Tabela 1 – Forças atuantes que contribuem para o efeito piezoelétrico. (METALMAT, 2005)

No efeito direto a carga Q criada por uma deformação D é proporcional a força e tem sinal inverso a deformação (expansão ou compressão). Ao interromper o deslocamento D e a tensão T veremos que:

$$D=Q/AdT$$

$$D=dT$$

No efeito inverso quando inserido um campo elétrico E produz uma deformação proporcional S (expansão ou contração) então:

$$S=dE$$

Com isso identifica-se que a constante piezoelétrica “ d ” é numericamente a mesma, sendo assim:

$$d=D/T=S/E$$

Para as magnitudes Tensoriais são relacionados as variáveis elásticas, tensões e deformações, já para magnitudes vetoriais são relacionadas as variáveis elétricas, campo e deslocamento nas equações de estado:

$$D=dT+\varepsilon^T E$$

$$S= s^E T+ dE$$

Onde T é a tensão aplicada ao material (Força por unidade de área), ε é o campo aplicado, D é a polarização induzida e S é a deformação por unidade de comprimento resultante. As constantes d , s e são parâmetros característicos de cada material. A constante d é a que caracteriza a piezoeletricidade, ela relaciona a polarização induzida com a tensão mecânica aplicada, ou a deformação produzida por um campo elétrico aplicado. Como S é adimensional, d tem a unidade inversa do campo elétrico m/V no SI, ou $cm/statvolt$ no CGS. Na realidade, cada material tem várias constantes piezoelétricas mas devido as várias componentes serem iguais entre si estas variáveis se anulam.

Podemos então verificar que existem dois tipos do efeito piezo, o direto quando a energia mecânica é transformada em elétrica após pressionar os cristais, esses são

deformados, assim ocorre um afastamento de suas cargas positivas e negativas onde é gerada os dipolos, ou seja a polarização, e geração de uma ddp por consequência. Já o efeito reverso, é a conversação contrária de energia, quando esses cristais são submetidos a um campo elétrico, seus dipolos são polarizados no sentido do campo, o que faz com que o material tenha uma deformação interna e produza energia.

6.1 Constantes de materiais Piezoelétricos

Atualmente conhecemos cerca de 1000 materiais piezoelétricos, mas utilizamos uma pequena parte apenas. As constantes de alguns dos materiais mais relevantes estão na Tabela 1 abaixo.

| Material | d (10^{-12} m/V) | ϵ |
|--|-----------------------|------------|
| Piezoelétricos genuínos | | |
| Quartzo (SiO_2) | -2,3 | 4,5 |
| Turmalina | -3,7 | 6,3 |
| KDP (KH_2PO_4) | 21 | 40 |
| Ferroelétricos | | |
| Titanato de bário (BaTiO_3) | 390 | 2.900 |
| PZT ($\text{Pb}_{0,5}\text{Zr}_{0,5}\text{TiO}_3$) | 370 | 1.700 |

Tabela 2- Materiais Piezoelétricos Relevantes- Engenheiros de materiais

Para definirmos qual o melhor material que usaremos para um projeto ou análise de um dado, devemos levar em consideração alguns de seus aspectos piezoelétricos, como os seguintes:

- Constantes de tensão (V^*m/N): Mostra qual é a razão de seu valor de tensão, sobre sua força em uma distância de um metro.
- Constante de carga $d(m/V)$: Indica a diferença entre a forma e comprimento do material, em relação a tensão gerada no mesmo.
- Coeficiente de acoplamento (K): Esse define a qualidade do material piezo, e sua capacidade no ato da transdução. Isso é um fator de grande importância,

para saber se as cerâmicas piezoelétricas estão com sua função corretas, que é a geração de energia. O fator K deve ser próximo de zero, com finalidade de alta qualidade.

- Fator de verificação mecânica (Q): É usada como o nome diz, para verificar as perdas mecânicas do material, em relação a sua distorção, impacto e amortecimento.

- Temperatura de Curie (TC em °C): Também conhecido como ponto Curie, é o valor limite que a temperatura pode atingir sem danificar as características ferromagnéticas de um determinado material. Se a temperatura exceder a esse ponto o material sofre um dano que é irreversível. No caso das cerâmicas de PZTs, essa é definida em torno de 350°C.

Os materiais piezoelétricos compostos por cerâmica são seguidos por coeficientes dielétricos, físicos e piezoelétricos (eletromecânicas), o que resultam na polarização desses materiais. Falaremos um pouco das características físicas:

- Modulo de Young: Diz o grau de elasticidade de uma cerâmica, e está relacionada com a força aplicada, sobre a deformação resultante na direção da tensão.

- Compilância: é a deformação gerada por uma tensão mecânica, envolvendo uma elétrica de atuação. Essa é o inverso da rigidez dielétrica.

- Qualidade mecânica: indica a qualidade do material, como um oscilador harmônico. Está ligado a dimensão do material, e sua nitidez de peças ressonantes. Sua qualidade também está ligada à sua limitação de temperatura, que influi diretamente no desempenho do piezoelétrico.

- Fator de perda dielétrica: também é conhecida como perda tangencial, que relaciona a perda de resistividade do material, que é a diminuição de sentido dos dipolos polarizados.

6.1.1 Sobre característica mecânica de materiais

As cerâmicas piezoelétricas, são elementos que precisam ter uma boa resistência mecânica, ou seja, devem apresentar uma ductilidade boa, a fim de que tenha uma deformação precisa, quando essa for submetida a um esforço por uma força resultante, ou até mesmo resistir a elevada diferença de potencial aplicada, assim devem ser bem estruturais e cristalinas como materiais ferroelétricos. Sua deformação é reversível e está por volta de 0,1% da dimensão dos cristais.

A cerâmica Titanato Zirconato de Chumbo, PZT, se destaca por suas notáveis características piezoelétricas, sendo candidata a várias aplicações tecnológicas como transdutores, dispositivos ressonantes, entre outras, devido também a seu baixo custo e facilidade na fabricação (DESHPANDE, 1994).

6.1.2 Tratamento dos materiais

Para um piezo ter os seus polos desaparecidos, ele é aquecido até que se ultrapasse a sua temperatura Curie. Assim esse fica estruturado de forma centralizada, simetricamente. Após isso, é proporcionado a um campo elétrico, o qual deforma o cristal, que então desse jeito os dipolos ficam polarizados, conforme a figura 6. Em sequência ele é resfriado, dando um choque térmico, e os íons se direcionam em certo sentido do campo. Então esse é retirado, finalizando o tratamento. Mesmo depois do tratamento sem o campo, alguns dos átomos ficam polarizados remanescente, de forma permanente, assim tendo as características piezoelétricas.

Segundo a imagem:

- a** - Representa a orientação aleatória dos domínios dos polos;
- b** - após o campo ser aplicado, os polos são orientados em uma direção;
- c** - depois da remoção do campo ainda há uma polarização remanescente;

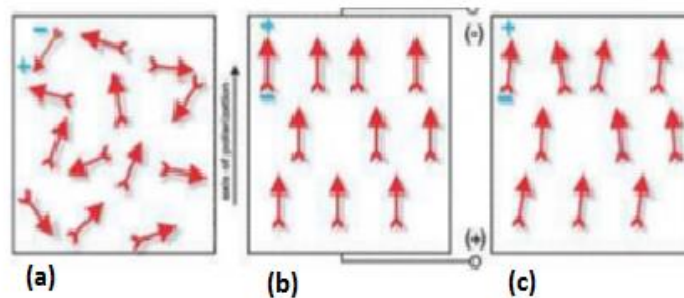


Figura 6- Orientação dos polos durante o processo de "poling"(GmbH&KG,2006).

6.1.3 Cerâmicas

Todos os materiais sofrem variações de sua dimensão, quando está imerso em um campo elétrico. Um dipolo de um piezo se encontra entre cátions e ânions na sua estrutura cristalina. Quanto às simetrias os cristais podem ser separados em 32 grupos, mas apenas 20 desses são piezoelétricos, por serem capazes de gerar correntes ao sofrer esforços.

As cerâmicas ferroelétricas apresentam uma alta constante dielétrica, e pouca perda, mas com uma alta resistividade, atua de forma não linear.

Os dispositivos não lineares captam energia sobre uma longa faixa de frequência, essas por meios das estruturas magnéticas. (Lallart et al,2010) busca uma maneira de utilizar o tratamento não linear para conversão de energia acústica. Eles consideram que efeitos de amortecimento e de alteração da frequência acústica pela conversão, melhora consideravelmente a largura da escala de frequência e aumenta a energia convertida.

6.2 Transdutores

Os transdutores são os materiais, que tem capacidade de converter uma forma de energia em outra. Como no caso estudado, temos transdutor piezo elétrico que transforma energia mecânica em elétrica, conforme já falado anteriormente. E de maneira reversa quando o material transforma energia elétrica em mecânica. De

forma curiosa esse tipo de material é amplamente usado em vários casos, como já área médica e de processos industriais.

Especificamente na medicina, os piezoelétricos são associados a transdutores ultrassônicos que geram imagens, e é usual em altas potências (processo médico e industriais).

Ele trabalha como se fosse um sensor ou atuador. Inserem em um corpo, sinais de ondas ultrassônicas, é recebem as mesmas novamente, assim convertendo o sinal em pulsos elétricos.

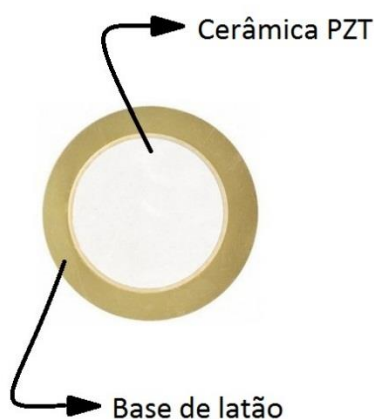


Figura 7- Transdutor piezoelétrico (autores)

6.3 Utilização da piezoeletricidade

Um dos grandes desafios da atualidade é encontrar uma forma de energia que essa seja limpa, ou seja, que não afete o meio ambiente e possa ser sustentável e renovável. A seguir iremos ver algumas das aplicações da piezoeletricidade como fonte de energia.

A França foi o pioneiro a utilizar essa energia nas calçadas das ruas (ISTOE,2016) , para acender a iluminação pública e semáforos, utilizando conforme pesquisa, 8 módulos com capacidade de geração de 60W. Já a Sustainable Dance Club, fez a primeira boate auto sustentável na Holanda (Portogente,2018), com uma simples pista de dança compostas por materiais piezo elétricos, as pessoas ao

dançarem, geravam essa forma de energia, assim mantendo a instalação do ambiente.

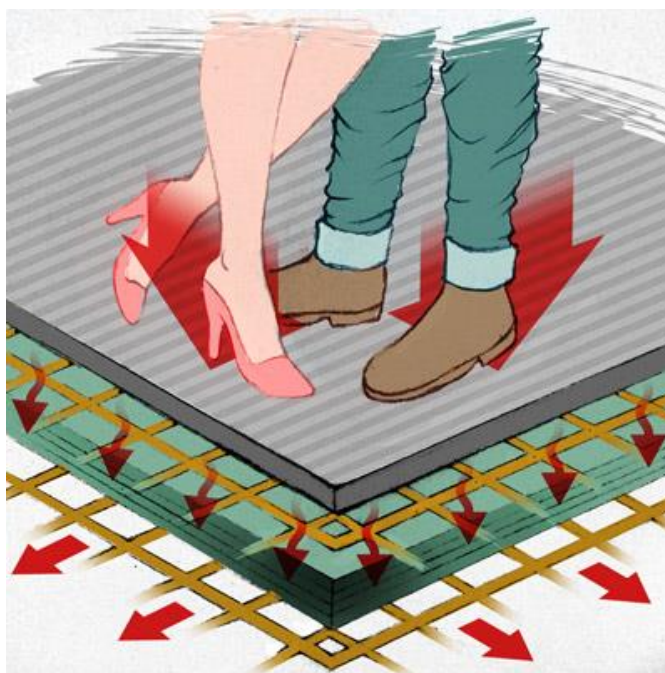


Figura 8– Pista de dança geradora de energia piezoelétrica (Swu,2011)

Como podemos ver, esses são uns dos exemplos de utilização, mas ainda há diferentes meios para usar a mesma, como em outros experimentos divulgados. Em um destes experimentos foram instaladas as pastilhas piezo em pneus, e conforme o carro andava, eles entravam em atrito com o asfalto e as pastilhas eram comprimidas e amortecidas pela borracha, onde sua energia era coletada através de capacitores e passada para o interior do veículo por um comutador. Também já foram usadas em linhas de trem, com o mesmo objetivo anterior. No Brasil embora não tenha muitos meios de aplicação da piezoelectricidade na atualidade, também entraram nas pesquisas, como é o caso dos professores da Unesp Walter Sakamoto e Maria Aparecida Zaghete, que ao estudar as estruturas desses materiais, perceberam que poderiam substituir a cerâmica dos PZTs por óleo de mamona, que seria um componente, mais viável por seu menor custo e também com boa eficiência, porém ainda não colocaram o projeto em prática por falta de apoio financeiro.

6.4 Módulo conversor

O sistema de eletrônica de potência, vem avançando cada vez mais, e é usualmente usado em projetos, instalações de equipamentos, na geração de diversos tipos de energia, fontes de dispositivos eletroeletrônicos. Com essa evolução temos alguns tipos de conversores, o qual iremos falar e sobre o conversor Buck, mais especificamente sobre o LTC3588, que é um dispositivo que compreende bastante eficiência no seu modo de conversão.

O Buck é da classe CC/CC, assim como o “Boost”, e o “Buck-Boost”, sua diferença é que o Buck é classificado como um tipo de conversor abaixador, que sua tensão de saída é inferior à da fonte. O “Boost” é denominado elevador, e esses conversores são um exemplo de fonte chaveada, que apresentam um diodo e um tiristor, ou os mais atuais representados por dois tiristores, também devem conter no seu interior um capacitor e indutor que fazem o controle da saída. O LTC3588, oferece alta eficiência energética, melhor outros tipos de reguladores lineares, pois esses além de retificarem, mantêm um controle na regulagem, e conseguem em sua saída um valor de corrente maior.

A função do LTC3588 é coletar o valor de energia potencial, transformá-la de AC/DC, posteriormente regulá-la para uma tensão menor intensificando a corrente na saída.



Figura 9- LTC3588 (Usinainfo, 2020)

Ele é composto por uma fonte retificadora e um conversor “*buck*” de alta eficiência, sendo assim uma solução completa para fontes de energia de alta

impedância, como a piezoelectricidade. Ele possui um modo “*ultra low*” de bloqueio de subtensão de corrente quieta (UVLO), permitindo que a carga se acumule no capacitor de entrada até o conversor “*Buck*”, fazendo com que ele possa transferir de forma eficiente a carga armazenada para saída. O diagrama de blocos do módulo (figura 10) ilustra bem seu funcionamento.

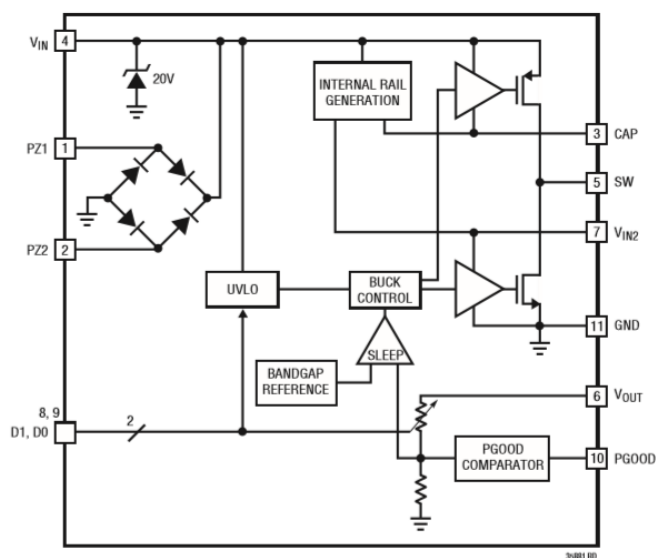


Figura 10- Diagrama de blocos do LTC3588 (Datasheet LTC3588,2010)

Levando em consideração o estudo teórico, e tendo como base que o conversor é ideal, ou seja, ele não apresenta perda de energia. E como dito anteriormente ele tem diodos e tiristores, que quando estão em condução não apresentam variação na sua tensão, e quando estão no estado aberto sua corrente é nula, sua mudança de estado é de forma instantânea. Os mais usados atualmente se tornam possível chegar a um rendimento superior a 90%, apresentando apenas perdas na potência que impedem a máxima frequência comutação. Com um valor de tensão de entrada o conversor “*Buck*”, faz a limitação dessa tensão referindo uma menor tensão na saída, e com seus controladores podendo fazer os ajustes do valor emitido de corrente na saída. Quando se é trabalhado com valores altos de frequência, ocorre uma diminuição nos valores reativos necessários para o circuito, o que reduz também o custo de projeto.

6.4.1 Ponte retificadora interna

O módulo é composto de uma ponte retificadora que se referem os pinos PZ1 e PZ2, os quais transformam a corrente alternada proveniente dos transdutores piezoelétricos, em corrente contínua. A saída do retificador pode ser conectada a um capacitor em V_{in} , para ser utilizado como armazenamento para o conversor Buck. Demonstrado na figura 11.

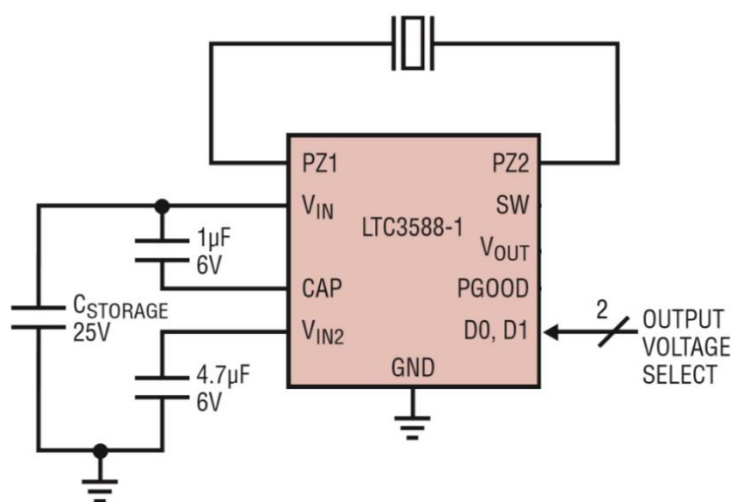


Figura 11- Representação da ligação do capacitor LTC3588 (Datasheet LTC3588,2010, modificado pelos autores,2020)

6.4.2 Undervoltage Lockout (UVLO)

O UVLO é a tensão determinada para o sistema funcionar corretamente. Quando a tensão em V_{in} ultrapassa o UVLO, o conversor Buck é habilitado e a carga é transferida do capacitor de entrada para o capacitor de saída. Quando a tensão abaixar de 300mV da tensão selecionada, o UVLO desabilita o conversor buck, protegendo assim o equipamento selecionado.

6.4.3 Internal Rail Generation

Existem dois barramentos no módulo LTC3588, os quais selecionam qual será a tensão de saída (V_{out}), esses barramentos são o CAP e V_{in2} . A seleção é feita por capacitores ligando os barramentos a V_{in} , sendo que V_{in2} é regulado para 4,8V acima do GND e o CAP é regulado para 4,8V abaixo do GND.

6.4.4 Regulador Buck

Quando a tensão de entrada é diminuída pelo transistor, a tensão na saída se torna quase que constante, devido uma ação do capacitor de saída, com isso, a corrente na saída tem uma ondulação quase que nula, pois também é uma forma contínua. O transistor em seu estado de condução, faz a passagem de corrente para o indutor, enquanto isso o diodo permanece no estado de corte, e simultaneamente a energia retida no indutor, irá carregar o capacitor e alimentara a carga. O processo do armazenamento do capacitor é representado pela figura 12, onde é realizado através da diferença instantânea da corrente do indutor pela da carga, enquanto a do Indutor (L) for maior, ele irá guardar energia, já o processo de descarregamento é o inverso do falado anteriormente, assim como a tensão é considerada constante, ele manterá a corrente na carga também nesse nível. A corrente da carga nesse tipo de conversor, pode apresentar baixa ondulação, devido os posicionamentos dos transistores no circuito, enquanto a de entrada está com grande frequência. Pode ser necessário capacitores na entrada, para uma melhor segurança e qualidade da fonte, e caso a corrente passada pelo indutor não for nula, durante a segunda etapa que é a condução do diodo, então o funcionamento do circuito está trabalhando de modo contínuo, com um controle mais eficaz entre a tensão da carga e a largura de pulso. A escolha do nível de tensão regulada na saída, é definida através da combinação de pulsos indicados na tabela 3.

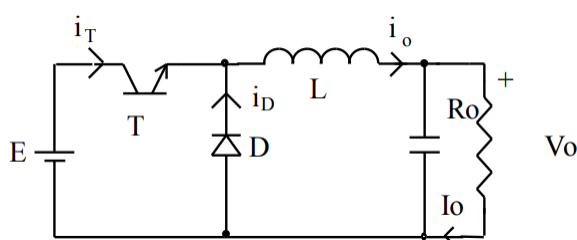


Figura 12- Circuito conversor Buck (Datasheet LTC3588,2010)

| Output Voltage Selection | | | |
|--------------------------|----|------------------|---|
| D1 | D0 | V _{OUT} | V _{OUT} QUIESCENT CURRENT (I _{VOUT}) |
| 0 | 0 | 1.8V | 44nA |
| 0 | 1 | 2.5V | 62nA |
| 1 | 0 | 3.3V | 81nA |
| 1 | 1 | 3.6V | 89nA |

Tabela 3– Seleção de tensão de saída LTC3588 (Datasheet ltc3588,2010)

6.5 Armazenadores de energia

Elementos armazenadores, são componentes e dispositivos que tem em uma sua estrutura interna, materiais que tem a capacidade de armazenar energia elétrica, com a finalidade de reaproveitar essa em um processo, no caso desses componentes, temos os indutores, pilhas ou baterias e os capacitores. Para fins de nosso projeto iremos utilizar as pilhas recarregáveis e capacitores simples para armazenar as cargas em cada ciclo. Porém o necessário teoricamente e ideal, seria os super capacitores, devido a sua melhor facilidade em reter a energia do circuito com grande eficiência.

Outro ponto importante para a utilização de armazenadores de carga, é quando em um sistema acontece uma falta de energia, e esses podem ser inseridos ao circuito instantaneamente por meio a uma chave de seccionamento. Assim reestabelece e mantém o sistema ativo, e isso é muito útil e necessário, pois vários projetos e situações precisam da alimentação continuamente.

Dentre essas formas de captação de energia citadas anteriormente, sabemos que as pilhas e baterias estão classificadas no método eletroquímico, já os capacitores no elétrico. Com isso temos as diferenças que iremos comentar nos tópicos seguintes.

6.5.1 Pilhas e baterias

As pilhas/baterias são capazes de transformar a energia química em elétrica, ou ao contrário, através de reações químicas entre os materiais usados nesse processo. Esses componentes mantém uma diferença de tensão entre os seus extremos, que apresenta o lado do polo positivo chamado catodo e o negativo anodo,

são os tipos de fontes eletromotrizes, pois elevam os valores de cargas contínuas que passam entre seus polos. A pilha galvânica apresenta dois eletrodos de materiais distintos, que são inseridos em um meio com íons e separados por uma membrana porosa de material isolante, com o intuito de separar as substâncias que sofrem a redução no caso da positiva e a oxidação da negativa. Após isso, esses materiais são interligados fechando assim um circuito independente, que geram o fluxo de corrente e conseqüentemente o carregamento de energia.

A capacidade de uma bateria é indicada pela sua potência, e o modo que seu processo de armazenamento e descarga é feito, pode afetar o seu tempo de vida, além da temperatura que é exposta e o circuito que a mesma está alimentando, ou seja, antes de conectar uma bateria ao circuito, tem que ser feito o dimensionamento do mesmo, para verificar se ela vai atender a demanda necessária ou se o sistema irá pedir muito dela. Por isso deverá ser verificado o ciclo de uma bateria que é definido pelo tempo que ela demora a carregar e a descarregar assim como qualquer outro armazenador. Esse ciclo da bateria é indicado conforme figura 13. As principais baterias usadas são a de chumbo ácido (Pb), íons de lítio (Li) e níquel-cádmio(NiCd).

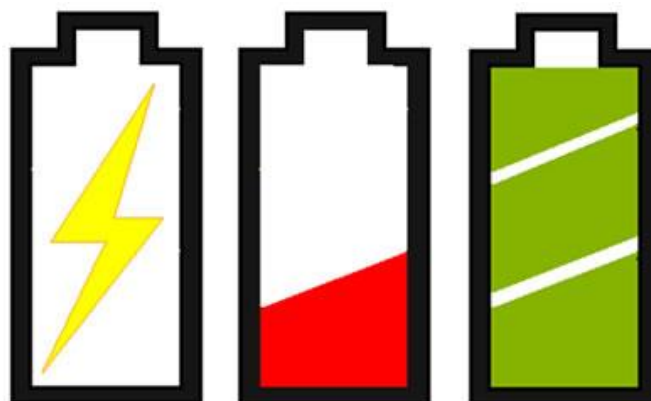


Figura 13- Sistema de carregamento de bateria, acúmulo de energia
(conhecimentocientifico,2020)

6.5.2 Capacitores

Os capacitores são dispositivos eletroeletrônicos reativos que armazenam as cargas elétricas quando estão dispostos em um circuito de malha fechada, o qual

acumula a energia emitida por uma fonte. Os capacitores são formados por dois condutores, chamados de armaduras ou placas e entre essas apresenta um material dielétrico, que mantém o isolamento entre esses condutores que são polarizados com cargas opostas, uma positiva e outra negativa. Conforme ilustra figura 14. Esses armazenadores podem ser de cerâmica, mica, eletrolítico e outros, que são o material apresentado no dielétrico de cada um. Quando está em um circuito de malha fechada e ocorre a passagem de corrente pelo capacitor, se encontra no regime transitório, ele funciona como por exemplo um interruptor fechado, assim recebe toda a corrente do circuito, essa gera um campo eletroestático, fazendo assim o carregamento das cargas, que são retidas na superfície das placas positivas e as negativas na placa polarizada negativamente.

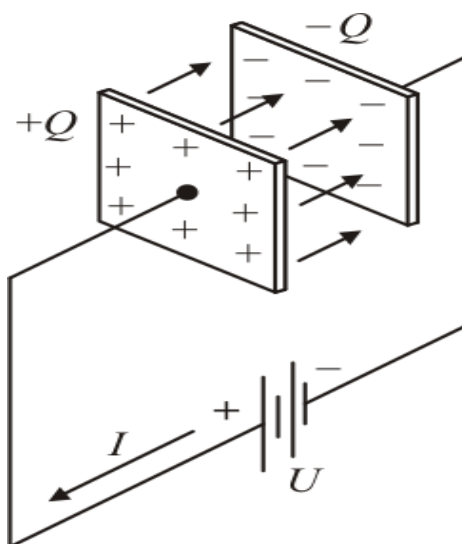


Figura 14- Representação do capacitor(obaricentrodamente.com, 2013)

Quando esses são totalmente carregados e a fonte de alimentação é retirada, ele funciona como uma chave aberta, assim toda sua energia acumulada é descarregada no circuito. O tempo de carregamento e descarregamento pode ser controlado através da introdução de um resistor em série com o capacitor. Denominada constante RC, dita pela fórmula $\tau = r \cdot c$ A capacidade desses dispositivos de armazenar carga é chamada de capacitância, é definida pela fórmula:

$$C = Q/V$$

C = capacitância, sua unidade é Farad (F).

Q = cargas elétricas, sua unidade é Coloumb (C).

V = tensão, sua unidade é Volt (V).

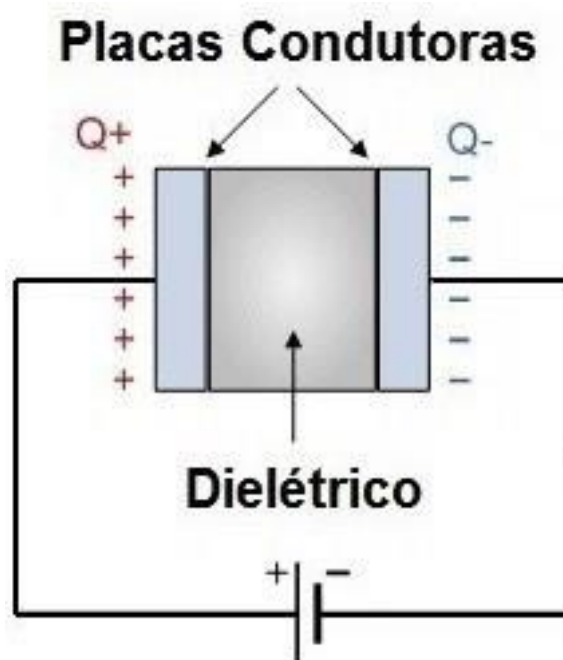


Figura 15- Acúmulo de cargas do capacitor (Sabereletrica,2018)

A sua capacitância está diretamente ligada à área das armaduras, quanto maior, mais ela armazena. No caso dos capacitores eletrolíticos, eles apresentam o seu material dielétrico bem mais fino que os demais, e uma eficiência melhor, além disso também são polarizados, seus polos têm uma demarcação da parte que deve ser ligado o positivo e o negativo.

Os capacitores apresentam uma vantagem em relação quanto ao uso da bateria, que é a velocidade do seu ciclo de alimentar o circuito, e quanto ao seu uso em diferentes tipos de circuitos e equipamentos obtendo outras funções específicas como filtrar um sinal.

Os super capacitores tem em seu dielétrico uma solução eletrolítica e apresentam uma densidade bem maior que os capacitores convencionais, sua eficiência é claramente visível, quanto ao seu ciclo de carga e descarga, bem mais rápido e atuam também em altas frequências, mas a sua grande desvantagem é o

seu alto custo, assim a escolha do mesmo no mercado ainda é limitada, mas para sistemas que necessitam dessa característica, como é o caso da energia piezoelétrica, se torna fundamental o seu uso.

- Fórmulas de Corrente e Tensão de Capacitores

$$I = C \frac{dv}{dt}$$

$$v = \frac{1}{C} \int i dt$$

Sendo:

C= Capacitância em Farad

Dv= variação de tensão

Dt= variação de tempo

6.5.2 Indutores

O indutor é um componente formado por um enrolamento de espiras de um material condutor sobre um núcleo magnético, assim quando esse é conectado a um circuito e recebe corrente de uma fonte alimentadora, gera-se uma força eletromotriz induzida e cria um campo magnético que atrasa a corrente em 90° em relação a tensão, essa corrente também é induzida e assim faz o armazenamento de energia. A capacidade desse elemento de armazenar cargas é chamada de indutância, representada pela letra “L” com unidade em (H) Henry, assim como no capacitor também é uma energia reativa. O material escolhido para usar em seu núcleo tem grande influência, pois dependendo de qual for esse, o fluxo de carga é elevado, também pode ser aumentando com o acréscimo de espiras.

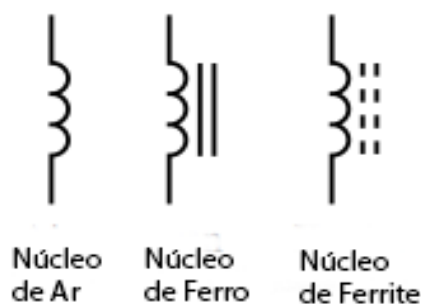


Figura 16- Simbologia do indutor (sintoniafinadotcom, editado pelos autores,2020)

Os indutores como ditos anteriormente, podem apresentar em seu núcleo diferentes tipos de materiais e esses são definidos através do seu objetivo, seja ele chegar a valores mais elevados de frequência, circuitos de controle de corrente, valores específicos da indutância. Os mais usuais são esses conforme figura 17.



Figura 17- Tipos de núcleo de indutores (mundodaeletrica,s.d)

Assim como qualquer outro componente reativo, o indutor não é considerado ideal, portanto apresentará perdas devido aos seus materiais de composição, como as perdas de indutância devido ao seu tempo de vida útil, perdas por correntes parasitas e histerese, que é definida pela perda no seu campo e núcleo respectivamente.

- Fórmulas das correntes e tensões induzidas em um indutor

$$V_L = L \frac{di}{dt}$$

$$i_L = \frac{1}{L} \int v dt$$

Sendo:

L= indutância em Henry

i_L= corrente induzida

v_L= tensão induzida

7 EXPERIMENTOS

Com o intuito de colocar em prática o estudo realizado durante nosso projeto. Vamos confeccionar e representar a geração da energia piezoelétrica, por meios ao conjunto de diversas pastilhas, iremos demonstrar a capacidade de geração e sua viabilidade. A extração da energia piezoelétrica será representada nos testes comentados nesse capítulo. Dentre esses temos os de malha aberta e os de malha fechada para fundamentar nossos resultados.

- Medição de tensão/peso em um transdutor;
- Elaboração do protótipo Piso Gerador de Energia;
- Teste de geração somente do Piso;
- Construção do circuito regulador e armazenamento;
- Teste de geração regulada e armazenada.

7.1 Medição de tensão/peso em um transdutor

Neste teste visamos estudar a capacidade e a eficiência do transdutor piezoelétrico em gerar energia com diferentes materiais e observando a geração de tensão por força empregada. Nos testes utilizamos compensado de madeira, o qual não era tão eficiente, pois limitava a tensão do transdutor após 2 Kg, assim mantendo ela constante, portanto foi necessário utilizar um material para amortecimento, então usamos em outro teste uma camada de EVA de 1,5mm o que resultou num aumento gradual da tensão com o aumento do peso.

Com esses dois testes, conseguimos os seguintes resultados conforme Tabela:

| Peso (Kg) | S/ Amortecimento (V) | C/ Amortecimento (V) |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 11 | 25 |
| 2 | 16 | 32 |
| 3 | 15,38 | 34,7 |
| 4 | 16,1 | 36 |
| 5 | 16,5 | 38,2 |

Tabela 4 – Resultado dos testes de geração de energia com e sem amortecimento (autores,2020)

Concluimos que com o EVA servindo de base, o transdutor é sujeito a uma maior deformação em sua área de acordo com a compressão exercida pelo peso atuante. Sendo assim mais eficiente com a geração de tensão relacionada a força e deformação do material.

Os testes foram feitos com uma Balança de precisão conforme mostrado na figura 18.



Figura 18- Balança com amortecimento (autores, 2020)

7.2 Elaboração do protótipo Piso Gerador de Energia

Para construirmos o piso utilizamos os seguintes materiais:

| Material | Quantidade | Preço |
|-------------------------------|-----------------|------------------|
| Transdutor Piezoelétrico 35mm | 100 uni | R\$89,00 |
| Placa de madeira 60x60cm | 2 uni | R\$30,00 |
| Cabo colorido 0,5mm | 10m | R\$3,60 |
| Manta de borracha 5mm | 1m ² | R\$50,00 |
| EVA 1,5mm | 1m ² | R\$10,00 |
| Fita adesiva dupla face | 2 uni | R\$34,00 |
| Estanho de solda | 2 uni | R\$5,00 |
| Protoboard | 1 uni | R\$22,00 |
| Suporte de ferro | 1 uni | R\$60,00 |
| Pilha recarregável AAA | 2 uni | R\$15,29 |
| Conversor Buck LTC 3588 | 1 uni | R\$140,00 |
| - | Total | R\$458,89 |

Tabela 5 – Lista de materiais e preço (autores,2020)

Desenvolvimento do protótipo, figuras 19 e 20.



Figura 19- Fios pré soldagem (autores, 2020)



Figura 20- Pastilhas pós soldagem (autores, 2020)

Com a as pastilhas soldadas iniciou-se a montagem da espuma amortecedora, com o objetivo de aumentar a eficiência da geração. Foi colada uma camada de EVA 1,5mm acima do compensado de madeira, conforme ilustra figura 21.

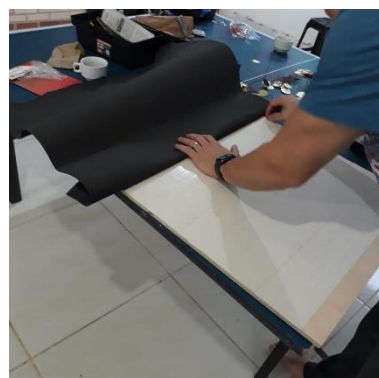


Figura 21- Instalação da manta amortecedora (autores, 2020)

Com a ajuda de um Vazador manual e uma marreta foi fabricado 100 botons de borracha de 5mm par servir de espaçador para que a placa superior não tivesse contato com as soldas das pastilhas conforme figuras 22 e 23.



Figura 22- Fabricação dos botons de borracha 01 (autores, 2020)



Figura 23- Fabricação dos botons de borracha 02 (autores, 2020)

Após colado a espuma de amortecimento, foi disposto as pastilhas uniformemente sobre a placa aproveitando ao máximo o espaço disponível, para posteriormente ajustar o encaminhamento dos cabos de ligação, conforme figuras 24 e 25.

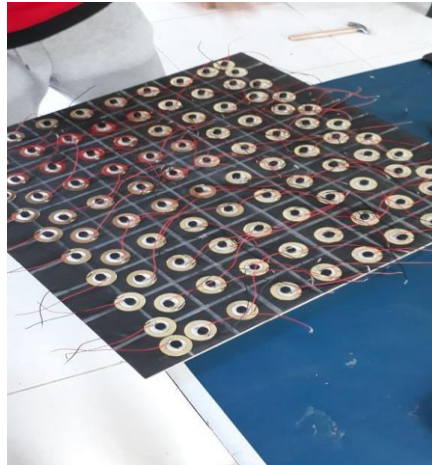


Figura 24- Posicionamento das pastilhas (autores, 2020)

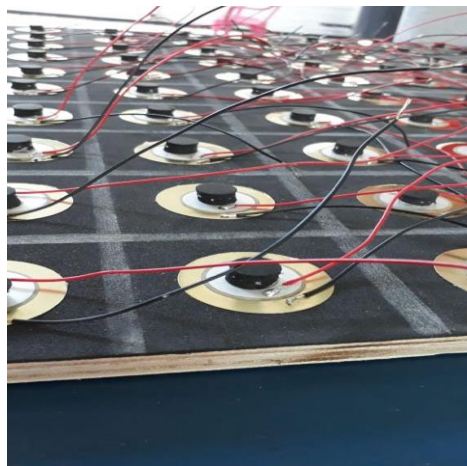


Figura 25- Posicionamento das pastilhas 02 (autores, 2020)

Foram realizados vários testes para identificar qual a melhor configuração para as pastilhas (série ou paralelo) até chegar na configuração final, 20 paralelos em 5 séries, ilustrada na figura 26 e demonstrada na figura 27.

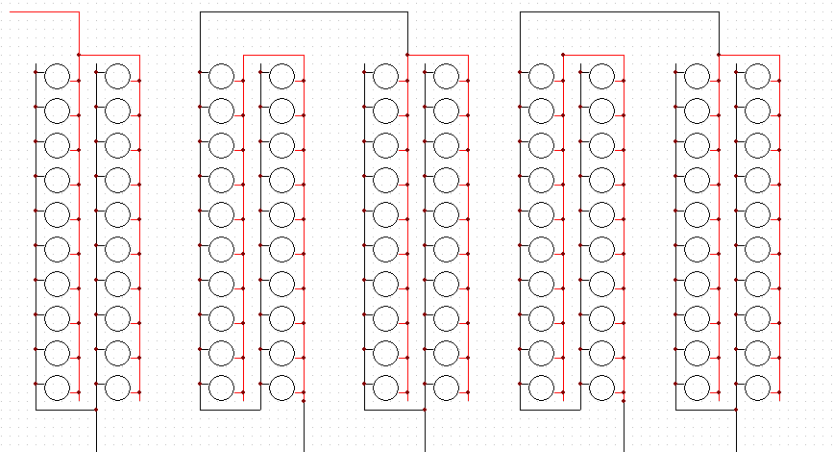


Figura 26- Diagrama de configuração do piso gerador (autores, 2020)



Figura 27- Interno do piso gerador (autores, 2020)

7.3 Teste de geração somente do Piso

Na primeira fase de testes medimos a capacidade de geração unicamente do piso, antes da montagem dos componentes de regulação e armazenamento de tensão.

Para tensão, conseguimos os seguintes valores de pico conforme mostrado nas figuras 28 e 29.



Figura 28- Geração de pico de tensão positivo malha aberta (autores, 2020)



Figura 29- Geração de pico de tensão negativo malha aberta (autores, 2020)

Os valores encontrados foram $V_{ACpp}=40,39V$ e $V_{ACpn}=-34,20V$, notamos que o pico positivo se dá quando as pastilhas são pressionadas e o pico negativo se dá na descompressão.

Para a corrente em malha fechada, adicionamos as duas pilhas AAA como expressa na figura 30 e conseguimos os seguintes valores de pico em mA conforme as figuras 31 e 32.



Figura 30- Pilhas AAA em série (autores, 2020)



Figura 31- Geração de pico de corrente positiva malha fechada (autores, 2020)



Figura 32- Geração de pico de corrente negativo malha fechada (autores, 2020)

Os valores encontrados foram $IAC_{pp} = 11,87 \text{ A}$ e o $IAC_{pn} = -5,43 \text{ A}$, e da mesma forma que a tensão, o pico positivo se dá quando as pastilhas são pressionadas e o pico negativo se dá na descompressão.

7.4 Construção do circuito regulador e armazenamento

Após a confecção do piso, utilizamos um regulador de tensão LTC3588 para que ela estabilizasse em 3,5V, sendo que as pilhas de armazenamento necessitam de 2,5V para que se recarreguem.

Segue abaixo na figura 33, a montagem do sistema de regulação e armazenamento.

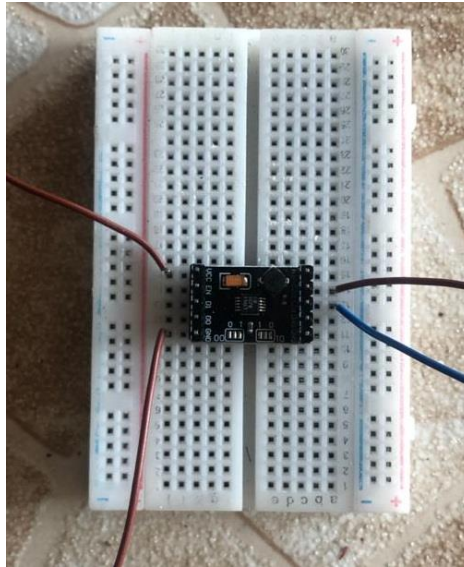


Figura 33- Conversor BUCK LTC3588 (autores, 2020)

7.5 Teste de geração de energia regulada e armazenada.

Após a confecção do sistema de regulação e armazenamento, conectamos o piso gerador nas entradas PZ1 e PZ2 do LTC3588, e na saída VCC e GND conectamos as pilhas AAA para armazenagem conforme ilustra a figura 34.

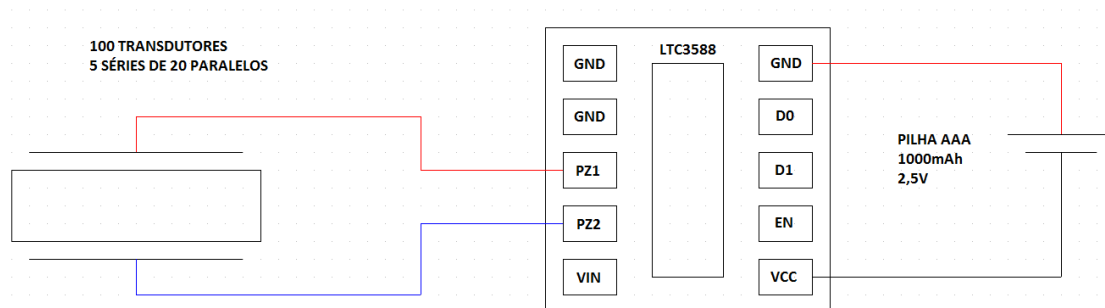


Figura 34- Diagrama de ligação do protótipo (autores, 2020)

No primeiro teste medimos a tensão regulada na saída VCC e GND do conversor sem se conectar as pilhas, com isso conseguimos a tensão de 3,5V, mostrada na figura abaixo, tensão essa coerente com o datasheet do regulador.



Figura 35- Tensão regulada pelo LTC3588 (autores, 2020)

No segundo teste, conectamos as pilhas e fizemos a medição da corrente em malha fechada. Obtivemos 1mA de corrente regulada conforme figura 36.

Ao contrário das fontes de alimentação e das baterias, que possuem baixa impedância interna (sendo medida em $m\Omega$), a impedância do elemento piezelétrico é bastante elevada (sendo medida em $M\Omega$). Dessa forma, a alta impedância interna restringe a corrente de saída do PZT na faixa de microampères (RAMADASS, 2010)



Figura 36- Corrente regulada pelo LTC3588 (autores, 2020)

No terceiro teste, simulamos a circulação de pessoas piso e monitoramos o carregamento das pilhas.

Inicialmente as pilhas estavam com 0,844V de carga remanescente e após iniciarmos a simulação, levou-se 6 minutos para que a tensão de carga atingisse 0,912V, com isso carregamos 0,068V.

7.6 Projeção dos resultados obtidos

Conforme dados obtidos no subtítulo 7.5, elaboramos duas tabelas que projetam a geração de energia com um piso (tabela 6) e outra tabela com dez pisos (tabela7). Levando em consideração que o tempo estipulado em 0,1 em horas se refere a 6 minutos.

| Sistema com 1 piso | | | |
|--------------------|-----------|-------------|-------------|
| Tempo (dias) | Tempo (h) | Corrente(A) | Potência(W) |
| 0,004 | 0,1 | 0,001 | 0,000068 |
| 0,042 | 1 | 0,001 | 0,00068 |
| 0,5 | 12 | 0,001 | 0,00816 |
| 1 | 24 | 0,001 | 0,01632 |
| 2 | 48 | 0,001 | 0,03264 |
| 3 | 72 | 0,001 | 0,04896 |
| 4 | 96 | 0,001 | 0,06528 |
| 5 | 120 | 0,001 | 0,0816 |
| 6 | 144 | 0,001 | 0,09792 |
| 7 | 168 | 0,001 | 0,11424 |
| 8 | 192 | 0,001 | 0,13056 |
| 9 | 216 | 0,001 | 0,14688 |
| 10 | 240 | 0,001 | 0,1632 |

Tabela 6- Sistema com um piso (autores,2020)

| Sistema com 10 pisos | | | |
|----------------------|-----------|-------------|-------------|
| Tempo (dias) | Tempo (h) | Corrente(A) | Potência(W) |
| 0,004 | 0,1 | 0,01 | 0,0068 |
| 0,042 | 1 | 0,01 | 0,068 |
| 0,5 | 12 | 0,01 | 0,816 |
| 1 | 24 | 0,01 | 1,632 |
| 2 | 48 | 0,01 | 3,264 |
| 3 | 72 | 0,01 | 4,896 |
| 4 | 96 | 0,01 | 6,528 |
| 5 | 120 | 0,01 | 8,16 |
| 6 | 144 | 0,01 | 9,792 |
| 7 | 168 | 0,01 | 11,424 |
| 8 | 192 | 0,01 | 13,056 |
| 9 | 216 | 0,01 | 14,688 |
| 10 | 240 | 0,01 | 16,32 |

Tabela 7- Sistema com dez pisos (autores,2020)

De acordo com nossos experimentos foi verificado que em 10 dias acionando uma placa continuamente 24 horas por dia, obteríamos 163,2 mW e se implementássemos um sistema de 10 placas sendo elas também acionadas em um regime igual ao anterior, gerariamos uma potência de 16,32W. A configuração adotada para as 10 placas é em paralelo. Sabendo-se que também, o valor da tensão no final de cada dia é um valor teórico acumulado, assim não se refere ao valor de tensão armazenado na pilha.

8 APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO

O piso gerador de energia pode ser instalado nas mais diversas áreas de circulação de pessoas, seja numa academia, em uma sala de dança ou em ruas e calçadas, de preferência em lugares movimentados. Como exemplo, pode-se instalar em uma área de grande circulação de um shopping, como o hall de entrada, tendo em vista que é uma área grande e de livre circulação de pessoas e que não tem atrativos para que elas fiquem paradas, ao se deslocarem em buscas de suas compras estariam gerando energia. Conforme pode-se ver na tabela 6, em uma área de 100 m² utilizou-se 276 pisos com uma área ativa de 35% do espaço, que teria o potencial de gerar 96,6 mAh, recarregando uma pilha de 1000mAh em 10'21". Obviamente que não é um rendimento atrativo devido à baixa capacidade de geração de energia encontrada no protótipo construído, porém, com mais estudos sobre materiais com mais eficiência de geração, pode-se no futuro tornar a iluminação do hall do shopping auto suficiente em energia elétrica.

| Projeção de Geração por Área | |
|------------------------------------|----------------------|
| Área útil | 100,00m ² |
| Área da placa | 0,36m ² |
| Quant. De placas | 276 |
| Amph de uma placa | 1,00mAh |
| Área Ativa (%) | 35,00% |
| Amph gerado | 96,60mAh |
| Tempo de carregamento de uma pilha | 10,35h |

Tabela 8- Projeção de Geração (autores,2020)

9 CONCLUSÃO

Analisando os dados obtidos dos experimentos de geração pelo piso, concluímos que a utilização de transdutores PZT's ainda é inviável por ser necessário elevar bastante a escala do projeto para conseguirmos uma geração significativa. Ao levarmos em consideração uma maior área, maior é o número de pisos, e com isso os custos do projeto aumentariam, tornando-se insustentável suprir a demanda energética dos ambientes.

Com a implementação do conversor BUCK, o circuito melhorou sua capacidade de reter carga, pois conseguimos um valor de tensão constante devido a sua regulagem, além do tempo de carga diminuir. Mas mesmo com o BUCK, o resultado obtido ainda seria inferior ao esperado.

Por ser tratar de um sistema que gera baixa potência, e de pouca capacidade de armazenamento, o retorno esperado do projeto ao ser implementado seria de muitos anos. A energia piezoelétrica ainda necessita de estudos mais a fundo, além de investimentos em formas de captação e armazenagem para que possa amenizar os custos e obter uma melhor aplicabilidade.

Como sugestão para futuras pesquisas, sugerimos investir em um material piezoelétrico que possa substituir os transdutores comerciais por um material que tenha um melhor rendimento. Uma forma de amenizarmos a ineficiência dos PZT's seria adicionar transdutores sobrepostos no mesmo piso, com tudo essa é uma solução a se validar para gerar energia em uma menor área.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGUSTO BISQUOLO, PAULO. **Capacitores: Capacitores armazenam energia elétrica.** Santos, São Paulo: Educação Uol, 2009. Disponível em: <<https://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/capacitores-capacitores-armazenam-energia-eletrica.htm?cmpid>> Acesso em 19 de outubro de 2020.

DSEE, DANIEL DOTTAS. **UNICAMP: Capacitores e indutores.** Trabalho Acadêmico-Universidade Estadual de Campinas, sem data. Disponível em: <http://www.dsee.fee.unicamp.br/~dotta/index_files/CapacitoresIndutores_7.pdf> Acesso em 25 de outubro de 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Matriz Energética e Elétrica. **EPE GOV.** Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em 25 de abril de 2020.

Fellipe Saldanha Garcia, “Conversores CC-CC elevadores de tensão, não isolados, com ganhos estáticos elevados”, Dissertação de mestrado, FEEC – Unicamp, 13 de agosto de 2010. Acesso em 07 de setembro de 2020.

FERNANDES, Viviane; MARTENDAL, Caroline. Cristais piezoelétricos. **ENGENHEIRO DE MATERIAIS.** Disponível em: <<http://engenheirodemateriais.com.br/2016/03/09/cristais-piezoelétricos/>>. Acesso em 16 de abril de 2020.

JULIÃO. André. Energia limpa sob nossos pés. **ISTOÉ.** Disponível em: <https://istoe.com.br/73214_ENERGIA+LIMPA+SOB+NOSSOS+PES/>. Acesso em 5 de maio de 2020.

KILHIAN, KLEBER. **Um pouco sobre capacitores.** Obaricentrodamente. Rio de Janeiro, 29 de agosto de 2013. Disponível em: <<https://www.obaricentrodamente.com/2013/08/um-pouco-sobre-capacitores.html>> Acesso em 15 de outubro de 2020.

LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. Nanopower Energy Harvesting Power Supply. In: **Analog**, nº 1630. Milpitas, McCarthy Blvd, 2010. Disponível em <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/35881fc.pdf>>. Acesso em 07 de setembro de 2020

MECÂNICA INDUSTRIAL. O que é um sensor piezoelétrico. **MECÂNICA INDUSTRIAL.** Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/634-o-que-e-um-sensor-piezoelétrico/>>. Acesso em 5 de junho de 2020.

MUNDODAELETRICA. **Capacitor eletrolítico funcionamento e aplicações.** Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/capacitor-eletrolítico-o-que-e-funcionamento-aplicacoes/>> Acesso em 20 de outubro de 2020

MUNDODAELETRICA. **O que é um indutor.** Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-um-indutor/>> Acesso em 24 de outubro de 2020

NAGAMINE, Luiz. Física dos materiais. **USP**. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1122298/mod_resource/content/1/FMT0502_Aula_7deabril.pdf>. Acesso em 1 de junho de 2020.

OLIVEIRA, GLEYSON. **Entenda o funcionamento de capacitores**. Saber Elétrica, 2015. Disponível em: <<https://www.sabereletrica.com.br/entenda-o-funcionamento-dos-capacitores/>>. Acesso em 20 de outubro de 2020

PERILO, BRUNA. **Eletrólise**. Conhecimento Científico. São Paulo, 15 maio de 2020. Disponível em: <<https://conhecimentocientifico.r7.com/eletrolise/>>. Acesso em 15 de outubro de 2020

PERLINGEIRO, Antônio; PIMENTA, Gilberto; SALVIANO Evaristo. **Geração de Energia através de materiais piezoelétricos**. 2016. 62f. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. 2016.

PORTOGENTE. Piezeletricidade: a geração de energia elétrica do futuro. **PORTOGENTE**. Disponível em: <<https://portogente.com.br/portopedia/99788-piezeletricidade-a-geracao-de-energia-eletrica-do-futuro>>. Acesso em 19 de junho de 2020.

SANTOS, Márcia. **Processamento e características piezoelétricas de cerâmicas utilizadas em transdutores eletroacústicos**. 2005. 171f. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2005.

SUPRATIK, Datta. Materiais piezoelétricos: orientação de cristal e direção de polimento. **COMSOL Blog**. Disponível em: <<https://br.comsol.com/blogs/piezo-electric-materials-crystal-orientation-poling-direction/>>. Acesso em 20 de abril de 2020.

UNICENTRO. Grupo de Física Aplicada em Materiais – GFAMa. **UNICENTRO**. Disponível em: <<https://sites.unicentro.br/wp/gfama/estruturas-perovskita/>>. Acesso em 06 de setembro de 2020.

USINAINFO. Energy Harvester LTC3588 / Gerenciador de Carga Nano para Painel Solar e Energia Piezoelétrica. Em **Usinainfo**, nº2183, R. Marechal Floriano, s/data. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/controladores-de-carga/energy-harvester-ltc3588-gerenciador-de-carga-nano-para-painel-solar-e-energia-piezoelétrica-4985.html?search_query=LTC3588+%2F&results=1>. Acesso em 07 de setembro de 2020.

VIEIRA, Renato. Conhecendo a Piezeletricidade Uma Nova Forma de Geração de Energia Elétrica. **NÚCLEO DO CONHECIMENTO**. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/geracao-de-energia-eletrica>>. Acesso em 1 de maio de 2020.

VILARINHO, Leonardo. **Materiais Piezoelétricos**. 2013. 18f. Monografia – Universidade Federal do Pará, 2013.

WIKIPEDIA. **Piezeletricidade**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Piezo_eletricidade>. Acesso em 25 de abril de 2020.