

**REDE DOCTUM DE ENSINO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CARATINGA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO PIEZOELÉTRICO PARA A GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

SINÉZIO ROSA RDRIGUES

Trabalho de Conclusão de Curso

Caratinga/MG

2016

SINÉZIO ROSA RDRIGUES

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO EFEITO PIEZOELÉTRICO PARA A GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso Superior de Engenharia Elétrica do Instituto Tecnológico de Caratinga da DOCTUM Caratinga como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Professor Orientador: Robson da Silva.

Caratinga/MG

2016

TÍTULO DO TRABALHO

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM PASTILHAS PIEZOELÉTRICA PZT-4

Nome completo do aluno: SINÉZIO ROSA RODRIGUES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado perante a Banca de Avaliação composta pelos professores Robson Da Silva, Guilherme Cassimiro De Araújo Borges e Reginaldo Eustáquio, às 19:35 horas do dia 15 de dezembro de 2016, como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica. Após a avaliação de cada professor e discussão, a Banca Avaliadora considerou o trabalho: Aprovado (aprovado ou não aprovado), com a qualificação: Ótima (Excelente, Ótima, Bom, Satisfatório ou Insatisfatório).

Trabalho indicado para publicação: () SIM () NÃO

Caratinga, 15 de dezembro de 2016

Robson da Silva

Professor Orientador e Presidente da Banca

[Assinatura]
Professor Avaliador 1

Reginaldo Eustáquio
Professor Avaliador 2

Sinézio Rosa Rodrigues
Aluno(a)

[Assinatura]
Coordenador(a) do Curso

Porque a sabedoria deste mundo é loucura diante de Deus 1 Coríntios 3:19

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por esse sonho alcançado, e a minha família e amigos por todo apoio.

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível”

(CHARLES CHAPLIN)

RODRIGUES, Sinézio. **Geração de energia elétrica com pastilhas piezoelétrica PZT-4.** Caratinga, 2016. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Elétrica - Curso de Engenharia Elétrica. Faculdades Integradas de Caratinga, Rede DOCTUM, Caratinga, 2016.

RESUMO

A proposta deste trabalho foi utilizar o efeito direto destes materiais, convertendo tensões mecânicas em eletricidade. Foram criadas três plataformas contendo pastilhas piezoelétricas do tipo PZT-4 para levantamento de dados experimentais. Os materiais piezoelétricos são classificados como materiais inteligentes devido a sua capacidade de conversão de energia mecânica em elétrica e vice-versa. Atualmente esses materiais são muito utilizados com a função de gerar vibrações mecânicas (efeito inverso), como no controle remoto, ultrassom entre outros. Os resultados mostraram o comportamento eletromecânico do material piezoelétrico, sendo analisada a resposta do material decorrente a variação da pressão exercida e o armazenamento da carga gerada. Os resultados mostram possibilidade de utilizar esses materiais para gerarem energia elétrica.

Palavras-chave: Piezoeletricidade. Geração de energia elétrica.

RODRIGUES, Sinézio. **Geração de energia elétrica com pastilhas piezoelétrica PZT-4.** Caratinga, 2016. Trabalho de Conclusão de Curso Superior de Engenharia Elétrica - Curso de Engenharia Elétrica. Faculdades Integradas de Caratinga, Rede DOCTUM, Caratinga, 2016.

ABSTRACT

The purpose of this work was to use the direct effect of these materials, converting mechanical stresses into electricity. Three platforms containing PZT-4 piezoelectric pellets were created for experimental data collection. Piezoelectric materials are classified as intelligent materials because of their ability to convert from mechanical to electrical energy and vice versa. Currently these materials are many used with the function of generating mechanical vibrations (inverse effect), as in remote control, ultrasound among others. The results showed the electromechanical behavior of the piezoelectric material, being analyzed the response of the material due to the variation of the pressure exerted and the storage of the generated load. The results show the possibility of using these materials to generate electricity.

Key-words: Piezoelectricity. Power Generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Gráfico matriz energética Brasileira de 2015.	14
Figura 2	– Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezoelétrico.	17
Figura 3	– Classificação do grupo dielétrico.	17
Figura 4	– Ilustração de uma rede cúbica simples, uma base composta por um único átomo e a estrutura cristalina.	18
Figura 5	– Tipos de corte do cristal de quartzo com suas respectivas denominações.	20
Figura 6	– Polarização piezoelétrica (a) Sem aplicação de campo elétrico (b) Com campo elétrico (c) Após a aplicação de um campo elétrico.	20
Figura 7	– Pastilha PZT-4.	21
Figura 8	– Característica construtiva e simbologia do capacitor.	26
Figura 9	– Característica construtiva e simbologia do diodo.	27
Figura 10	– LED's.	27
Figura 11	– Esquema geral do sistema de geração e controle baseado em material piezoelétrico.	28
Figura 12	– Estrutura do protótipo gerador.	30
Figura 13	– Foto das 3 plataformas.	31
Figura 14	– Modelo do protótipo gerador.	32
Figura 15	– Foto da estrutura do protótipo gerador.	33
Figura 16	– Foto das camadas da estrutura.	34
Figura 17	– Pastilha piezoelétrica sem as bordas de latão pzt-4.	34
Figura 18	– Diagrama: transdutor PZT alimentando um LED.	35
Figura 19	– Tensão x Massa.	36
Figura 20	– Corrente x Massa.	37
Figura 21	– Diagrama: transdutor PZT alimentando um capacitor.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação de peso com Voltagem e Amperagem gerada.	35
Tabela 2 – Potência X Massa	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 Matriz energética	14
2.1.1 Matriz energética Brasileira	14
2.1.2 Energia Hidrelétrica	14
2.1.3 Combustíveis fósseis	15
2.1.4 Centrais Eólicas	15
2.1.5 Energia Solar via placas fotovoltaicas	16
2.1.6 Biomassa	16
2.2 História da piezoelectricidade	17
2.3 Cristais piezoelétrico	17
2.4 Compósitos piezoelétrico	19
2.5 Polarização	19
2.5.1 Cristais	19
2.5.2 Compósitos	20
2.6 Cerâmica PZT	21
2.7 Parâmetros Piezoelétricos	21
2.7.1 Coeficiente de carga piezoelétrica d (m / V ou C / N)	22
2.7.1.1 Valores típicos	22
2.7.2 Coeficiente de tensão piezoelétrica g (V.m / N)	22
2.7.2.1 Valores típicos	22
2.7.3 Fator de acoplamento eletromecânico k (Adimensional)	22
2.7.3.1 Valores típicos	23
2.7.4 Fator de qualidade mecânico Q (Adimensional)	23
2.7.4.1 Valores típicos	23
2.7.5 Coeficiente de temperatura CT (Celsius)	23
2.7.5.1 Valores típicos	23
2.7.6 Equações fundamentais	23
2.8 Correlação e regressão linear	24
2.8.1 Correlação	24
2.8.2 Regressão linear	24
2.9 Componentes eletrônicos	25
2.9.1 Capacitor	25
2.9.1.1 Capacitância	26
2.9.2 Diodo retificador	26

2.9.3 LED	27
2.10 PROJETO PROPOSTO	28
2.10.1 Módulo piezoelétrico	28
2.10.2 Módulo retificador	28
2.10.3 Módulo conversor	28
2.10.4 Módulo das baterias	29
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	30
3.1 Plataforma Geradora	30
3.2 Componentes	31
3.3 Esquema de montagem	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 Primeiro experimento	35
4.2 Segundo experimento	37
5 CONCLUSÃO	39
5.1 Propostas de trabalhos futuros	39
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica se tornou um item quase obrigatório na sociedade atual do século XXI, pois na ocorrência de sua falta, nossas vidas se tornam um caos. Porém foram necessários séculos de descobertas científicas e avanços tecnológicos para chegar ao atual desenvolvimento.

Ao longo desta caminhada científica, grandes nomes fizeram história com incríveis descobertas, como a invenção da pilha elétrica por Alessandro Volta em 1799 e o dínamo por Michael Faraday em 1831, sendo estes os primeiros geradores (transdutores) de energia elétrica existente.

Os avanços tecnológicos proporcionam maior conforto para a sociedade, mas isso tem ocasionado um índice crescente de consumismo, acarretando uma exploração descontrolada dos recursos naturais, provocando desequilíbrio ecológico. Diante desses problemas os órgãos responsáveis pela preservação do meio ambiente trabalham a fim de aumentar a sustentabilidade de exploração dos recursos naturais.

Com enfoque na geração de energia elétrica e preservação do meio ambiente cabe a comunidade científica desenvolver projetos inovadores que permita gerar energia com o menor impacto ambiental possível.

A atual matriz energética Brasileira destaca o aumento da participação das energias renováveis, chegando a quase 81% (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA 2016).

Grande é o benefício das energias renováveis que estão se expandindo ao longo dos anos, porém não se deve ficar limitados aos meios atuais de geração existente, aumentar esse leque de alternativas pode ser um ponto chave. Uma proposta inovadora de fonte de energia limpa é a geração baseado no efeito piezelétrico, o qual se dá através de transdutores piezelétricos que converte a energia mecânica em energia elétrica, podendo também fazer o efeito inverso (Elétrica para mecânica).

A geração piezelétrica não participa da matriz energética Brasileira e nem Mundial, mas está ganhando grande destaque por ser empregada em projetos inovadores. Como na Holanda que fez uma boate que produz eletricidade por essa natureza energética (BALOUSSIER 2008), no Japão que tem vários projetos, dentre eles a implantação no metrô da capital de Tóquio, (JULIÃO 2010), entre outros países que também aderiram projetos com este meio de gerar eletricidade.

O Brasil está para fazer seu primeiro projeto, por meio de uma empresa Japonesa que realizará um investimento nas ciclovias de Curitiba que passará a gerar eletricidade para a iluminação local (GALDINO 2016).

"Uma empresa japonesa de tecnologia escolheu a cidade de Curitiba para um projeto inovador no mercado brasileiro. Até o final do ano, as ciclovias da

cidade irão produzir energia para ajudar a abastecer um sistema de iluminação inteligente. Funcionará da seguinte forma: Sensores serão instalados em todas as cicloviárias e produzirão a eletricidade através do som e da vibração provocados pelas bicicletas. Então, quanto mais pessoas pedalando, mais energia será produzida. A quantidade de energia gerada será suficiente para acionar a sinalização luminosa nos cruzamentos envolvendo cicloviárias e vias, além de coletar dados sobre intensidade de fluxo que irão ajudar no planejamento e expansão das cicloviárias. O projeto piloto é uma parceria entre a empresa Japonesa Soundpower, a Prefeitura de Curitiba e o governo japonês, e faz parte de um plano de iluminação já existente na cidade. 'Enxergamos a possibilidade de integrar o produto deles ao nosso projeto, tornando todo o sistema mais inteligente para os ciclistas de Curitiba', disse Fábio Ribeiro de Camargo, diretor de Iluminação Pública da administração municipal da capital paranaense. Os sensores, que além de sustentáveis ajudarão também na segurança dos ciclistas, serão implantados em 18,5 quilômetros de cicloviárias"(GALDINO 2016).

Esses exemplos mostram o crescimento da matriz piezoelétrica, tendo-a como uma promessa inovadora para geração de energia elétrica. Para apresentar esta natureza geradora foi-se desenvolvido este trabalho com teor teórico e prático com o objetivo de proporcionar ampla compreensão sobre o assunto.

Para apresentar os conceitos teóricos realizou-se estudos bibliográficos sobre o assunto que são apresentados no Capítulo 2. Foi produzido um protótipo gerador para as experimentações, sua construção foi detalhadamente explicada no capítulo 3. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, seguido das considerações finais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA

A definição de matriz energética consiste em toda fonte energética disponível para ser transformada, distribuída ou consumida pelo país, retrata a quantidade da oferta de energia, ou seja, o montante de recursos energéticos ofertados por um país ou por uma região (SIGNIFICADOS 2011).

2.1.1 Matriz energética Brasileira

O gráfico abaixo apresenta a matriz de oferta de potência de energia elétrica. Observa-se a preponderância da matriz hidráulica, com 66,5% de atuação, incluindo a importação. A participação das fontes renováveis encontra-se próxima de 81%, índice muito superior ao mundial, de 21%.

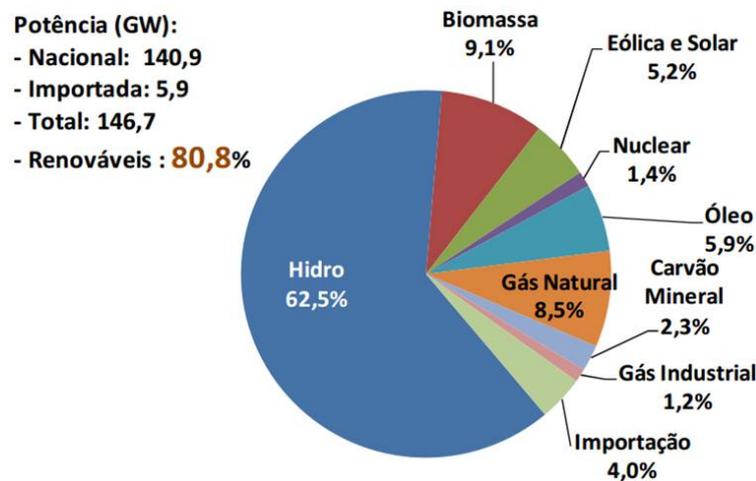


Figura 1: Gráfico matriz energética Brasileira de 2015.

Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2016).

2.1.2 Energia Hidrelétrica

As usinas hidroelétricas trabalham utilizando o potencial das águas de barragens ou represas que se encontra em locais com níveis mais elevados, fazendo mover turbinas que se encontram em um nível mais baixo. A correnteza da água faz as turbinas hidráulicas girarem, transformando a energia hidráulica em energia mecânica. A turbina move o rotor do gerador elétrico, com esse giro acontecem fenômenos eletromagnéticos que faz a transformação da energia mecânica em elétrica. (HINRICHS e KLEINBACH, 2011).

Mesmo com a grande capacidade de gerar energia sem emitir gases poluentes, as usinas hidroelétricas acarretam consideráveis prejuízos à natureza no local onde ela foi construída, em razão da inundação de grandes extensões de terra, extinguindo o ecossistema local, podendo também afetar diretamente comunidades que dependem da utilização do mesmo rio que são instaladas na usina para o sustento, já que pode prejudicar a pesca. (HINRICHS e KLEINBACH, 2011).

Outra desvantagem desse meio de geração de energia é devido a dependência do nível de água da localidade no qual ele foi instalado, se houver escassez de chuvas e o nível de água estiver baixo a produção de energia estará comprometida.

2.1.3 Combustíveis fósseis

Devido à grande quantidade de combustíveis fósseis na natureza e com custo inicialmente baixo, o consumo dessa fonte energética proporcionou um grande desenvolvimento no âmbito industrial, no entanto as crescentes demandas por esses recursos energéticos acarretaram rapidamente o esgotamento e um rápido aumento considerável de seu preço. (FRAGMAQ, 2013).

Além de ser uma fonte finita, a consumo desenfreado dos combustíveis fósseis e se tornou um grande problema para o meio ambiente, pois sua utilização produz a liberação de gases causadores do efeito estufa, sendo um dos causadores do aquecimento global. (FRAGMAQ, 2013).

As principais fontes de energia utilizadas pelos países industrializados e pelos países em desenvolvimento são os derivados do petróleo, sendo estes, recursos energéticos não renováveis e poluentes, e por isso tem sua permanência ameaçada no mercado.

Na atualidade é vivenciado uma crise energética mundial devido à atual matriz energética estar fixada em recursos não renováveis, com isso acarreta-se uma ameaça ao crescimento econômico, pois suas demandas ilimitadas não estão sendo supridas devido aos recursos escassos (REDAÇÃO PENSAMENTO VERDE, 2014).

2.1.4 Centrais Eólicas

A geração de energia elétrica através das forças dos ventos é classificado como uma das alternativas que causam menos impacto no meio ambiente, e com perspectivas de gerar quantidades significativas de energia. Especificamente a energia eólica é a energia cinética contida no movimento dos ventos e a geração de energia elétrica acontece da seguinte maneira: as hélices se movem com a atuação da energia eólica que as atingem fazendo assim o movimento rotatório girando um eixo de um gerador de eletricidade que converte a energia mecânica em elétrica. Esse meio de geração de energia depende da quantidade e da velocidade do vento,

quanto maior for os valores dessas variantes melhor serão a produção de energia. (CAMPOS, 2004).

Alguns pontos negativos da geração eólica se dão na necessidade de utilizar grandes áreas para a implementação do projeto, poluição sonora causada pelos ruídos das hélices em movimento e a possível colisão de pássaros com as pás. (REIS, 2011).

2.1.5 Energia Solar via placas fotovoltaicas

Essa é uma tecnologia possibilita gerar de energia elétrica de maneira limpa e segura, através utilização dos raios solares que são recursos energéticos inesgotáveis. A geração via placas fotovoltaicas não produz nenhum tipo de poluentes em sua utilização, no entanto para a produção de seus componentes ocorre uma baixa emissão de poluentes em suas fabricações.

Um ponto negativo dessa modalidade de geração alternativa é o seu custo elevado para adquirir o sistema quando comparado à tarifa cobrada pela concessionária ao consumidor residencial. (ZILES e BENEDITO, 2012).

Esse sistema de geração de energia utiliza placas contendo milhares de células fotovoltaicas que faz a transformação da energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico. (TEXEIRA, RODRIGUES e BRAGA, 2003). O fenômeno fotovoltaico foi descoberto no ano de 1839, pelo físico francês Alexandre Edmond Becquerel que consiste na capacidade de um material semicondutor gerar tensão elétrica quando exposto a luz visível.

2.1.6 Biomassa

Biomassa são todos os materiais de origem orgânica que comumente são desperdícios de processos industriais. Esses restos podem ser utilizados como combustível na produção calor e energia. Para gerar energia elétrica via biomassa se utilizam bagaço da cana de açúcar, folhas de árvores, galhos entre outros, como combustíveis para usinas termelétricas.

Na combustão dos materiais orgânicos ocorre a liberação de dióxido de carbono na atmosfera, no entanto essa quantidade CO₂ não é maior que a quantidade absorvida pelas plantas que originaram o combustível, fazendo com que o balanço da emissão seja nulo.

O carvão e petróleo não são classificados como biomassa, mesmo sendo também derivados da vida vegetal, pois os mesmos são produtos de diversas transformações que demanda milhões de anos para serem realizadas. Outro fator para esses elementos citados não se classificarem como biomassa se dá pelo fato de que carvão e petróleo não são recursos renováveis. (PESQUISA, 2010).

2.2 HISTÓRIA DA PIEZOELETRICIDADE

O termo piezo vem do grego “piezein” que significa pressão ou pressionar. Piezoelectricidade é a capacidade que alguns dielétricos têm de transformar tensões mecânicas em cargas elétricas, este é o efeito direto, podendo também realizar o efeito inverso onde são transformadas as cargas elétricas em deformações mecânicas. (CALLISTER 2006).

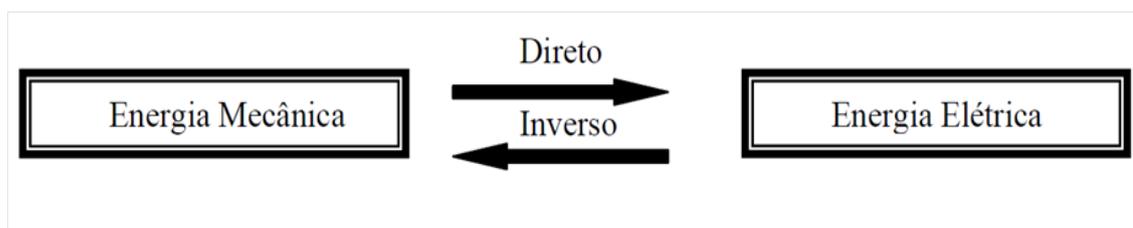


Figura 2: Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezoelétrico.

Fonte: EIRAS (2004).

Os pioneiros dessa descoberta foram os irmãos Jacques e Pierre Currie que em 1880 provaram de forma prática a formação de um potencial elétrico na superfície dos Cristais de prova ao se aplicar uma tensão mecânica sobre eles, baseando-se em experimentos com os cristais de quartzo, conhecido como sal de Rochelle. No ano de 1881 a piezoelectricidade inversa foi provada matematicamente por Lippmann (KATZIR 2003).

2.3 CRISTAIS PIEZOELÉTRICO

Os cristais piezoelétricos se encontram no grupo dos dielétricos como ilustrado na figura abaixo, no qual também é salientada a presença de duas propriedades destes materiais, Ferroelétrico e Piroelétrico.

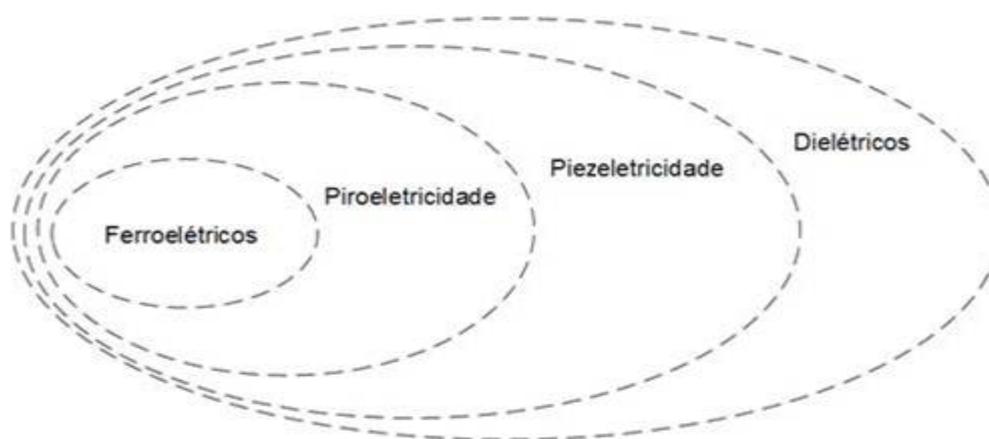


Figura 3: Classificação do grupo dielétrico.

Fonte: EIRAS (2004).

De acordo com (CALLISTER 2006), os materiais ferroelétricos possuem o efeito piezoelétricos, por possuírem esta propriedade podem ser utilizados em aplicações que necessitam do funcionamento piezoelétrico, tal como sensores e atuadores, sendo eles pertencente à classe dos materiais inteligentes.

O parâmetro necessário para um material possuir propriedade piezoelétrica é a assimetria das cargas elétrica em cada célula unitária, isso possibilita a formação de um forte dipolo entre íons (CALLISTER 2006). A cristalografia baseia-se nas características da célula unitária do cristal em função de um ponto, eixo e plano ou combinação desses (LICCARDO, 2007, p.13).

Os materiais cristalinos possuem estruturas de forma ordenada, no qual há um padrão de repetições sendo igual em qualquer ponto.

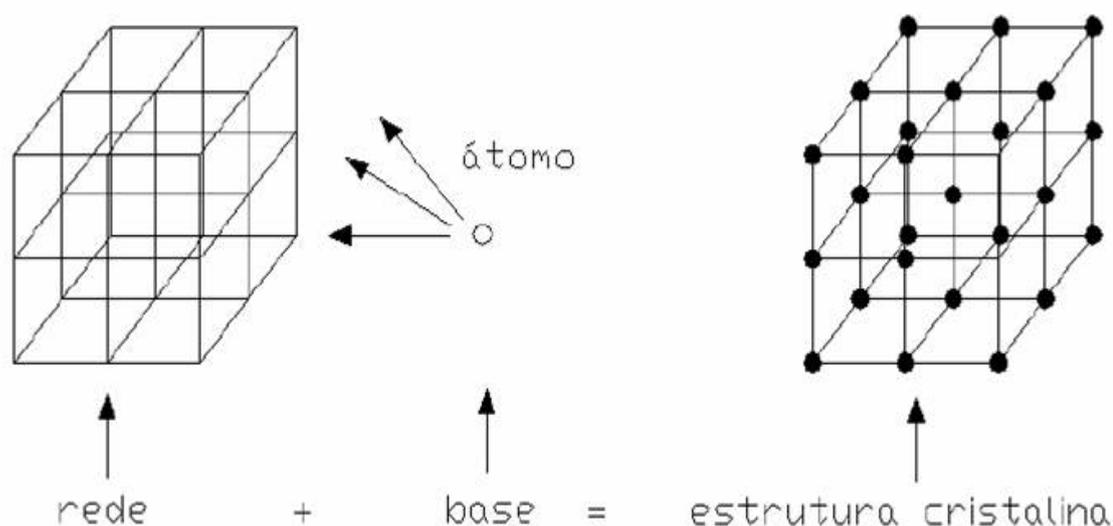


Figura 4: Ilustração de uma rede cúbica simples, uma base composta por um único átomo e a estrutura cristalina.

Fonte: LICCARDO (2007, p.13).

Deve-se destacar a diferença no conceito de “Rede” e “Estrutura cristalina”.

“De acordo com as definições apresentadas, não se deve confundir os conceitos de cristal e de rede cristalina. Ao passo que rede cristalina é uma abstração matemática que consiste num conjunto de pontos idênticos dispostos regular e periodicamente no espaço, o cristal é formado por um conjunto de átomos que podem nem sempre ser todos da mesma espécie química. A estrutura do cristal pode ser gerada sobrepondo a cada ponto da rede cristalina uma base (ou motivo) de átomos, idêntica para todos os pontos da rede. Assim, a relação entre cristal, rede cristalina e motivo pode ser simbolizada como rede + base = cristal” (TILLEY, 2014, p. 54)

Os cristais são subdivididos em 32 grupos cristalográficos, dos quais 21 não possuem centro de simetria (Condição para haver piezoeletricidade), e deste grupo de 21 cristais assimétricos 20 são piezoelétricos (TILLEY, 2014, p. 54)

Como mencionado certos cristais encontrados na natureza tal como o quartzo, sais de Rochelle, turmalina, tartrato de sódio e de potássio possuem as propriedades piezoelétricas, e também alguns materiais que podem se tornar cristais com as mesmas características piezoelétricas quando submetido á um trabalho de preparo como à cana de açúcar e escamas de peixes entre outros. (Harvey 2002).

Um dos primeiros materiais piezoelétricos a ser utilizado foi o cristal de quartzo por sua abundância e facilidade de obtê-lo na natureza, porem com grandes limitações devido a necessidade de geradores de alta tensão para excita-los. (CHENG, 1987).

2.4 COMPÓSITOS PIEZOELÉTRICO

Apesar de encontrarmos os cristais piezoelétrico na natureza, é possível também, fabricar materiais com as mesmas propriedades. O compósitos que são materiais policristalinos, oferecem as seguintes vantagens, em relação aos cristais: Menores custos para obtenções podem ser produzidas em uma grande variedade de composições, dando a capacidade de controlar ou alterar suas propriedades físicas, e a vantagem de serem produzidos numa maior variedade de geometrias (EIRAS, 2004).

Como aspecto inferior das piezocerâmicas, em comparação aos cristais, destaca-se a maior dependência de suas propriedades eletromecânicas com a temperatura, e a origem de fases indesejadas no decorrer sua produção, visto que pode desorganizar suas propriedades com o tempo, fenômeno conhecido como envelhecimento do material (EIRAS, 2004).

2.5 POLARIZAÇÃO

Polarização é a condição necessária para haver geração de cargas elétricas macroscópicas, neste caso no material piezoelétrico, uma vez que não havendo polarização as micros cargas geradas se anulam.

2.5.1 Cristais

Levando em consideração que os cristais piezoelétricos possuem suas propriedades piezo de forma natural, a polarização se dá nos cortes do mesmo. Esses cortes devem ser orientados com base na estrutura atômica dos materiais, uma vez que são eles que definem as orientações dos polos.

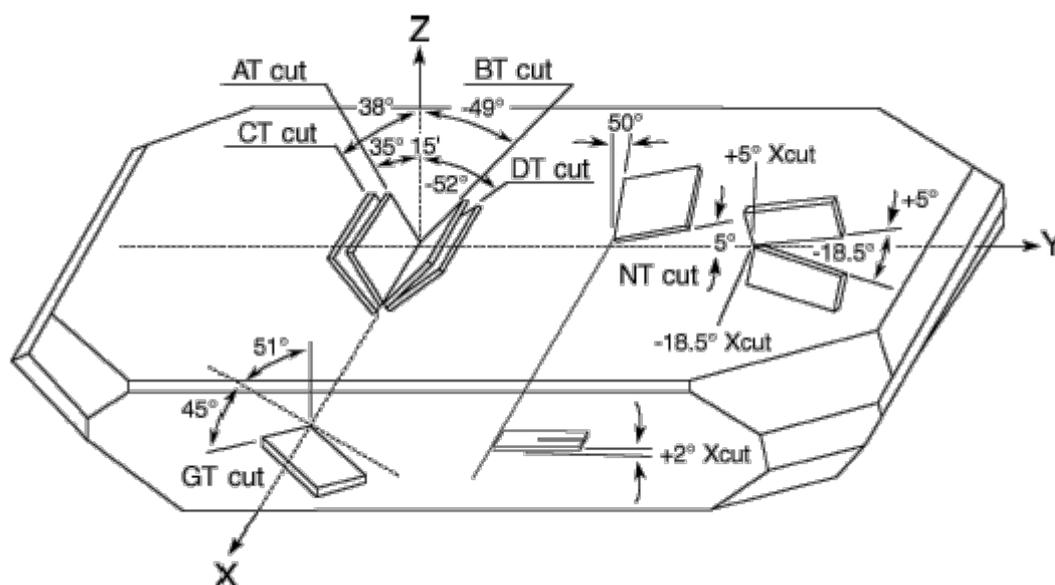


Figura 5: Tipos de corte do cristal de quartzo com suas respectivas denominações.

Fonte: EIRAS (2004).

2.5.2 Compósitos

Compósitos é a junção de dois ou mais materiais a fim de ter um produto final com as propriedades desejadas que cada material utilizado possui. A polarização dos compósitos é feita através da aplicação de um forte campo elétrico nos materiais em temperatura elevada acima da temperatura de Currie, mantendo a presença do campo o material é resfriado até a temperatura ambiente (CALLISTER, 2006).

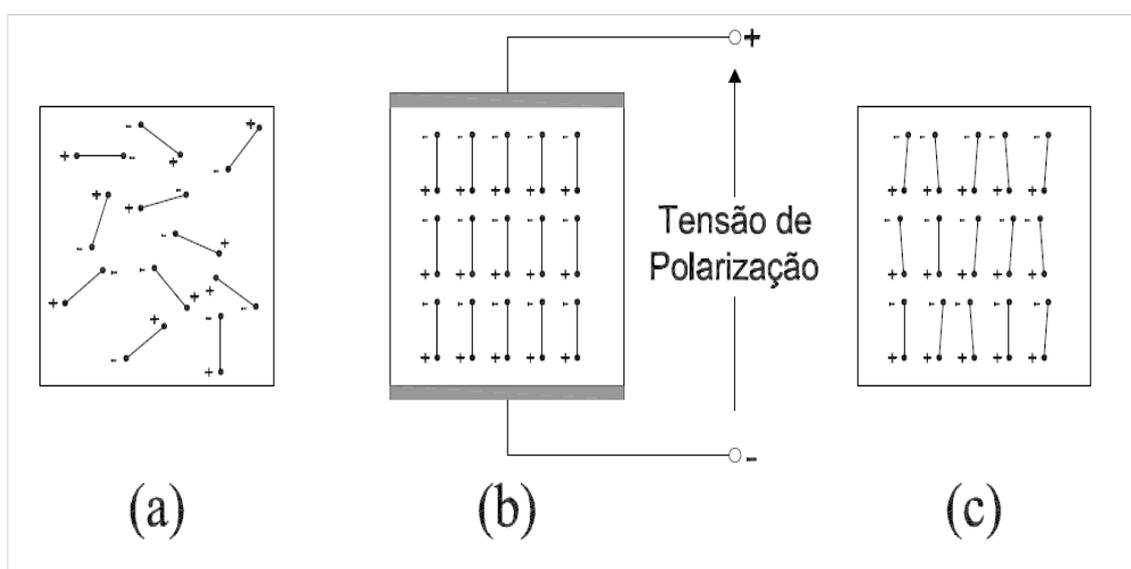


Figura 6: Polarização piezoelétrica (a) Sem aplicação de campo elétrico (b) Com campo elétrico (c) Após a aplicação de um campo elétrico.

Fonte: COELHO (2015, P. 27).

2.6 CERÂMICA PZT

Os transdutores piezoelétrico existente com facilidade de adquirir no mercado atualmente são as cerâmicas PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) que são classificadas em cinco grupos.

Estes são alguns dos modelos com características aplicáveis como geradores de energia elétrica:

PZT-2 pode-se utilizar apenas em projetos que aceite baixo valor da constante dielétrica, pois é inferior em quase todos os fatores em relação as cerâmicas PZT-4 e PZT-5A.

PZT-4 é apropriado como transdutores acústicos de alta potência, devido a sua alta resistência a despolarização e baixas perdas dielétricas quando sujeito a altas tensões. Também podendo ser utilizados em "sistemas de geração de energia elétrica" devido a sua elevada resistência à despolarização quando submetido estresse mecânico.

PZT-5A é indicado para hidrofones ou instrumentação pelo fato de possuir elevada resistividade quando sujeito a altas temperaturas e possuir alta sensibilidade e alto tempo de estabilidade.

PZT-5H possui uma sensibilidade que supera a cerâmica PZT-5A e é, semelhante à PZT-5A na maioria dos outros parâmetros. Diferencia-se grandemente dos demais modelos apresentados devido ao seu baixo ponto de Curie, que limita a variação de temperatura aceitável para trabalho, acarretando uma diminuição de seu uso.

PZT-8 se assemelha ao PZT-4, porem com maiores perdas dielétricas e mecânicas quando submetido a trabalhar em alta tensão.

O modelo utilizado no trabalho foi a PZT-4, apresentado na figura 7

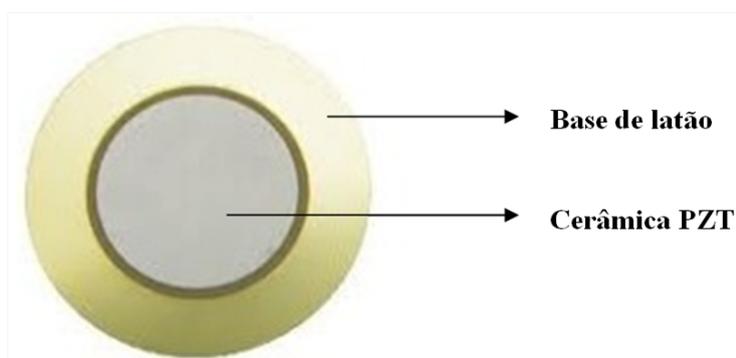


Figura 7: Pastilha PZT-4.
Fonte:Elaborado pelo Autor.

2.7 PARÂMETROS PIEZOELÉTRICOS

Todos os parâmetros e unidades descritos a seguir se encontra na Apostila Soluções Piezoelétricas do instituto ATCP ENGENHARIA FÍSICA do Brasil.

Na seleção de um material piezoelétrico com fins de aplicações tecnológicas procura-se, de modo geral, conhecer certas propriedades, ao qual se destaca os parâmetros funcionais mais relevantes dos materiais piezoelétricos que são:

2.7.1 Coeficiente de carga piezoelétrica d (m / V ou C / N)

Orienta qual é a proporção entre a deformação dimensional (Δl) do componente piezoelétrico (metros) e a tensão elétrica (Volts), e entre a formação de cargas elétricas (Coulomb) e a tensão mecânica exercida no material (Newton). Esse conhecimento é aplicado principalmente em instalações de posicionadores piezoelétricos e sensores de força/deformação.

2.7.1.1 Valores típicos

De 0,2 a 8 Angstrom (10⁻¹⁰ metros) por Volt aplicado, e de 20 a 800 pico Coulomb por Newton aplicado, para cerâmicas piezoelétricas de PZT.

2.7.2 Coeficiente de tensão piezoelétrica g (V.m / N)

Orienta qual é a proporção entre a tensão elétrica (Volts) e a tensão mecânica exercida (Newton) para a extensão de 1 metro. Esse conhecimento é aplicado no planejamento de detonadores de impacto e “magic clicks” (gera uma fagulha elétrica para acender a chama de um fogão).

2.7.2.1 Valores típicos

De -1 a 60 Volts para cada Newton aplicado (considerando a dimensão do eixo em questão de 1 metro), para cerâmicas piezoelétricas de PZT. Diminuindo-se a dimensão da cerâmica ou aumentando a força, o módulo da tensão gerada também aumenta.

2.7.3 Fator de acoplamento eletromecânico k (Adimensional)

É a eficiência de o componente piezoelétrico converter energia elétrica em mecânica e vice versa (transdução). Esse conhecimento é de suma importância para o controle da qualidade das cerâmicas piezoelétricas em projetos de equipamentos onde é indesejada a conversão cruzada de energia, ou seja, que ao vibrar ou deformar um eixo não forme cargas elétricas ou tensão elétrica (ddp) em outro eixo. Para este caso, quanto menor o respectivo fator de acoplamento melhor.

2.7.3.1 Valores típicos

De 0.02 (equivalente a 2% de eficiência) a 0.75 (equivalente a 75% de eficiência), para cerâmicas piezoelétricas de PZT”.

2.7.4 Fator de qualidade mecânico Q (Adimensional)

É a consideração das perdas mecânicas (amortecimento) do material. Esse conhecimento é aplicado em projetos de equipamentos dinâmicos de alta potência.

2.7.4.1 Valores típicos

De 50 a 1500, para cerâmicas piezoelétricas de PZT.

2.7.5 Coeficiente de temperatura CT (Celsius)

É a temperatura (conhecida como temperatura de Curie) em que ocorre uma transição de fase na estrutura cristalina do material acarretando a perda das propriedades piezoelétricas. Quando esta temperatura é ultrapassada, o material perde a orientação polar induzida tornando-se inútil em aplicação como elemento conversor de energia elétrica em mecânica. Esse conhecimento é crucial no projeto de dispositivos que deverão trabalhar em altas temperaturas e de alta potência.

2.7.5.1 Valores típicos

De 150 a 350 Celsius, para cerâmicas piezoelétricas de PZT.

2.7.6 Equações fundamentais

As equações e unidades que descrevem as propriedades construtivas piezoelétricas foram referenciadas na Apostila Soluções Piezoelétricas do instituto ATCP ENGENHARIA FÍSICA do Brasil, elas relacionam os parâmetros mecânicos com elétricos e estão apresentadas a seguir:

$$D = d.T + \varepsilon.E(\text{direto}) \quad (2.1)$$

$$S = s.T + d.E(\text{inverso}) \quad (2.2)$$

O autor define as seguintes características como:

(D) Deslocamento Elétrico: É o resultado da intensidade do campo elétrico (E) e a permissividade elétrica à tensão mecânica constante.

(T) Tensão ou compressão mecânica: É a força aplicada por unidade de área transversal.

(E) Campo Elétrico: Relaciona a tensão aplicada ou produzida com a distância entre os eletrodos.

(S) Deformação: É a tensão mecânica, o estresse, ou seja, a deformação.

(ϵ) Permissividade dielétrica: É o fator que relaciona as proporções de deslocamento elétrico (D) em relação a um campo elétrico (E) com a ação de uma tensão mecânica constante (T).

(s) coeficiente elástico: Determina a rigidez da deformação elástica do material.

(d) coeficiente piezoelétrico: Relaciona a proporção de deformação das dimensões do material com as cargas geradas.

Deve-se ressaltar a dependência linear da deformação do material piezoelétrico, com o campo aplicado, na qual o sentido da deformação depende diretamente do campo, pois variando-o, varia-se também o sentido das deformações mecânicas ERTURK(2008).

De acordo com o autor ERTURK(2008) As equações que descrevem as propriedades construtivas piezoelétricas são baseada no pressuposto de que a equação linear da elasticidade é acoplada com a equação de carga eletrostática por meio das constantes piezoelétricas. Todos os materiais em sua região elástica possuem o efeito semelhante a uma mola, podendo-se aplicar a lei de Hooke, porem para os piezoelétricos esta lei não descreve completamente o comportamento eletromecânico, devido ao fato de estar diretamente ligado as duas naturezas, elétrica e mecânica (Nader 2002).

2.8 CORRELAÇÃO E REGRESSÃO LINEAR

Na necessidade de realizar projeções de valores com base na correlação entre duas variáveis pode-se ser utilizado o artifício matemático de regressão linear.

2.8.1 Correlação

É o comportamento conjunto de duas variáveis quantitativas distintas. Essa relação se da entre “1 e -1”, indicando o grau de relação entre as variáveis em questão, sendo o grau “1” de maior fidelidade de proporção direta quando sujeita a variações, e “-1” é o maior grau de proporção inversa entre as variáveis (ESCOLA EDIT 2015).

2.8.2 Regressão linear

Com base em duas variáveis que de algum modo se relacionam pode-se aplicar o cálculo de regressão linear para prever valores ainda não existentes da variável de interesse em forma de

estatística.

O cálculo da regressão linear é expresso pela equação 2.3, (PETERNELLI, 2006).

$$y = a.x + b \quad (2.3)$$

Y: Variável de interesse (dependente).

a: Coeficiente da variável “X”.

X: Variável independente

b: Coeficiente de interseção.

Para encontrar o coeficiente “a” utiliza-se a equação 2.4, (PETERNELLI, 2006).

$$a = \frac{n.\Sigma x.y - \Sigma x.\Sigma y}{n.\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2} \quad (2.4)$$

n: Número de pares de valores “X e Y”.

Σ : Somatória.

x: Variável independente.

Para encontrar o coeficiente “b” utiliza-se a equação 2.5, (PETERNELLI, 2006).

$$b = y' - a.x' \quad (2.5)$$

y' = Média dos valores de y.

x' = Média dos valores de x.

2.9 COMPONENTES ELETRÔNICOS

2.9.1 Capacitor

O capacitor também conhecido como condensador é um dispositivo elétrico e eletrônico que é capaz de armazenar cargas elétricas. Composto por dois elementos condutores isolados eletricamente entre si por um material dielétrico (SANTOS 2011).

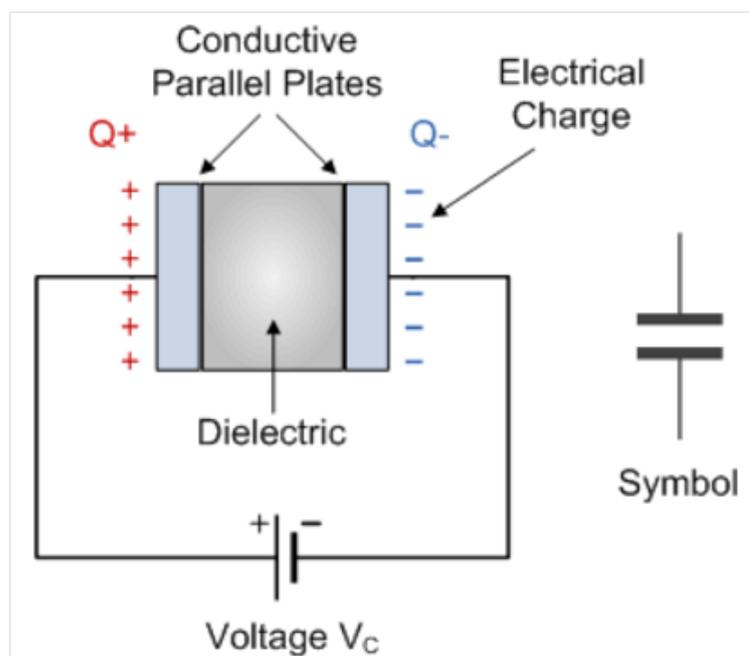


Figura 8: Característica construtiva e simbologia do capacitor.

Fonte:MARQUES(2010).

2.9.1.1 Capacitância

Se da na capacidade de armazenar cargas elétricas no formato de campo eletrostático, podendo ser medida através do coeficiente que relaciona a quantidade de carga com a diferença de potencial existente entre as placas do capacitor, podendo ser equacionado pela seguinte fórmula(SANTOS 2011):

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.6)$$

C:Capacitância.

Q:Carga elétrica.

V:Voltagem.

A unidade de medida da capacitância é dada em farad (F) em homenagem a Michael Faraday.

2.9.2 Diodo retificador

O diodo é um componente eletrônico composto de dois terminais condutores, ele é característico por conduzir a corrente elétrica em apenas um sentido nos seus terminais(TEIXEIRA 2010).

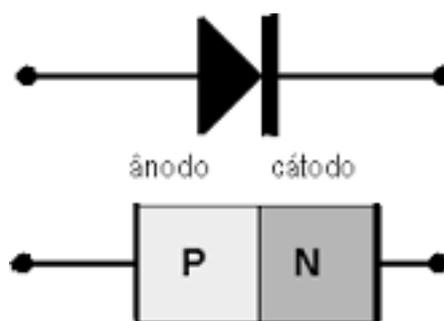


Figura 9: Característica construtiva e simbologia do diodo.

Fonte: TEIXEIRA(2010).

A figura 9 apresenta a simbologia do diodo, onde o terminal positivo é o Ânodo e o terminal negativo o catodo. Esse comportamento unidirecional ocorre devido há uma dopagem ao qual são adicionados impurezas, a fim de criar duas regiões distintas, “tipo-n” que é uma região negativa portadora de elétrons, e “tipo-p” que é uma região positiva portadora de lacunas devido ausência de elétrons (TEIXEIRA 2010). Entre estas duas regiões há uma fronteira chamada de junção PN, que é responsável pelo funcionamento unidirecional do componente (TEIXEIRA 2010).

2.9.3 LED

O díodo emissor de luz também chamado de LED que é a abreviatura do inglês Light emitting diode. É um componente que tem como funcionalidade a emissão de luz (SANTOS 2008). O material normalmente usado para sua fabricação é o Arseneto de alumínio e gálio (ALGaAs), (HARRIS 2011).

O autor (SANTOS 2008) explica que “A luz emitida pelos Led’s é monocromática, sendo a cor, portanto, dependente do cristal e da impureza de dopagem com que o componente é fabricado”.



Figura 10: LED’s.

Fonte: CAMPOS(2014).

2.10 PROJETO PROPOSTO

Um sistema completo para geração de energia elétrica com materiais piezoelétricos é composto por cinco blocos que são responsáveis por todo processo de geração, desde a captação da energia mecânica pelos transdutores até a carga a ser alimentada.

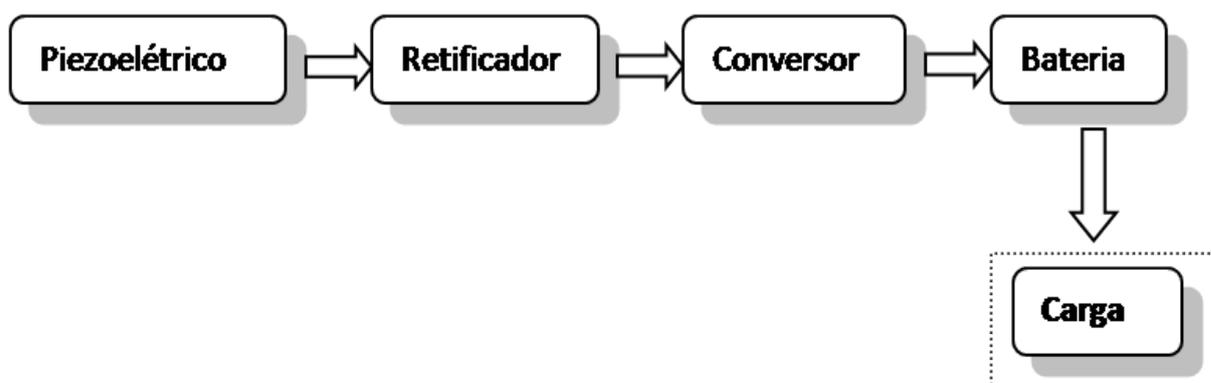


Figura 11: Esquema geral do sistema de geração e controle baseado em material piezoelétrico.

Fonte:Elaborado pelo Autor.

A figura 11 denota o esquema geral do sistema, considerando a necessidade de tratamento das características do sinal elétrico nos módulos através de retificadores e conversores, e a necessidade da bateria para armazenar a carga, suprida pelo módulo conversor.

2.10.1 Módulo piezoelétrico

Consiste nos transdutores piezoelétricos embutidos no piso das localidades a serem instalados, com o devido preparo mecânico para que os elementos transdutores de energia mecânica em elétrica possam suportar determinadas cargas.

2.10.2 Módulo retificador

Faz a transformação do sinal de pulsos de corrente gerado pelos transeuntes que passam pelo local em um sinal de corrente contínua, ação necessária para a carga da bateria. Esses pulsos elétricos são gerados na própria frequência das passadas (pisadas) exercida nas cerâmicas geradoras de eletricidade.

2.10.3 Módulo conversor

Faz o controle do nível de sinal da corrente contínua para que tenha o valor adequado para carregar o banco de baterias no módulo posterior. Logo são os módulos de retificação e conversão que modificam o sinal elétrico gerado para fornecer alimentação as baterias.

2.10.4 Módulo das baterias

Tem a finalidade de alimentar as cargas acopladas. Por questões de segurança o módulo de baterias deve conter um controlador de cargas para o gerenciamento do nível de carga das baterias e passar tais informações ao sistema de controle para o devido tratamento em caso de ocorrência de descarregamento a níveis críticos para que não venham faltar o fornecimento de energia as cargas consumidoras.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo será apresentado a elaboração de três plataformas equipadas com transdutores piezoelétricos.

3.1 PLATAFORMA GERADORA

A figura 12 apresenta o modelo construtivo das plataformas geradoras que foi utilizada neste trabalho:

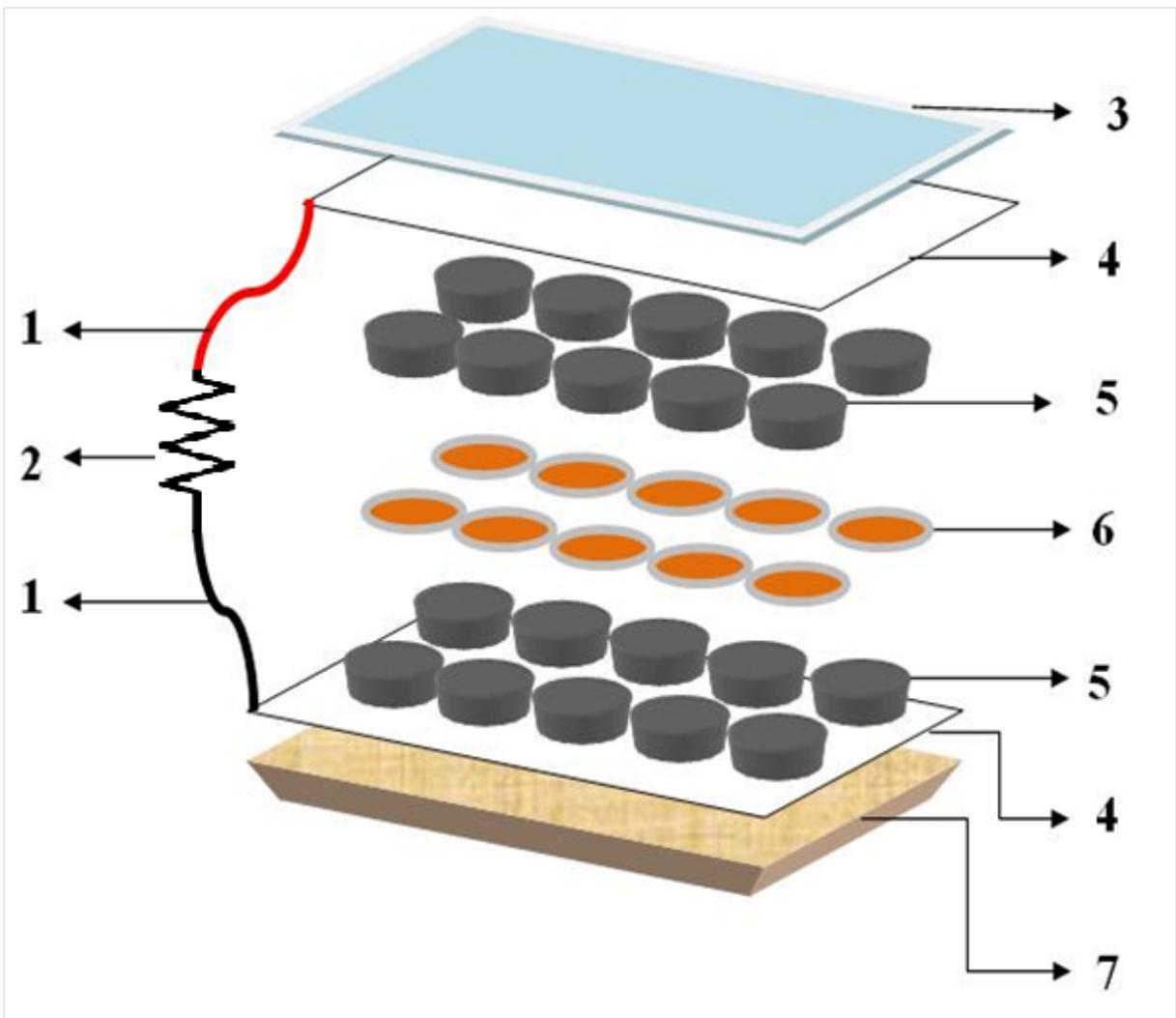


Figura 12: Estrutura do protótipo gerador.

Fonte:Elaborado pelo Autor.

3.2 COMPONENTES

- 1- **Terminais** : Fio que conecta os eletrodos à carga.
- 2- **Carga**: Carga consumidora acoplada.
- 3- **Cerâmica**: Cerâmica de construção civil
- 4- **Eletrodos**: Feito em papel alumínio, é responsável pela interligação de todos os componentes piezoelétricos ao polo de saída.
- 5- **Pastilha de comando de válvula em aço**: Responsável em ligar os eletrodos do componente piezoelétrico com o eletrodo positivo de saída.
- 6- **Pastilha piezoelétrica**: Disco de 35 milímetros fabricados a partir de cerâmica piezoelétrica PZT (Titanato Zirconato de Chumbo).
- 7- **Estrutura de madeira**: Abrigar os componentes.

Para esse experimento foi desenvolvida a montagem de três plataformas geradoras (figura 13) com 30 pastilhas piezoelétricas (figura 15). A figura 14 mostra o modelo e dimensões do protótipo experimental desenvolvido. Cada plataforma possui dimensões referentes ao tamanho do pé humano de uma pessoa adulta, sendo 35 cm de comprimento por 16 de largura.



Figura 13: Foto das 3 plataformas.

Fonte:Elaborado pelo Autor.



Figura 14: Modelo do protótipo gerador.

Fonte:Elaborado pelo Autor.

A figura 15 mostra o detalhadamente todos os componentes do protótipo.



Figura 15: Foto da estrutura do protótipo gerador.

Fonte:Elaborado pelo Autor.

3.3 ESQUEMA DE MONTAGEM

A plataforma foi montada na seguinte configuração:

Na superfície inferior da estrutura feita em madeira (componente 7) foi recoberta com uma folha de papel alumínio (componente 4), que possui a função de eletrodo. Sobre a superfície do papel alumínio foi fixados as pastilhas (componente 5) que serviram como suporte para as cerâmicas PZT (componente 7) figura 15. A camada superior segue o mesmo processo de montagem utilizado na camada inferior, somente invertendo as ordens de montagem dos componentes. Sendo a pastilha (componente 6) sobre a cerâmica PZT e o papel alumínio sobre as pastilhas de aço superiores (componente 6), e finalmente a cerâmica de alvenaria figura 16.



Figura 16: Foto das camadas da estrutura.

Fonte:Elaborado pelo Autor.

O excesso das bordas de latão do PZT foi retirado para que os terminais positivo e negativo do dispositivo não entrasse em curto circuito figura 17.



Figura 17: Pastilha piezoelétrica sem as bordas de latão pzt-4.

Fonte:Elaborado pelo Autor.

Os resultados dos experimentos são apresentados no capítulo 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo apresentamos os resultados obtidos com as plataformas geradoras por dois experimentos distintos:

1. Utilizando um LED como carga, e medindo os valores de tensão e corrente.
2. Utilizando um capacitor para armazenar a potência gerada.

4.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO

A figura 18 mostra o diagrama esquemático utilizado para o primeiro experimento.

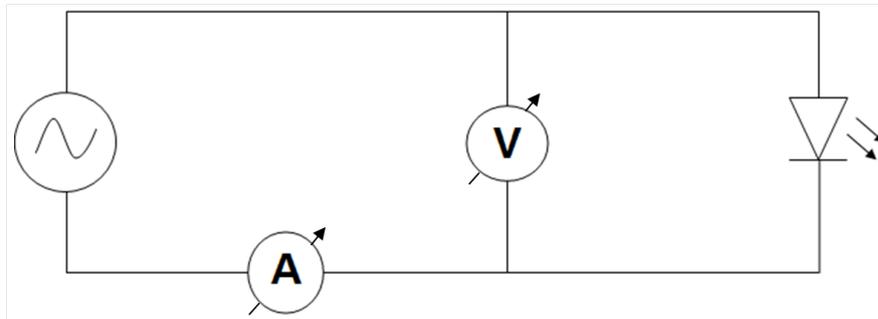


Figura 18: Diagrama:transdutor PZT alimentando um LED.

Fonte:Elaborado pelo Autor.

Nesta fase do experimento aplicou-se uma força sobre a plataforma geradora.Os resultados obtidos de tensão e corrente relacionados com a força aplicada são mostrados na tabela 1.

Tabela 1: Relação de peso com Voltagem e Amperagem gerada.

Massa (kg)	Voltagem (Volts)	Corrente (Miliampère)
50	6,48	0,082
60	6,69	0,087
65	6,70	0,089
70	6,91	0,092
75	7,03	0,094
80	7,18	0,095

Como pode ser notado pela tabela 1, quanto maior a intensidade de força mecânica exercida sobre a plataforma, maior são os valores de tensão e corrente gerados pelas deformações na cerâmica PZT.

Com base nos dados da tabela, e utilizando o sistema de regressão linear foram obtidos as equações Volts x Massa (equação 4.1) e Corrente x Massa (equação 4.2).

$$V = 0,0232.M + 5,2792 \quad (4.1)$$

Onde: V é dado em Volts e M em Kg. O coeficiente de correlação encontrado pra esse ajuste foi 0,96 o que mostra uma grande afinidade entre as variáveis tensão e massa, como pode ser observado o gráfico (figura 19).

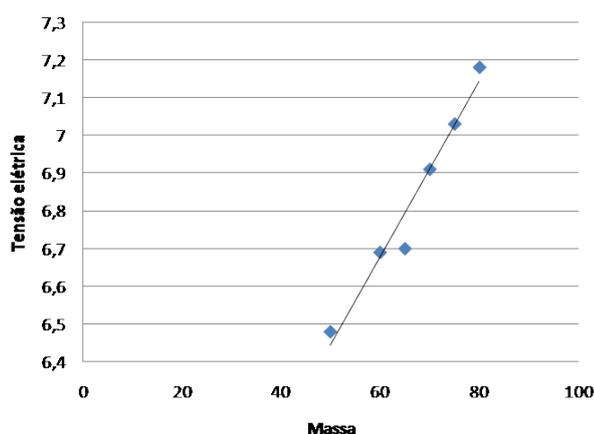


Figura 19: Tensão x Massa.

Fonte:Elaborado pelo Autor.

Equação. Corrente x Massa (4.2).

$$A = 0,000448.M + 0,05992 \quad (4.2)$$

Onde: A é dado em Amper e M em Kg. O coeficiente de correlação encontrado pra esse ajuste foi 0,99 o que mostra uma grande afinidade entre as variáveis tensão e peso, como pode ser observado o gráfico (figura 20).

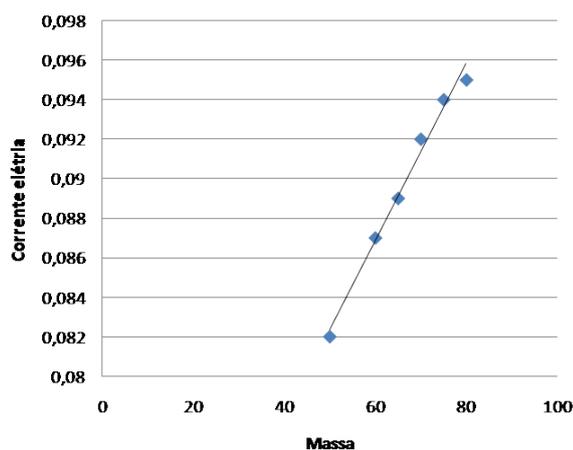


Figura 20: Corrente x Massa.

Fonte:Elaborado pelo Autor.

4.2 SEGUNDO EXPERIMENTO

No segundo experimento a carga foi substituída por um capacitor eletrolítico de $4700 \mu\text{f}$ por 60 volts e novamente os valores de tensão e corrente foram medidos com o auxílio de um amperímetro e um voltímetro. Nessa configuração o diodo retificador 1N4007 impede o retorno de corrente.

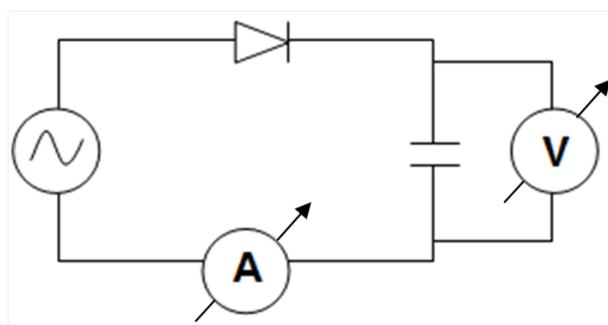


Figura 21: Diagrama: transdutor PZT alimentando um capacitor.

Fonte:Elaborado pelo Autor.

Com os resultados obtidos pelo amperímetro e voltímetro foi possível calcular a energia armazenada no capacitor em cada etapa de teste.

A tabela 2 apresenta os resultados (Potencia armazenada no capacitor (mW) em função do numero de passo) obtidos em uma simulação onde uma pessoa de massa de 70 kg caminha sobre a plataforma alternando o numero de passos em cada fase do experimento.

Tabela 2: Potência X Massa

Quantidade de passos sobre a cerâmica	Potencia armazenada no capacitor (mW)	Quantidade de passos sobre a cerâmica	Potencia armazenada no capacitor (mW)
1	0,0506	26	1,0488
2	0,092	27	1,0764
3	0,138	28	1,104
4	0,1702	29	1,1316
5	0,2208	30	1,1684
6	0,276	31	1,2006
7	0,3312	32	1,2328
8	0,3772	33	1,2558
9	0,4232	34	1,2972
10	0,45632	35	1,3294
11	0,4968	36	1,357
12	0,552	37	1,3984
13	0,6026	38	1,4398
14	0,644	39	1,4582
15	0,6808	40	1,4858
16	0,7222	41	1,518
17	0,7498	42	1,5456
18	0,782	43	1,587
19	0,8096	44	1,6192
20	0,8418	45	1,6422
21	0,874	46	1,6606
22	0,9062	47	1,6974
23	0,9338	48	1,7066
24	0,9614	49	1,7342
25	1,0074	50	1,7664

Com base nos dados da tabela 2 é possível observar que a potencia gerada pela plataforma aumenta conforme o numero de passos aumenta.

5 CONCLUSÃO

Comprovou-se que exercendo um estresse mecânico sobre a pastilha PZT-4 ocorre a formação de um dipolo elétrico sobre suas superfícies formando o surgimento de voltagem e corrente elétrica como proposto pelos descobridores deste fenômeno, isso possibilita utilizar os materiais com capacidade piezoelétrica em funções como geração de energia elétrica.

Comprovou-se a existência da correlação da massa aplicada com a tensão e corrente gerada, mostrando que o comportamento elétrico e mecânico são de grande afinidade. Os parâmetros elétricos obtidos apresentaram grande regularidade de seus ganhos em função do aumento da massa aplicada, também tendo boa resposta em relação ao armazenamento de energia quando submetido a um ciclo constante de passadas.

Conclui-se a proficuidade do fenômeno piezoelétrico na geração de energia elétrica, pois o comportamento apresentado pelos transdutores são propício para tais aplicações, podendo ser empregados em sistemas que receba um ciclo constante de pressão mecânica.

5.1 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Uma boa proposta de trabalho futuro é estudar a viabilidade de implantação do sistema de geração por piezoeletricidade.

Outra sugestão seria o estudo da resistividade das pastilhas piezoelétricas a fim de verificar a máxima pressão suportada por um transdutor, e dessa maneira descobrir a máxima de corrente e tensão que ele consegue gerar sem se romper, para determinar quais locais podem ser aplicado sem se danificarem.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATCP ENGENHARIA FÍSICA. Soluções Piezoelétricas, Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/>>. Acesso em: 06 out. 2016.
- BALOUSSIER, Anna. Balada Sustentável.,2008. Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/atitude/conteudo_303779.shtml>. Acesso em: 27 out. 2016.
- Campos, Augusto. Do LED ao Arduino, 2014. Acesso em: <<http://br-arduino.org/2014/11/meu-primeiro-circuito.html>>. Acesso em: 23 nov. 2016.
- CALLISTER, W.D. Materials Science and Engineering: An Introduction. John Wiley & Sons, E.U.A, 5ed., 2006
- CAMPOS, F. G. R. D. Geracao de energia a partir de fonte eolica com gerador assincrono conectado a conversor estatico duplo. campos, f. g. r. d. geração de energia a partir de fonte eólica com gerador assíncrono, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.
- CHENG, S. Y., Fu, S. L. and Wei, C. C., Low-temperature sintering of PZT ceramics. Ceramics International, v.13, 1987, p. 223-231.
- COELHO, Marcos Antônio Jeremias. Avaliação e Analise de um sistema de micro geração de energia baseado no efeito piezelétrico; Universidade do Rio Grande do Sul. 2015, P. 27.
- EIRAS , José Antonio. Materiais Piezoelétricos. Grupo de Cerâmicas Ferroelétricas Departamento de Física - Universidade Federal de São Carlos. 2004.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. Issues in mathematical modeling of piezoelectric energy harvesters. Smart Materials and Structure, p. 14, 2008.
- FRAGMAQ. Entenda os problemas da crise energética no mundo. Fragmaq.2013. Disponível em: <<http://www.agmaq.com.br/blog/entenda-os-problemas-da-crise-energetica-no-mundo/>>. Acesso em: 17 out. 2016.
- Franco, Gabriel. Regressão Linear; Escola Edti.2015. Disponível em: <<http://www.escolaedti.com.br/o-que-e-regressao-linear-entenda-aqui/>>. Acesso em: 20 nov. 2015.
- GALDINO, Any Karolyne. Curitiba foi escolhida para testar ciclovias que geram energia a partir do movimento, 2016. Disponível em: <<http://engenhariae.com.br/meio-ambiente/curitiba-foi-escolhida-para-testar-ciclovias-que-geram-energia>> Acesso em: 27 out. 2016.
- HARRIS, Tom. Componentes eletrônicos.2011. Disponível em:<<http://tecnologia.hsw.uol.com.br/led1.htm>>. Acesso em: 22 out. 2016.
- HARVEY, James A. Smart Materials. In: Kutz, M. Handbook of Materials Selection, Ed. John Wiley & Sons, E.U:A, 2002.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. Energia e Meio ambiente. 4a. ed. São Paulo: Pioneira Thompson Learning, 2011. Cap. 11, p. 308-330.

JULIÃO, André. Energia limpa sob nossos pés, 2016; Disponível em: <http://istoe.com.br/73214_*ENERGIA+LIMPA+SOB+NOSSOS+PES/>. Acesso em: 23 out. 2016.

KATZIR, S. The discovery of the piezoelectric effect, *Archive for History of Exact Sciences*. 57(1), 61-91.

LEITE, Alécio Almeida et al. Capacitores aplicados em motores. UNIVERSIDADE ANHANGUERA – UNIDERP. 2010.

LICCARDO, Antônio. A cristalografia e sua correlação com a gemologia. 2007, p.13. Disponível em: <<http://www.geoturismobrasil.com/Material%20didatico/02%20-%20Cristalografia%20e%20gemologia.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resenha Energética Brasileira, 2016. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2016+-+Ano+Base+2015+\(PDF\)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4;version=1.0](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2016+-+Ano+Base+2015+(PDF)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4;version=1.0)>. Acesso em: 10 out. 2016.

NADER, G.. Desenvolvimento de técnicas de caracterização de transdutores piezoelétricos, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecatrônica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2002.

PETERNELLI, Luiz Alexandre. Regressão linear e correlação, cap. 9. Disponível em: <<http://www.dpi.ufv.br/peternelli/inf162.www.16032004/materiais/CAPITULO9.pdf>> Acesso em: 21 nov. 2016.

REDAÇÃO PENSAMENTO VERDE. Tudo sobre a crise energética brasileira e mundial. Pensamento Verde, 2014. Disponível em: <<http://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/tudo-sobrecrise-energetica-brasileira-e-mundial/>>. Acesso em: 18 out. 2016.

REIS, L. B. D. Geração de energia elétrica. 2a. ed. Barueri: Manole Ltda, 2011. Cap. 5.

SANTOS, Marco Aurélio da Silva. Capacitores, Brasil Escola. 2011. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/fisica/capacitores.htm>>. Acesso em: 28 nov. 2016.

SANTOS, Diego Marcelo. LED - Diodo Emissor de Luz, Info Escola. 2008. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/electronica/led-diodo-emissor-de-luz/>>. Acesso em: 20 nov. 2016

TEXEIRA, E. C.; RODRIGUES, M. D. C. B.; BRAGA, H. A. C. UMA VISÃO TOPOLOGICA SOBRE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS MONOFASICOS CONECTADOS A REDE DE ENERGIA ELETRICA; Universidade Federal de Juiz de For. Juiz de fora. 2003.

TEIXEIRA, Mariane Mendes. Diodo semicondutor, Mundo educação. 2010. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/diodo-semicondutor.htm>>. Acesso em: 20

nov. 2016.

TILLEY, Richard J. D. Cristais e estruturas cristalinas, *Cristalografia* 2014, cap. 1. Pag. 54. . ZILES, R.; BENEDITO, R. Série energia e sustentabilidade - Energias Renováveis. 1a. ed. [S.l.]: Edigar Blucher, 2012. Cap. 3, p. 26-39.