



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
Curso de Engenharia Mecânica

HELOYANE DA SILVA BEZERRA

ROSALIA SOUSA ANDRADE

**Proposta do uso de Pastilhas Piezoelétricas
para Conversão de Energia Mecânica em
Energia Elétrica**

SÃO LUIS/MA
2018

HELOYANE DA SILVA BEZERRA

ROSALIA SOUSA ANDRADE

Proposta do uso de Pastilhas Piezoelétricas para Conversão de Energia Mecânica em Energia Elétrica

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DEFENDIDA PELAS ALUNAS HELOYANE DA SILVA BEZERRA E ROSALIA SOUSA ANDRADE, E ORIENTADA PELO PROF. DR FERNANDO LIMA DE OLIVEIRA


.....
ASSINATURA DO ORIENTADOR

**SÃO LUIS/MA
2018**

Bezerra, Heloyane da Silva.

Proposta de uso de pastilhas piezoelétricas para conversão de energia mecânica em energia elétrica / Heloyane da Silva Bezerra, Rosália Sousa Andrade. – São Luís, 2018.

100 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira.

1.Energy harvesting. 2.Piezoeletricidade. 3.Energia elétrica - Geração.
I.Andrade, Rosália Sousa. II.Título

CDU: 621.31:537.226.86

Elaborado por Giselle Frazão Tavares- CRB 13/665

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Proposta do uso de Pastilhas Piezoelétricas
para Conversão de Energia Mecânica em
Energia Elétrica**

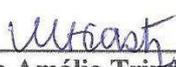
Autoras: Heloyane da Silva Bezerra / Rosalia Sousa Andrade

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira

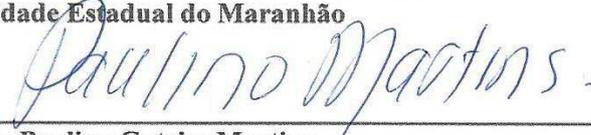
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:



Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Mc. Maria Amália Trindade de Castro
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Mc. Paulino Cutrim Martins
Universidade Estadual do Maranhão

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís/MA, 28 de Junho de 2018.

Dedicatória

Dedicamos esse trabalho, que é a concretização de uma das primeiras grandes realizações de nossas vidas, principalmente, às nossas famílias, que são nossa base e maiores apoiadores.

Agradecimentos

Agradeço a Deus acima de tudo por ter me abençoado e guiado nesta trajetória até aqui.

Ao professor e orientador Fernando Lima que sempre esteve disposto a me auxiliar nesse trabalho.

Aos meus pais Angilene e Elói que sempre me apoiaram nos estudos, me deram força e confiaram em mim e também a minha irmã Heloyne que sempre me deu força e levantou minha cabeça nas muitas vezes que eu estava triste por não ter conseguido alcançar alguns objetivos, mas que no final deu tudo certo. Ao meu cunhado Manoel Junior por também, juntamente com minha irmã, ter me dado maior apoio com assuntos no decorrer do curso.

A todos meus colegas de curso que adquiri e que enfrentamos juntos todas as dificuldades, provas, trabalhos e todas as alegrias geradas por essa união que nos fizeram crescer e nos tornamos verdadeiros amigos.

Quero agradecer imensamente a professora Amália, primeira por ter sido uma amiga durante toda formação e segundo por ter sido uma ótima orientadora durante a iniciação científica, cujo tema possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao programa PIBITI/UEMA, por fomentar a parte de iniciação científica usada nesse projeto.

A minha amiga Rosália, que também é minha dupla nesse trabalho de conclusão de curso, sou muito grata por estar sempre do meu lado, tanto nas horas de estudo como nos momentos de diversão.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para que eu pudesse chegar até aqui, colaborando para meu crescimento pessoal e intelectual.

Heloyane S. Bezerra.

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me acompanhar em todas as minhas trajetórias, apesar de que eu nem sempre reconheça a sua graça ou, mesmo, a mereça.

Agradeço ao nosso orientador, Fernando Lima, primeiro, por aceitar nos orientar e segundo pela disposição em ajudar sempre. Esse trabalho também é dedicado a você.

Agradeço a minha mãe, Rosaila, que da sua maneira, sempre me demonstrou seu amor da melhor maneira possível, em todas as etapas e situações da minha vida. Te amo.

Agradeço aos meus irmãos Ingrid e Jhonnata e aos meus amigos Beatriz e Wallace, que sempre me enxergaram como sendo bem mais do que sou, o que me incentiva a tentar sempre ser mais, além de todo apoio em qualquer questão e situação. Peço, inclusive, desculpas por todas as situações preocupantes. Vocês são os melhores.

Agradeço a Heloyane, minha companheira de curso, de vida e de trabalho de conclusão de curso, que me permitiu contribuir para o desenvolvimento deste trabalho, que escuta todas as minhas besteiras e me aceita como sou.

Aproveito pra agradecer ainda à algumas pessoas que me inspiraram e são motivo de grande admiração, como meu Prof^o Marcelino Diniz, que se foi muito cedo; os engenheiros e todo o pessoal da CAEMA, que me ensinaram muitas coisas; Josué Cutrim e Gabriel Aguiar, que são seres iluminados, Prof^o Lourival matos, que me iniciou cientificamente e me orientou; Marcia Maranhão, que é um exemplo incrível de mulher; Rodrigo Menezes, que já me fez muitas músicas (duas) e é um espectador do tipo torcedor; Edilson Vidal, que é genial; e Marco Junior, por sempre apoiar e ser um exemplo.

Por fim, minha gratidão a todos (não foram poucos), que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação pessoal e acadêmica.

Muito obrigada,

Rosalia S. Andrade.

“As vibrações das forças mentais são as mais sutis e, conseqüentemente, as mais poderosas que existem”.

Charles Hannel

Resumo

Atualmente há uma constante busca do uso de fontes de energias alternativas como artifício para produzir eletricidade. Várias pesquisas estão em desenvolvimentos na área da conversão de energias associadas a conversão de energia vibracional do ambiente em energia elétrica conhecida como vibration-based energy harvesting, que é estudado juntamente com utilização de elementos piezoelétricos. O seu funcionamento ocorre quando se utiliza pastilhas piezoelétricas para o reaproveitamento de energia vibratória, a partir de movimentos mecânicos. Estas pesquisas têm se tornado crescente e vem contribuindo com diversos avanços tecnológicos na engenharia em geral e ocupando um espaço importante no projeto de sistemas mecânicos. Neste contexto, este trabalho objetiva apresentar uma proposta para uso de pastilhas piezoelétricas (no formato de tapetes) como gerador de energia elétrica para alimentação de pequenas cargas. Através de testes experimentais foi observado que as pastilhas que foram submetidas a um esforço apresentam um momento elétrico, cuja intensidade é proporcional ao esforço aplicado sobre o sistema piezoelétrico. Foram feitos testes experimentais para verificar o tipo de associação (se em série e/ou paralelo) entre as pastilhas que configuram o melhor desempenho e eficiência do sistema tipo tapete piezoelétrico. Os resultados mostraram que as pastilhas mesmo quando excitadas a baixas pressões, conseguem gerar uma diferença de potencial e corrente elétrica. Foi necessário utilizar circuito regulador de tensão do tipo LTC 3588, que é constituído de um retificador de onda completa e um conversor DC-DC Buck (abaixador) para que a tensão seja regulada na sua saída, e possa ser armazenada em baterias recarregáveis. Observou-se também, que a montagem das pastilhas piezoelétricas no tipo de associação em paralelo apresenta vantagens em relação à associação em série. E, além disto, conclui-se que é possível a utilização de pastilhas piezoelétricas como gerador de energia elétrica, sendo considerado como solução alternativa para alimentação de pequenas cargas.

Palavras-chave: *Energy harvesting; piezoelectricidade; geração de energia elétrica.*

Abstract

Currently there is a constant search for the use of alternative energy sources such a device to produce electricity. Several researches are in developments in the area of energy conversion associated with converting vibrational energy into electrical energy environment known as vibration-based energy harvesting, studied along with use of elements piezoelectric. Its operation occurs when piezoelectric pellets are used for the reuse of vibratory energy, from mechanical movements. This research has been growing and has been contributing to several technological advances in engineering in general and occupying an important space in the design of mechanical systems. In this context, this work aims to present a proposal for the use of piezoelectric pellets (in the form of carpets) as an electric power generator for feeding small loads. Through experimental tests it was observed that the pastilles that were submitted to an effort present an electric moment, whose intensity is proportional to the applied effort on the piezoelectric system. Experimental tests were performed to verify the type of association (if in series and / or parallel) between the inserts that configure the best performance and efficiency of the piezoelectric mat type system. The results showed that the pellets, even when excited at low pressures, can generate a potential difference and electric current. It was necessary to use a voltage regulator circuit of type LTC 3588, which is a full-wave rectifier and a DC-DC Buck converter so that the voltage is regulated at its output and can be stored in rechargeable batteries. It was also observed that the assembly of the piezoelectric pellets in the parallel association type has advantages over the series association. In addition, it is concluded that it is possible to use piezoelectric pellets as an electric power generator, being considered as an alternative solution for feeding small loads.

Keywords: *Energy harvesting; piezoelectricity; electric power generation.*

Lista de Ilustrações

Figura 2.1. Consumo de energia primária por fonte de energia	29
Figura 2.2. Composição do consumo de energia elétrica brasileira	31
Figura 2.3. Hierarquia principal de tecnologias de <i>energy harvesting</i>	32
Figura 2.4. Projeção do mercado para tecnologia de <i>energy harvesting</i>	33
Figura 2.5. Efeito piezoelétrico explicado com um modelo molecular simples	37
Figura 2.6. Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezoelétrico	37
Figura 2.7. Fenômeno piezoelétrico	38
Figura 2.8. Estrutura cristalina de uma cerâmica piezoelétrica tradicional (BaTiO ₃) à temperatura acima (a) e abaixo (b) ponto de Curie	41
Figura 2.9. Malha piezoelétrica de nanogeradores dentro do pneu	47
Figura 2.10. Placa geradora de energia	48
Figura 2.11. Instalação do IPED PADS piezoelétricos nos trilhos	49
Figura 2.12. Montagem do IPEG PADS piezoelétricos	50
Figura 2.13. Modelos elétricos equivalentes do elemento piezoelétrico	51
Figura 2.14. Retificador de meia onda	52
Figura 2.15. Retificador em ponte com diodos	53
Figura 2.16. Apresentação das etapas de funcionamento de um circuito retificador em ponte	54
Figura 2.17. Transdutor Piezoelétrico	56
Figura 2.18. Ligação de transdutores em série	57
Figura 2.19. Ligação de transdutores em paralelo	58
Figura 3.1. Esquema da metodologia para desenvolvimento do trabalho	59
Figura 3.2. Materiais utilizados como base, (a) papelão, (b) poliestireno de alto impacto e (c) borracha EVA	61
Figura 3.3. Pastilha piezoelétrica e sua composição	61
Figura 3.4. Dimensões da pastilha piezoelétrica	62
Figura 3.5. Circuito série (esquerda) e circuito paralelo (direita)	64
Figura 3.6. Diagrama do procedimento do experimento realizado	64
Figura 3.7. Ligação do circuito em série	67
Figura 3.8. Ligação do circuito em paralelo	67
Figura 3.9. Carga mecânica, tarugo de 900g	67
Figura 3.10. Aparelho para estudo de queda livre com anteparo e eletroimã	68

Figura 3.11. Montagem do experimento	68
Figura 3.12. Circuito com 4 pastilhas ligadas em paralelo	70
Figura 3.13. Circuito com 8 pastilhas ligadas em paralelo	70
Figura 3.14. Circuito com 12 pastilhas ligadas em paralelo	71
Figura 3.15. Carga mecânica de 1Kg usada no experimento	71
Figura 4.1. Análise do circuito série para massas de 1 a 5 Kg	76
Figura 4.2. Análise do circuito paralelo para massas de 1 a 5 Kg	76
Figura 4.3. Comparação dos resultados dos circuitos série e paralelo	77
Figura 4.4. Comparação da potência média do circuito série e paralelo, aplicando-se uma carga de 900g	79
Figura 4.5. Análise da média da tensão para 4, 8 e 12 pastilhas em paralelo, para uma força peso de aproximadamente 9,98N	80
Figura 4.6. Análise da média da corrente para 4, 8 e 12 pastilhas em paralelo, para uma força peso de aproximadamente 9,98N	80
Figura 4.7. Análise da média da potência para 4, 8 e 12 pastilhas em paralelo, para uma força peso de aproximadamente 9,98N	81
Figura 4.8. Sinal de resposta de uma pastilha piezoelétrica sem circuito retificador visualizado através de osciloscópio	83
Figura 4.9. Sinal de resposta de uma pastilha piezoelétrica com circuito retificador visualizado através de osciloscópio	83
Figura 4.10. Gráfico comparativo da média da tensão máxima para uma pastilha sem retificador e com retificador	84
Figura 4.11. Componente regulador de tensão LTC 3588	85
Figura 4.12. Sinal de piezoelétricos retificado com LTC-3588	86
Figura 4.13. Esquema do gerador piezoelétrico conectado ao retificador e conversor DC-DC	87

Lista de Quadros

Quadro 2.1. Potências tipicamente fornecidas por várias tecnologias de energy harvesting	32
Quadro 3.1. Datasheet CUI INC - CEB-27FD44	62
Quadro 3.2. Datasheet CUI INC - CEB-35D26	63
Quadro 3.3. Precisão do multímetro Minipa modelo ET 1002 em tensão DC	64
Quadro 3.4. Valores das tensões de saída do circuito série	65
Quadro 3.5. Valores das tensões de saída do circuito paralelo	66
Quadro 3.6. Testes com pastilhas em série com a carga mecânica de 900g	69
Quadro 3.7. Testes com pastilhas em paralelo com a carga mecânica de 900g	69
Quadro 3.8. Valores das tensões de saída do circuito paralelo	72
Quadro 3.9. Dados do comportamento da pastilha piezoelétrica sem o circuito e com circuito retificador	73
Quadro 3.10. Dados de tensão, corrente e potência para excitação mecânica de 70Kg	74
Quadro 4.1. Matriz de decisão para escolha do armazenador de energia	85
Quadro 4.2. Custos estimados dos materiais para alimentar uma lâmpada LED de 8W	87

Sumário

1	INTRODUÇÃO	26
1.1	Objetivos	27
1.1.1	Objetivo Geral	27
1.1.2	Objetivos Específicos	27
1.2	Justificativa	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	Energia Alternativa	29
2.2	Power Harvesting	31
2.2.1	Energia solar	33
2.2.2	Energia térmica	34
2.2.3	Energia mecânica	34
2.3	Piezoelasticidade	34
2.3.1	Conceito e história da piezoelasticidade	34
2.3.2	Efeito Piezoelétrico	36
2.4	Materiais Inteligentes	38
2.5	Materiais Piezoelétricos	40
2.5.1	Cristais	41
2.5.1.1	Quartzo	41
2.5.1.2	Niobato de lítio (LiNbO_3 - LN) e tantalato de lítio (LiTaO_3 -LT)	43
2.5.2	Cerâmicas	43
2.5.3	Polímeros	44
2.5.4	Compósitos	44
2.6	Aplicações de materiais piezoelétricos para geração de energia	45
2.6.1	Pneus capazes de gerar energia	46
2.6.2	Boates com piso gerador de energia	47
2.6.3	Geradores piezoelétricos em trilhos de trem	49
2.7	Sistema de Extração de potência transdutores piezoelétricos	50
2.7.1	Transdutor piezoelétrico	50
2.7.2	Circuito equivalente elétrico de uma estrutura piezoelétrica	51

2.7.3	Circuito retificador	52
2.7.3.1	Retificador de meia onda	52
2.7.3.2	Retificador em ponte	53
2.7.4	Armazenamento de energia gerada	55
2.8	Circuitos elétricos	56
2.8.1	Circuito em série	57
2.8.2	Circuito em paralelo	57
3	METODOLOGIA	59
3.1	Materiais	60
3.2	Pastilha Piezoelétrica	61
3.3	Teste comparativo de tipo de ligação mais eficiente do circuito piezoelétrico para várias cargas mecânicas	63
3.4	Teste comparativo de tipo de ligação mais eficiente do circuito piezoelétrico para uma carga mecânica	66
3.5	Teste da quantidade de pastilhas piezoelétricas	70
3.6	Avaliação do uso de retificadores para pastilhas piezoelétricas	72
3.7	Aferição de dados elétricos para uma carga mecânica de 70Kg	73
4	RESULTADOS	75
4.1	Análise da eficiência de geração energética segundo o tipo de ligação para várias cargas mecânicas	75
4.2	Análise da eficiência de geração energética segundo o tipo de ligação para uma carga mecânica	78
4.3	Análise da eficiência de geração energética segundo a quantidade de pastilhas piezoelétricas	79
4.4	Análise de circuito de retificação em pastilhas piezoelétricas	82
4.5	Sistema de extração de potência	84
4.6	Custos econômicos	87
5	CONCLUSÃO	89
5.1	Estudos futuros	91
	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

O aumento constante da utilização e busca de meios de gerar eletricidade associados com a, também crescente, escassez de recursos naturais tem encorajado o uso de fontes de energia alternativas como artifício para produzir eletricidade. Segundo Gomes, Landim e Alvarenga (2016), vários estudos estão sendo desenvolvidos na área da conversão de energias associadas a natureza (solar, vibração, eletromagnética) em energia elétrica. Esses estudos, como menciona Du Toit (2005), surgem do conceito de *energy harvesting*, ou seja, o processo de retirar energia de fontes externas (ambiente) e armazená-la.

Um tema que tem recebido crescente atenção na última década, e sem dúvida, é uma técnica que vem contribuindo com diversos avanços tecnológicos na engenharia em geral e ocupando um espaço importante no projeto de sistemas mecânicos, é a conversão de energia vibracional do ambiente em energia elétrica, que, com base nos estudos de Mineto (2013), é conhecida como *vibration-based energy harvesting*, sendo que esse tipo de conversão é estudado juntamente com utilização de elementos piezoelétricos.

Ainda conforme Mineto (2013), a piezoelectricidade é uma propriedade que certos materiais possuem de se tornarem eletricamente polarizados quando sujeitos a algum tipo de tensão mecânica ou, ao contrário, de sofrerem alguma deformação mecânica quando recebem uma carga elétrica. Então, como aponta Padilha (2000), os materiais piezoelétricos podem ser usados como transdutores entre as energias elétrica e mecânica.

Geradores de energia piezoelétricos convertem energia de vibrações mecânicas a partir do efeito piezoelétrico. Uma das principais vantagens deste tipo de material na geração de energia, é que quando uma vibração é aplicada, uma tensão de saída pode ser diretamente obtida. Esta tensão surge através das leis constitutivas do material (MINETO, 2013).

Uma das primeiras aplicações dos materiais piezoelétricos foi em sonares, durante a Primeira Guerra Mundial na França, em 1917, quando Paul Langevin desenvolveu um detector de submarinos, como é salientado por Cady (1964). A piezoelectricidade é encontrada em aplicações tecnológicas tais como elementos sensores e/ou atuadores desde baixas até altas frequências. Nas baixas frequências são utilizados materiais policristalinos que incluem

cerâmicas, polímeros e compósitos, enquanto que nas aplicações de altas frequências são mais utilizados cristais e filmes finos (FREITAS, 2012).

Níveis de vibrações úteis para um acoplamento piezoelétrico são encontrados em uma grande quantidade de aplicações que inclui o movimento do corpo humano, que é o foco desta proposta; aparelhos domésticos e de uso pessoal; movimentos de estruturas tipo automóveis, aviões, prédios e pontes, como enfatizado por Cellular (2016). A energia elétrica resultante do processo de coleta de energia depende da quantidade de energia cinética do movimento (vibração) e do poder de conversão elétrica (WILLIAMS; YATES, 1996).

Em razão da necessidade cada vez maior do uso de fontes de energia alternativas, além da possibilidade de aproveitamento da energia do ambiente para gerar energia elétrica, pensou-se no uso de pastilhas piezoelétricas para conversão de energia mecânica em energia elétrica, valendo-se da pressão proveniente dos movimentos exercidos por pedestres ao caminhar em um local de grande movimentação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Propor a viabilidade do uso de um tapete de pastilhas piezoelétricas para conversão de energia mecânica em energia elétrica em ambientes de grande movimentação.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar um estudo sobre o uso de pastilhas piezoelétricas prevendo conversão de energia mecânica em energia elétrica;
- Verificar a configuração mais eficiente para uso de pastilhas piezoelétricas em tapete para converter energia mecânica em energia elétrica;

- Avaliar a possibilidade de aplicação do uso das pastilhas;
- Apresentar um estudo de custos de materiais para a construção de um tapete piezoelétrico para geração de energia elétrica.

1.2 Justificativa

O uso de fontes alternativas de geração de energia estimula o desenvolvimento tecnológico, trazendo também benefícios econômicos indiretos a partir da difusão do uso, como a geração de empregos para a fabricação de componentes, estímulos para a investigação científica, além de segmentar a produção de energia, levando oportunidades para diversas localidades, como foi apontado por Villalva, Gazoli (2012).

Este trabalho apresenta uma, ainda recente e pouco estudada, maneira de gerar eletricidade, com o emprego de circuitos eletrônicos e transdutores piezelétricos de baixo custo em um sistema de *power harvesting* para reaproveitando da energia mecânica oriunda de estímulos mecânicos, causados pelo caminhar de pedestres no carregamento de baterias, podendo ser destinados na alimentação de circuitos eletrônicos, iluminação pública, entre outros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Energia Alternativa

A energia alternativa, conforme Ferreira (2017) é aquela que se utiliza do uso de fontes naturais e renováveis, pouco ou não poluentes. Essas fontes alternativas de energias renováveis seriam mais vantajosas para diminuir a agressão do meio ambiente e de alguma forma contribuir positivamente com a matriz energética, pois com a degradação do meio ambiente o mundo poderá sofrer sérios problemas energéticos no futuro. Sobre o tema Guilherme URSAIA (2011) enfatiza que, “em relação aos recursos não renováveis, ênfase aos combustíveis fósseis, a sustentabilidade apresenta-se como uma questão de tempo, pois, ocorrendo uma exploração continuada de tais fontes, os seus limites físicos serão eventualmente esgotados”.

As projeções da figura 2.1, em que Mtep é milhões de toneladas equivalentes de petróleo, levam a uma conclusão que o consumo de energia aumenta em todas as fontes de energia, principalmente as fontes de energia não renováveis. De acordo com ANEEL (2010), no Brasil, a principal fonte de geração de energia elétrica é a hidráulica, em seguida encontra-se a geração térmica.

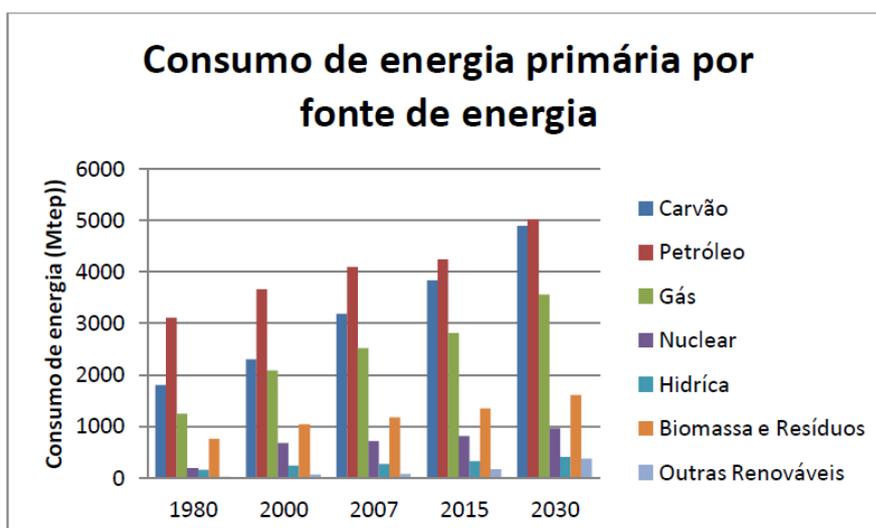


Figura 2.1. Consumo de energia primária por fonte de energia (Iea, 2009)

No século XX, com a crise de energia na década de 70, em que o mundo percebeu sua exagerada dependência por combustíveis fósseis, ocorreu um despertar para a necessidade de se buscar fontes alternativas às fontes fósseis (JANNUZZI; VARELLA; GOMES, 2009).

Já são vários os casos de sucesso obtidos internacionalmente a partir do uso de fontes renováveis, muitos deles nos países europeus, conforme os estudos de Dupont et al (2015). A Dinamarca é o país líder na participação da energia eólica em sua matriz. Somando com a geração a partir de biomassa e de painéis fotovoltaicos em 2013 o país gerou 60% de toda a energia consumida a partir de fontes renováveis. Outros países que vêm seguindo esse perfil são Portugal, que em 2013 gerou 30% de sua energia a partir de fontes renováveis, e Espanha cuja parcela renovável de energia no mesmo período somou 27%.

Como fontes alternativas e renováveis para geração de energia elétrica, no Brasil, observam-se o crescimento do uso da biomassa, dos ventos e da proliferação de pequenas centrais hidroelétricas, todas impulsionadas pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (ENEEL, 2009). De maneira geral, as fontes de energia renovável fornecem apenas uma fração da energia se comparado com as grandes centrais (DUPONT; GRASSI; ROMITTI, 2015). Diante disso, surge um novo padrão, conforme relatado por Villar (2016), que é o uso da geração de energia através de fontes renováveis próxima dos consumidores, tais como em locais residenciais, comerciais ou industriais.

A Figura 2.2 aponta um aspecto importante a ser analisado, além da própria geração de energia elétrica, que é o destino ou consumo dessa energia. Segundo o Balanço Energético Nacional, a maior parcela da energia consumida destina-se às indústrias, representando pouco mais de 34% do consumo. Uma das fatias que merece destaque nesse estudo e proposta é a do consumo Público, que representa quase 7% da energia gerada elétrica consumida no país. Esta proposta pretende destinar a energia elétrica gerada através do uso de transdutores piezoelétricos para esta porção correspondente ao consumo público, o que não desqualifica a utilização em indústrias.

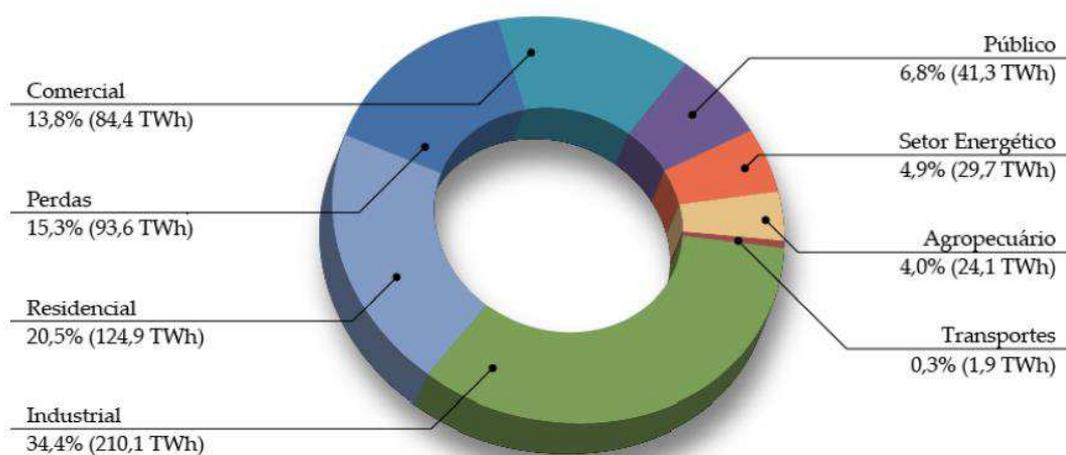


Figura 2.2. Composição do consumo de energia elétrica brasileira (Empresa de pesquisa energética, 2014)

2.2 Power Harvesting

A denominação “*Energy harvesting*” pode ser traduzida, literalmente como “colheita de energia”, no sentido de enaltecer o processo de extração de energia do próprio local em que o dispositivo que a consome se encontra. Outras denominações comumente empregadas são “*Power Harvesting*”, “*Energy scavening*” e “*Free Energy*” (JABBAR et al, 2010).

O *energy harvesting* consiste em aproveitar alguma forma de energia do ambiente para gerar energia elétrica, ou seja, é a aquisição e conversão de alguma fonte ambiental de energia em energia elétrica utilizável (SOUZA, 2011).

Nos últimos anos, as pesquisas têm proposto *power harvesting* aproveitando, principalmente, as seguintes fontes de energia ambiental: energia solar, energia térmica e energia mecânica. Segundo Santos (2015), é possível efetuar a classificação das principais tecnologias de *energy harvesting* de forma hierárquica, como mostra a figura 2.3.

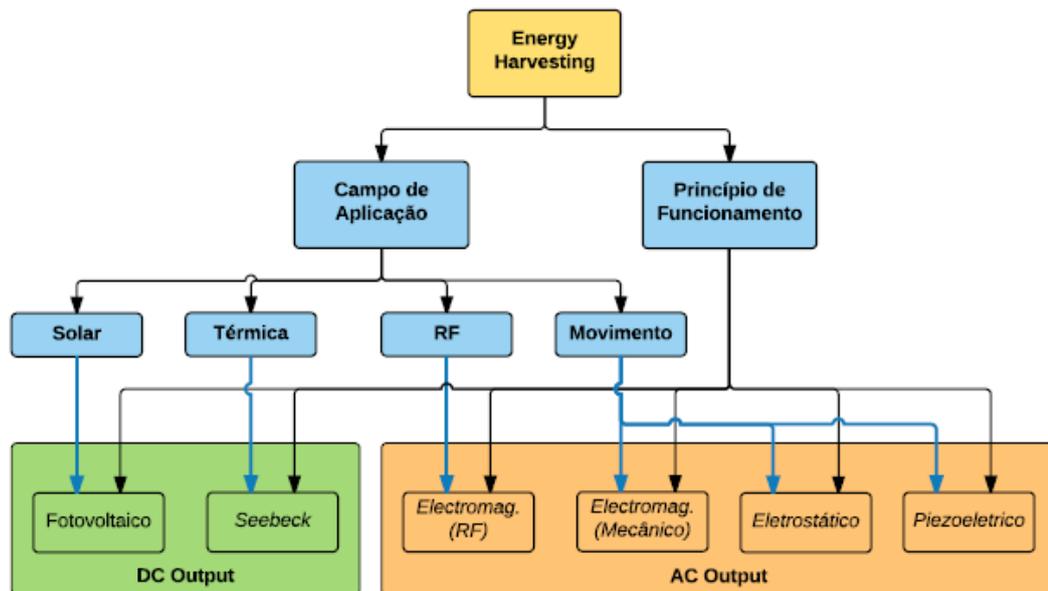


Figura 2.3. Hierarquia principal de tecnologias de *energy harvesting* (Adaptado de Santos, 2015)

Como, de acordo com Santos (2015), é importante conhecer qual a potência típica fornecida por este tipo de soluções, por unidade de área ou volume, para tal é apresentada o Quadro 2.1 que relaciona o tipo de tecnologia usada, o meio em que está aplicada e a potência fornecida.

Quadro 2.1. Potências tipicamente fornecidas por várias tecnologias de *energy harvesting* (Adaptada de Santos, 2015 com base em Carpenter et al., 2012)

Fonte de Energy Harvesting	Ambiente Local	Harvester potência	Haverter Considerações	Circuito considerações
Luz	Interior	$10\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Intensidade de luz e comprimento de onda	MPPT necessário
	Exterior	$10\text{mW}/\text{cm}^2$		
Mecânica vibração Piezoelétrica	Humanos	$4\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Vibração da amplitude e frequência de ressonância	Necessário conversor AC/DC
	Máquinas	$250\mu\text{W}/\text{cm}^2$		
Mecânica vibração Eletromagnética	Humanos	$50\mu\text{W}/\text{cm}^3$		
	Máquinas	$50\mu\text{W}/\text{cm}^3$		
Térmica	Humanos	$25\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Gradientes térmicos e fluxos de calor	Baixa tensão de arranque
	Máquinas	$10\text{mW}/\text{cm}^2$		
Ondas Rádio	Indireta	$0,1\mu\text{W}/\text{cm}^2$	Distância da fonte e antena ressonante	Boa eficiência, baixa de tensão de retificação
	Direta	$1\text{mW}/\text{cm}^2$		

As tecnologias baseadas no conceito de *energy harvesting* são atualmente objeto de estudo, tanto pela comunidade acadêmica quanto pela indústria, devido ao enorme potencial destas em modificar paradigmas no projeto de dispositivos eletrônicos de baixo consumo (DEPEXE, 2014).

O desenvolvimento de tecnologias baseadas no conceito de *energy harvesting* tem potencial para modificar a indústria de dispositivos eletrônicos nas próximas décadas, seja pelo desenvolvimento de novos produtos ou pela adaptação daqueles já existentes (DEPEXE, 2014).

Tal qual relata Depexe (2014) nos seus estudos, uma pesquisa de mercado promovida pela *Yole Development* em 2012 indicou que até 2017, o mercado mundial de tecnologias de *energy harvesting* ultrapassaria os 200 milhões de dólares, devido principalmente às aplicações em automação industrial e residencial, seguido de aplicações em transportes (BONNABEL e CHARENTENAY, 2012). A figura 2.4 apresenta a projeção de mercado para este tipo de tecnologia de 2011 a 2017.

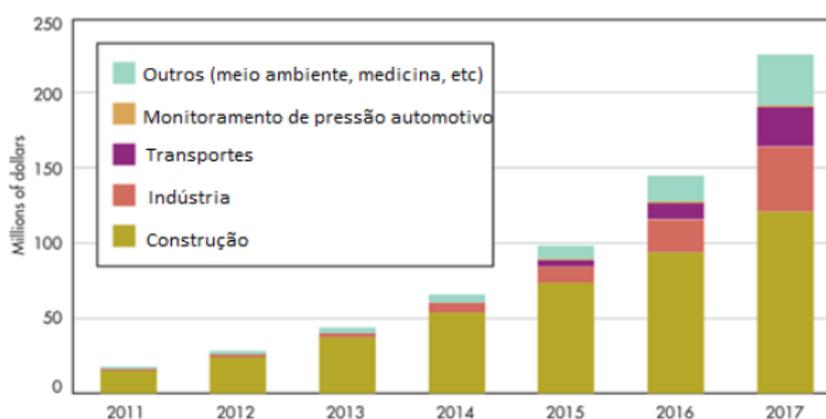


Figura 2.4. Projeção do mercado para tecnologia de energy harvesting (Adaptado de Depexe, 2014 com base em Bonnabel e Charentenay, 2012)

2.2.1 Energia solar

A energia solar é das mais importantes fontes de energia renováveis que tem ganho atenção nos últimos anos, a sua elevada abundância relativamente às outras fontes de energia faz com que seja muito utilizada. A quantidade de energia fornecida à terra pelo sol durante um dia é

suficiente para estabelecer as necessidades totais da terra durante um ano (KHALIGH, ONAR, 2009).

2.2.2 Energia térmica

Ambientes que contenham naturalmente gradientes de temperatura e fluxos de calor têm potencial para gerar eletricidade, para tal é necessário usar a conversão de energia termoelétrica. A diferença de temperatura oferece o potencial para a conversão de energia, enquanto que o fluxo de calor fornece a potência. Para sistemas com requisitos de baixo consumo energético, dando um exemplo, sensores remotos de monitorização ambiental, esta solução de energy harvesting tem se mostrado viável (PRIYA, INMAN, 2008).

2.2.3 Energia mecânica

Em ambientes ou sistemas mecânicos onde existem vibrações, como por exemplo, sistemas de suspensões de veículos, é possível gerar energia elétrica recorrendo a certos transdutores. Como cita Souza (2011), A conversão de vibração em energia elétrica pode ser baseada na frequência de ressonância do dispositivo mecânico ou pelo impacto causado por uma força externa. Existem três transdutores que fazem esta conversão: piezoeletrico, eletrostático e eletromagnético. Está presente proposta estuda o transdutor a regime de piezeletricidade.

2.3 Piezoeletricidade

2.3.1 Conceito e história da piezoeletricidade

A palavra piezoeletricidade vem da palavra grega *piezein* – pressionar firmemente ou apertar. Piezoeletricidade é a propriedade, presente em alguns materiais, pela qual a polarização

é induzida e um campo elétrico é estabelecido através de um espécime em resposta à aplicação de uma força externa (CALLISTER, 2000).

Em 1817, René-Just Haüy observou que certos cristais apresentavam efeitos elétricos quando 7 comprimidos, efeito que foi confirmado três anos depois por Antoine-César Becquerel (GRAFF, 1981).

De acordo com Souza (2006), em 1880, Pierre e Jacques Curie publicaram a primeira demonstração experimental de uma ligação entre o fenômeno piezoelétrico macroscópico e a estrutura cristalizada, o que lhes atribui a descoberta propriamente dita. No seu experimento cargas foram detectadas na superfície de cortes específicos do cristal desencadeadas pela colocação de pesos nestas superfícies. Adicionalmente, foi demonstrado que a magnitude da carga era proporcional à força aplicada (HARVEY, 2002), e foi possível prever as classes de cristais e condições sob as quais o efeito piezoelétrico apareceria (TRAINER, 2003). Em 1881 Gabriel Lipmann sugeriu a possibilidade de que o efeito inverso também poderia ocorrer – o que se provou correto pelo trabalho dos Curie no mesmo ano (HARVEY, 2002; TRAINER, 2003).

Segundo Farret (2014) este efeito da piezoelectricidade foi usado no desenvolvimento de sonares durante a primeira guerra mundial por Paul Langevin, que o utilizou em uma primeira tentativa de aplicação prática. Langevin acoplou cristais de quartzo a massas metálicas (coincidentalmente, inventando o transdutor tipo Langevin) para gerar ultrassom na faixa de algumas dezenas de KHz's.

Silva (2017) aponta nas suas pesquisas que havia uma grande dificuldade de se excitar os transdutores construídos com cristais de quartzo, pois estes demandavam o uso de geradores de alta tensão. No decorrer das décadas de 40 e 50, iniciou-se o desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos com a descoberta e aperfeiçoamento das cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário, pela então URSS e Japão, e das cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT's) pelos EUA (apud FARRET, 2014).

Consoante Souza (2006), Após intensa pesquisa no campo durante a Segunda Guerra Mundial, titanato de bário ($BaTiO_3$) foi produzido pela primeira vez, seguido pelo zirconato-titanato de chumbo ($Pb(Zr,Ti)O_3$ ou PZT) em 1954. Este material substituiu o titanato de bário,

então bem estabelecido como material para transdutores piezoelétricos, em todas as aplicações em que a propriedade essencial era a piezoeletricidade. Cerâmicas à base de PZT tornaram-se as mais largamente usadas de todas as cerâmicas para materiais inteligentes, devido à elevada piezoeletricidade deste material (TRAINER, 2003). Além disso, o uso de cerâmicas ao invés de cristais piezoelétricos oferecia a possibilidade de modificar o comportamento do material para aplicações específicas pelo uso de dopantes (apud JORDAN; OUNAIES, 2001).

2.3.2 Efeito Piezoelétrico

O efeito piezoelétrico ocorre quando tensões de tração ou compressão aplicadas ao cristal modificam a separação entre as cargas positivas e negativas em cada célula unitária, levando a uma polarização da superfície do cristal (HARVEY, 2002).

Em outras palavras, o efeito piezoelétrico, como mostra o modelo molecular simples na figura 2.5, é a geração de uma carga elétrica como resultado de uma força exercida sobre o material piezoelétrico. Antes de submeter o material a um estresse externo, os centros das cargas negativas e positivas de cada molécula coincidem, resultando em uma molécula eletricamente neutra como indicado na 2.5 (a). No entanto, na presença de uma tensão mecânica externa, o reticulado interno pode ser deformado, causando assim separação dos centros positivos e negativos da molécula e gerando pequenos dipolos como indicado na figura 2.5 (b). Como resultado, os polos opostos de dentro do material se cancelam e cargas fixas aparecem na superfície. Isso é ilustrado na figura 2.5 (c), ou seja, o material é polarizado esse fenômeno é chamado de efeito piezoelétrico direto. Essa polarização gera um campo elétrico que pode ser usado para transformar a energia mecânica, usada na deformação do material, em energia elétrica energia (DAHIYA; VALLE, 2013). Este arranjo funciona como um transdutor eletromecânico que converte um estímulo mecânico em sinal elétrico e vice-versa, permitindo que tais materiais sejam utilizados como sensores e atuadores em diversas aplicações (WANG, 2002).

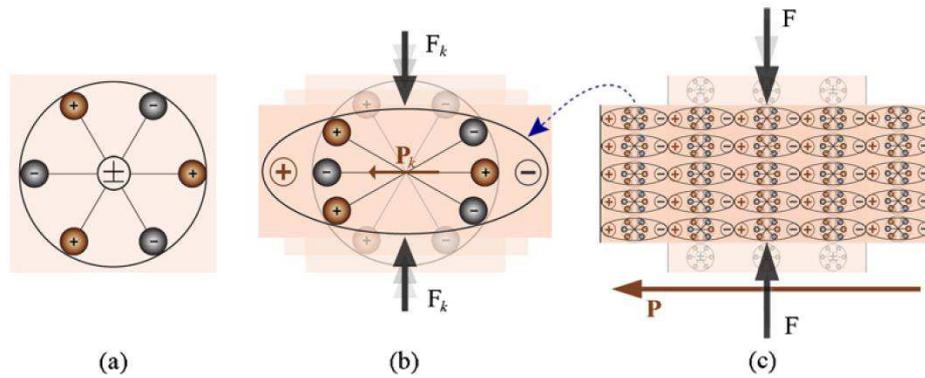


Figura 2.5. Efeito piezoelétrico explicado com um modelo molecular simples (Dahiya e Valle, 2013)

O efeito piezoelétrico inverso ocorre devido aos mesmos princípios, porém, ao invés de ser uma tensão mecânica que separa o centro de cargas positivas do centro de cargas negativas, gerando uma polarização, é um campo elétrico que separa o centro de cargas positivas do centro de cargas negativas, gerando uma deformação mecânica, a figura 2.6 mostra o esquema da conversão de energia (MONTANHER, 2010).



Figura 2.6. Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezoelétrico (Wang, 2002)

A figura 2.7 mostra o material piezoelétrico com dois eletrodos de metal depositados em superfícies opostas. Se os eletrodos estão externamente curto-circuitados, com um galvanômetro conectado ao fio de curto-circuito, e força aplicada a superfície de material piezoelétrico, uma densidade de carga fixa aparece nas superfícies do cristal em contato com os eletrodos. Esta polarização gera um campo elétrico que, por sua vez, provoca o fluxo das cargas livres existentes no condutor. Dependendo do seu sinal, as cargas livres se moverão para as extremidades onde as cargas fixas geradas pela polarização são de sinal oposto. Este fluxo de carga livre continua até a livre carga neutraliza o efeito de polarização, está indicado na figura 2.7 (a). Isso implica que

nenhuma carga flui no estado estacionário ou no estado não perturbado (independentemente da presença de força externa). Quando a força no material é removida, a polarização também desaparece, o fluxo de cargas livres se inverte e finalmente a material volta ao estado original de parada indicado na figura 2.7 (b) (DAHIYA; VALLE, 2013).

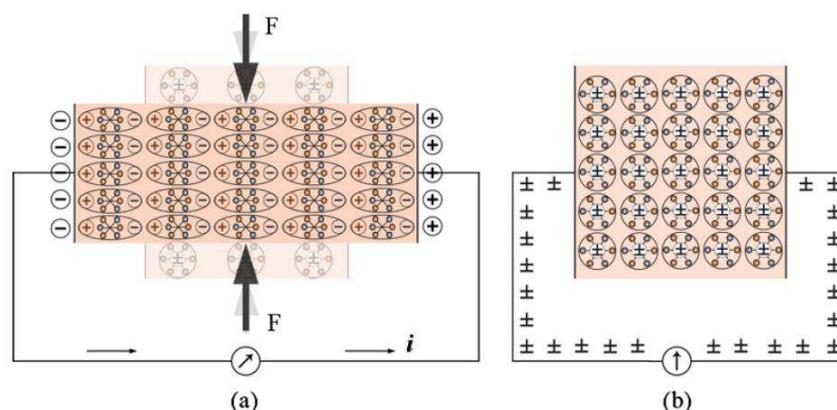


Figura 2.7. Fenômeno piezoelétrico (Dahiya e Valle, 2013)

Esse processo poderia ser exibido no galvanômetro, o que teria marcado dois picos de corrente de sinais opostos. Se o fio de curto-circuito for substituído por uma resistência / carga, a corrente fluirá através dele e, portanto, a energia mecânica será transformada em energia elétrica. Este esquema é fundamental para várias técnicas de captação de energia que aproveitam a energia mecânica do ambiente, como as vibrações (PINNA; DAHIYA; VALLE, 2010) e a convertem em uma forma elétrica utilizável.

2.4 Materiais Inteligentes

Chamam-se materiais inteligentes, os materiais que possuem acoplamentos entre múltiplos domínios físicos (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016). Pode-se mencionar como exemplo de acoplamento, as ligas de memória de forma SMA (*Shape Memory Alloys*), que possuem a capacidade de converter energia térmica em deformação mecânica, assim a alteração de temperatura da liga, que é uma variável do domínio térmico provocou uma deformação,

variável do domínio mecânico. Este efeito é denominado acoplamento termomecânico (LAGOUDAS, 2008).

Os materiais inteligentes podem ser identificados conforme os diferentes tipos de acoplamento. Esta característica proporciona a eles a capacidade de se adaptar e se ajustarem às condições operacionais ou ambientais (LAGOUDAS, 2008). Observa-se que para esse grupo de materiais, ao mudar uma variável de estado em um domínio físico, uma outra variável de estado em um domínio físico diferente é mudada. Pode-se então definir o termo acoplamento, como essa peculiaridade.

Segundo Lagoudas (2008), os materiais inteligentes são chamados de materiais ativos, por exibirem sensibilidade e ampla capacidade de atuação. Esses materiais possuem a habilidade de alterar seu formato e rigidez, dentre as demais propriedades, por meio da imposição de um campo eletromagnético, uma diferença de potencial (ddp), de campos de tensão ou temperatura (OLIVEIRA, 2013).

Entre os materiais inteligentes mais aplicados destacam-se: ligas com memória de forma, materiais piezelétricos, materiais magnetostrictivos e os fluidos eletro e magneto-reológicos. Esses materiais possuem a habilidade de alterar seu formato e rigidez, dentre as demais propriedades, por meio da imposição de um campo eletromagnético, uma diferença de potencial, de campos de tensão ou temperatura (LAGOUDAS, 2008).

Foram desenvolvidas variações deste tipo de materiais, expandindo mais e mais a aplicação dos materiais inteligentes. Desse modo, pode-se citar fibras óticas, polímeros com memória de forma, polímeros óticos ativados e a forma de ligas ferromagnéticas de memória. Destacam-se também a união de diferentes tipos de materiais compostos híbridos. Atualmente, verifica-se uma disposição para a diminuição de dispositivos inteligentes para micro e nanoescala, como os chamados MEMS (micro -sistema eletromecânico) e NEMS (nano - sistemas eletromecânicos) (OLIVEIRA, 2013).

Os materiais inteligentes são comumente empregados como sensores e atuadores em estruturas ou sistemas inteligentes. A escolha do material apropriado para cada tipo de utilização vai depender de inúmeros fatores, as duas condições fundamentais no projeto para seleção do

material adequado são: a densidade de energia de atuação e a frequência de atuação do material (LAGOUDAS, 2008).

2.5 Materiais Piezoelétricos

Materiais piezoelétricos podem ser naturais ou artificiais. Os piezoelétricos naturais são materiais cristalinos como quartzo (SiO_2), sal de Rochelle, Topázio, minerais do grupo da turmalina e algumas substâncias orgânicas como seda, madeira, esmalte, dentina, osso, cabelo, borracha. Os Materiais piezoelétricos feitos pelo homem são cristais similares ao quartzo, cerâmicas, polímeros, compósitos e filmes finos (DINEVA et al., 2014).

Existem 32 classes de cristal que são divididas nos sete grupos seguintes: Triclínico, monoclínico, ortorrômbico, tetragonal, trigonal, hexagonal e cúbico. Estes grupos também estão associados com a natureza elástica do material onde o triclínico representa um material anisotrópico, ortorrômbico representa um material ortotrópico e cúbico são na maioria dos casos materiais isotrópicos. Apenas 20 das 32 classes possuem propriedades piezoelétricas. Dez destas classes são polares, isto é, mostram uma polarização espontânea sem tensão mecânica devido aparecimento de um momento de dipolo elétrico associado à sua célula unitária. As 10 classes restantes não são polares, isto é, a polarização aparece apenas após a aplicação de uma carga mecânica (DINEVA et al., 2014).

Para preparar uma cerâmica piezoelétrica, pós finos dos óxidos de metal de componente são misturados em proporções específicas, depois aquecidos para formar um pó uniforme. A pólvora é misturada com um aglutinante orgânico para produzir elementos estruturais com a forma desejada (discos, hastes, placas, etc.). Os elementos são resfriados, depois moldados conforme as especificações e eletrodos são aplicados nas superfícies adequadas. Acima de uma temperatura crítica, o ponto de Curie, cada cristal de perovskita no elemento cerâmico queimado exibe uma simetria cúbica simples sem momento de dipolo, esta fase é chamada de paraelástica, mostrado na figura 2.8 (a). Em temperaturas abaixo do ponto de Curie, no entanto, cada cristal exibe uma simetria tetragonal ou romboédrica levando a um momento de dipolo, essa fase do material é chamada fase ferroelétrica (figura 2.8 (b)) (DINEVA et al., 2014).

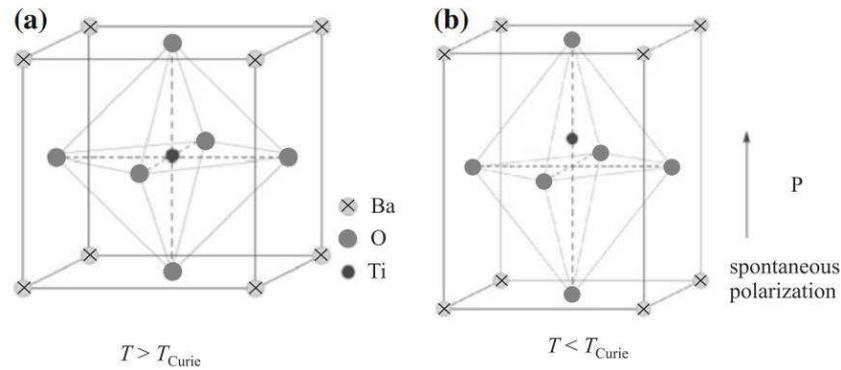


Figura 2.8. Estrutura cristalina de uma cerâmica piezoelétrica tradicional (BaTiO₃) à temperatura acima (a) e abaixo (b) ponto de Curie (Dineva et al., 2014)

O fluoreto de polivinilideno (PVDF) é um polímero ferroelétrico que também exibe propriedades piezoelétricas. Essas características o tornam útil em aplicações de sensores e baterias. Filmes finos de PVDF são usados em alguns sensores de câmeras térmicas mais recentes. Materiais piezo-compostos são uma modernização importante das piezocerâmicas existentes. Eles podem ser de dois tipos: piezo-polímero no qual o material piezoelétrico é imerso em uma matriz eletricamente passiva (por exemplo, PZT em matriz epóxi) e piezo-compósitos que são materiais compostos feitos por duas cerâmicas diferentes (por exemplo, BaTiO₃ fibras que reforçam uma matriz de PZT) (NEWNHAM et al., 1980).

Os materiais piezoelétricos apresentados a seguir são os mais utilizados na atualidade em aplicações tecnológicas (EIRAS, 2004).

2.5.1 Cristais

2.5.1.1 Quartzo

A maior parte dos cristais não apresentam propriedades piezoelétricas. O quartzo é mais eminente cristal natural que possui esta propriedade. Ele é o mineral piezoelétrico (vibra ao

receber excitação elétrica, as formas de vibração estão relacionadas com a forma de corte que é feito no cristal) mais importante para indústria eletrônica moderna (JESUS *et al.*, 2014).

Cristais de quartzo são encontrados na natureza (minerais de quartzo, que para crescer de forma natural demoram muitos anos) ou podem ser desenvolvidos artificialmente, por exemplo, por processos hidrotérmicos (EIRAS, 2004).

O quartzo é um mineral composto de átomos de silício e oxigênio em um arranjo contínuo de tetraedros de silício-oxigênio (SiO₄), com cada oxigênio sendo dividido entre dois tetraedros, produzindo uma fórmula química geral de SiO₂. O quartzo é o segundo mineral mais abundante na crosta continental da Terra, atrás do feldspato (ANDERSON; ANDERSON, 2010).

Os cristais de quartzo são assimétricos e existem em duas formas, o quartzo normal (α) e o de alta temperatura (β). A transformação da fase α do quartzo para β ocorre abruptamente a 573 ° C, essa fase é importante para aplicações tecnológicas, em geral, deseja-se ter modos de vibração puros, alto fator de qualidade mecânica. Como a transformação é acompanhada por uma mudança significativa no volume, ela pode facilmente induzir a fratura de cerâmicas ou pedras que passam por esse limite de temperatura (EIRAS, 2004).

A placa de quartzo devidamente orientada é usada como padrão de frequência de oscilações. Geralmente, os cristais de quartzo deste uso, de alta perfeição cristalográfica, são fabricados pelo método de cristalização artificial. A ressonância mecânica das placas de quartzo, que pode ser ajustada em uma frequência desejada é muito estável devido à propriedade elástica quase perfeita do quartzo e, é transformada em oscilação eletrônica através da propriedade piezoelétricas (MOTOKI, 2003).

Alguns tipos de cristais de quartzo possuem propriedades piezoelétricas, eles desenvolvem um potencial elétrico na aplicação de estresse mecânico. Um dos usos piezoelétricos mais comuns do quartzo hoje é como um oscilador de cristal. O relógio de quartzo é um dispositivo bastante conhecido utilizando o mineral. A frequência de ressonância de um oscilador de cristal de quartzo é alterada mecanicamente, e este princípio é usado para medições muito precisas de mudanças de massa muito pequenas na microbalança de cristal de quartzo e em monitores de espessura de película fina (FORWOOD, 2011).

2.5.1.2 Niobato de lítio (LiNbO_3 - LN) e tantalato de lítio (LiTaO_3 -LT)

Na classe dos cristais, os materiais mais importantes em aplicações tecnológicas são o niobato de lítio (LiNbO_3 -LN) e o tantalato de lítio (LiTaO_3 -LT), eles são cristais isomorfos que exibem simetria trigonal. O niobato e o tantalato de lítio podem ser desenvolvidos do material fundido em composições contendo entre 46 e 50% ou 44 e 54% atômica de Li para o LN ou LT, respectivamente (HERBERT, 1982). Observa-se que para os dois cristais há um aumento da temperatura de Curie quando se eleva a concentração de lítio. Cristais mistos de $\text{Li}(\text{Nb,Ta})\text{O}_3$ podem ser desenvolvidos e apresentarem propriedades intermediárias entre as do LN e LT (EIRAS, 2004).

O niobato de lítio e o tantalato de lítio são amplamente empregados em instrumentos para geração de ondas acústicas de superfície, como filtros eletromecânicos e detectores de vibrações (IKEDA, 1990).

2.5.2 Cerâmicas

Desde o descobrimento de que cerâmicas de titanato de bário (BaTiO_3) podiam ser polarizadas e apresentar o efeito piezoelétrico, materiais cerâmicos são os mais utilizados, até o presente, como elementos piezoelétricos na maioria das aplicações tecnológicas. O descobrimento de Roberts (1947) marca assim o início da era das piezocerâmicas (VIGINOSKI, 2013). Para Eiras (2004, p. 13):

As piezocerâmicas são materiais ferroelétricos que se obtém através de métodos de preparação de cerâmicas avançadas. Em seu estado não polarizado (e não texturadas) são isotrópicas. Para sua utilização como elemento piezoelétrico precisam ser polarizadas sob a aplicação de um campo elétrico dc da ordem de alguns quilovolts por milímetro (KV/mm). O fato de ser ferroelétricas permite que se reorientem a polarização espontânea, na direção do campo de polarização. Cerâmicas piezoelétricas (ou ferroelétricas polarizadas) apresentam simetria de 6mm ou ∞ mm.

Foi inovador a evolução das cerâmicas piezoelétricas. Além de exibirem propriedades superiores que os cristais após “polarizadas”, também oferecem dimensões e geometrias flexíveis por serem produzidas por meio da sinterização de pós cerâmicos, conformados mediante

prensagem ou extrusão. Hoje as cerâmicas piezoelétricas tipo titanato zirconato de chumbo (PZT), em suas várias transformações, são as cerâmicas dominantes no mercado (CADY, 1964; SUSLICK, 1989; ARNAU, 2008), que como a maior parte das cerâmicas piezoelétricas possui arranjo do tipo perovskita, e pode ser produzido com uma quantidade de elementos químicos variados, o que possibilita mudar de forma equilibrada várias de suas propriedades físicas (IKEDA, 1990). As cerâmicas piezoelétricas são normalmente achadas em transdutores ultrassônicos, filtros de ondas e fontes de alta voltagem (JAFPE; COOK JR; JAFPE, 1971).

2.5.3 Polímeros

A descoberta da piezoeletricidade em polímeros se deve a Kawai (1969), na qual constatou que o fluoreto de polivinilideno, também conhecido como PVDF ou PVF_2 , polarizado e tracionado em grandes campos elétricos ($\sim 300 \text{ kVcm}^{-1}$) manifesta coeficientes piezoelétricos maiores que aos do quartzo (FUKADA, 2000).

A piezoeletricidade é presente somente em um número reduzido de polímeros. A princípio, este fenômeno foi descoberto em alguns tipos de cristais, tais como quartzo, sal de Rochelle e turmalina. Foi mais tarde descoberto em polímeros como nylon-11, ácido polilático (PLLA), ácido poli(lático-co-glicólico) (PLGA) e o polifluoreto de vinilideno (PVDF) (KASAP, 2000).

Atualmente são poucos polímeros piezoelétricos presentes que se concentram maior parte do interesse científico e tecnológico desta área. Além de apresentarem uma resposta piezoelétrica mais modesta, estes polímeros, quando comparados com os cerâmicos, por exemplo, possibilitam uma maior e diferenciada série de aplicações, visto que são flexíveis, leves podem ser produzidos em grande escala e podem ser transformados com facilidade na configuração desejada (MARTINS; LOPES; LANCEROS-MENDEZ, 2014).

2.5.4 Compósitos

O que motivou o desenvolvimento dos materiais compósitos foi a necessidade de obter propriedades específicas em um material, na qual não podem ser achadas em materiais com uma

única fase. Um exemplo disso é o aumento da sensibilidade piezoelétrica de transdutores eletromecânicos, para se obter um mais perfeito casamento acústico com a água, é necessário diminuir a densidade do elemento piezoelétrico ou, de outro lado, para conseguir elementos flexíveis mecanicamente, para poder ligá-los a superfícies curvas. Essas características podem ser difíceis de alcançar em materiais com uma fase. Portanto, um material compósito é um material que apresenta dois ou mais elementos e que possui propriedades químicas e físicas que originam da soma, de uma fusão ou do produto das propriedades de seus componentes (EIRAS, 2004).

As vantagens mais importantes desses compósitos são a baixa impedância acústica, a qual permite uma união melhor com elementos que têm impedância acústica menor que a da cerâmica, alta flexibilidade mecânica e baixo fator de qualidade mecânico, o que permite identificação em um amplo espectro de frequências (EIRAS, 2004).

2.6 Aplicações de materiais piezoelétricos para geração de energia

A captação de energia a partir de vibrações é uma das áreas de aplicação de materiais piezoelétricos. A principal ideia é colher energia disponível no ambiente em volta de um sistema e transformá-la em energia elétrica utilizável. De um modo geral, esse modelo de aplicação consegue transformar qualquer tipo de vibração em energia utilizável, e os materiais piezoelétricos compõem o transdutor fundamental para converter energia mecânica em elétrica (OLIVEIRA, 2013).

Colher a energia biomecânica é uma alternativa de gerar eletricidade a partir das pessoas ao longo das atividades diárias, sendo uma opção propícia para as baterias que alimentam os dispositivos portáteis (LI et al., 2009). Também há vários exemplos associados com esse tipo de aplicação, porém é relevante destacar aqueles que exploram a caminhada das pessoas, que é o objetivo principal desse trabalho.

A criação dos dispositivos de colheita de energia virou motivo de inúmeros estudos que apresentam soluções para torná-los mais eficientes. Nesse caso, analisar várias frequências de excitação e amplitudes de vibração tem um papel importante (OLIVEIRA, 2013). Silva et al.

(2013) pesquisaram o efeito do comportamento histerético piezoelétrico nos sistemas de captação de energia com base nas vibrações.

Serão apresentadas nas próximas seções algumas das aplicações dos materiais piezoelétricos na geração de energia. Essa noção já faz parte do cotidiano de algumas pessoas, entretanto muitas desconhecem.

2.6.1 Pneus capazes de gerar energia

Noaman Makki e Remon Pop-Iliev (2011), da Universidade de Ontário, no Canadá, dirigiram sua atenção para os nanogeradores, pequenos fios piezoelétricos que estão sendo pesquisados principalmente para alimentação de pequenos equipamentos portáteis.

Esses dois engenheiros resolveram implantar os nanogeradores dentro de pneus, devido à sua flexibilidade e às oscilações do piso, além de se deformarem facilmente durante o translado normal de um veículo (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016).

Ao submeter à deformação constante dos pneus, os nanogeradores conseguem gerar uma parcela aceitável da energia, quanto mais veloz o carro e maior for o aro do pneu, mais energia é produzida. Os nanofios de PZT foram utilizados anteriormente em pneus, porém somente para alimentação dos sensores que controlam a pressão dos pneus, na qual não necessitam trabalhar de forma contínua (MAKKI; POP-ILIEV, 2011).

Para os pneus gerarem uma maior corrente, os pesquisadores constataram a necessidade da máxima cobertura da área da superfície interna dos pneus com os nanogeradores. No protótipo, foram utilizados uma malha de 4x40 fios, posta no interior de um pneu de aro 14 usando um adesivo flexível (MAKKI; POP-ILIEV, 2011), como mostra a figura 2.9 abaixo.



Figura 2.9. Malha piezoelétrica de nanogeradores dentro do pneu (Makki e Pop-Iliev, 2011)

Com o veículo correndo a 100 km/h, equivalente a uma rotação do pneu de aproximadamente 854 voltas por minuto, em que a malha piezoelétrica de teste gerou 2,3 watts de energia sustentável por pneu (MAKKI; POP-ILIEV, 2011).

Em um outro teste agora aplicando uma segunda camada de nanogeradores, sobreposta à primeira, a produção de energia deu um salto linearmente para 4,6 watts, comprovando a capacidade da tecnologia (MAKKI; POP-ILIEV, 2011).

A energia produzida é primeiramente armazenada em um capacitor, e passada então para o interior do veículo por um comutador, que preserva um contato contínuo entre a roda e o chassi em movimento (MAKKI; POP-ILIEV, 2011).

2.6.2 Boates com piso gerador de energia

Uma equipe composta por inventores ecológicos, engenheiros e investidores holandeses guiados por Michel Smit criou a famosa Sustainable Dance Club (Boate Sustentável). Trata-se

da utilização da energia de pessoas se movimentando e dançando em uma boate para gerar energia elétrica (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016) conforme a figura 2.10.

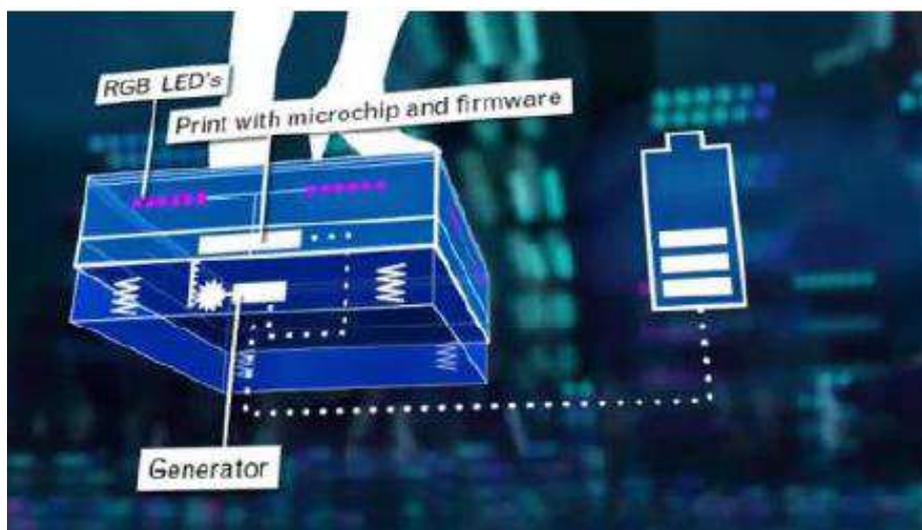


Figura 2.10. Placa geradora de energia (Perlingeiro, Pimenta e Silva, 2016)

Uma pessoa dançando consegue produzir em torno de 20 watts de energia elétrica, o que indica que duas são capazes de ligar uma lâmpada, descobriram os consultores científicos (TERRA, 2008).

Os pisos piezoelétricos em teoria conseguem captar a energia de todo passo ou salto e a tornar elétrica, entretanto é uma tecnologia cara e não muito eficiente, que possui capacidade de converter uma fração da energia humana em potência utilizável (TERRA, 2008).

Apesar disso, a tecnologia vem evoluindo rapidamente e a primeira boate sustentável do mundo está sendo reprogramada e ajustada eletronicamente para aperfeiçoar seu desempenho. O funcionamento ocorre por meio de módulos que são levemente flexionados no momento que sofrem pressão a medida que as pessoas se movimentam (TERRA, 2008).

A ideia central é de que a energia está em todos lugares, porém não se aproveita. O exemplo foi sobre a pista de dança, contudo já se encontram projetos como esse para campos de futebol, calçadas e etc. (PERLINGEIRO; PIMENTA; SILVA, 2016).

2.6.3 Geradores piezoelétricos em trilhos de trem

A tecnologia piezoelétrica gera energia a partir da pressão e do estresse em determinadas superfícies, notando-se a eletricidade ser colhida de estradas e pistas de dança para acender luzes e sinais. Recentemente, a empresa israelense Innowattech revelou um novo uso para essa versátil tecnologia de energia, eles planejam instalar pastilhas piezoelétricas em todo o país para gerar eletricidade (SING, 2010).

A empresa já usou pastilhas piezoelétricas em rodovias israelenses, e agora eles estão usando dispositivos similares (embora maiores) em ferrovias. A Innowattech planeja substituir 32 coxins ferroviários padrão por seus próprios IPEG PADS piezoelétricos (figuras 2.11 e 2.12), que possuem um design similar. Além de gerar energia, os novos coxins IPEG podem determinar o tamanho da roda que passa sobre eles, assim como a velocidade e o peso do veículo (SING, 2010).



Figura 2.11. Instalação do IPEG PADS piezoelétricos nos trilhos (Sing, 2010)

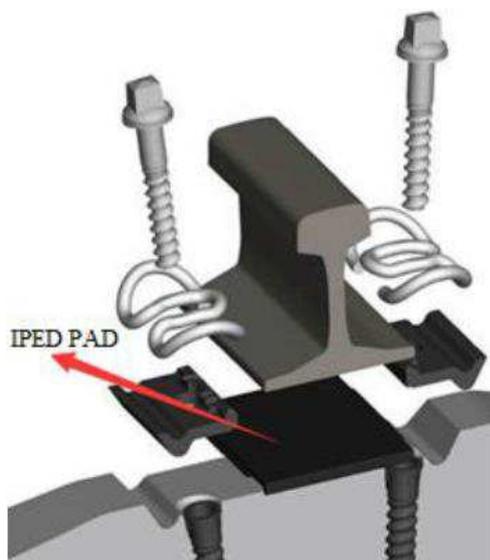


Figura 2.12. Montagem do IPEG PADS piezoelétricos (Perlingeiro, Pimenta e Silva, 2016)

Um protótipo do sistema de geração de energia foi instalado pela *Technion University* e pela *Israel Railways* para mostrar os benefícios da tecnologia. O projeto descobriu que uma via férrea com tráfego de 10 a 20 trens de dez vagões poderia produzir até 120 kWh, o que poderia ser usado para alimentar sistemas de infra-estrutura, como sinais e luzes (SING, 2010).

2.7 Sistema de Extração de potência transdutores piezoelétricos

2.7.1 Transdutor piezoelétrico

A ideia básica é simples: um transdutor piezoelétrico gera um sinal elétrico quando deformado. Se a força, que o levar a essa alteração de forma, fizer com que ele vibre, teremos a produção de sinais elétricos constantemente, ou seja, ele produzirá uma tensão alternada. Essa tensão, que pode alimentar um circuito externo, nada mais é do que o resultado da conversão de energia mecânica (vibratória) em energia elétrica (BRAGA, 2017).

Assim pode-se aproveitar qualquer tipo de vibração que o corpo possa sofrer, ou seja, sua aplicação vai desde pistas de dança a estruturas industriais. Assim o sistema corretamente

dimensionado pode suprir cargas que tenham demanda superior a alguns poucos Watts (BRAGA, 2017).

2.7.2 Circuito equivalente elétrico de uma estrutura piezoelétrica

Camara (2012) destaca que o comportamento elétrico e obtenção dos valores teóricos de correntes, tensão elétrica armazenada e potência produzida e extraída do gerador piezoelétrico, é necessário a utilização de um circuito equivalente elétrico que represente o elemento piezoelétrico. Diversos modelos são utilizados na literatura especializada, alguns dos mais utilizados são apresentados abaixo na figura 2.13. Os modelos levam em consideração apenas os parâmetros concentrados do sistema mecânico.

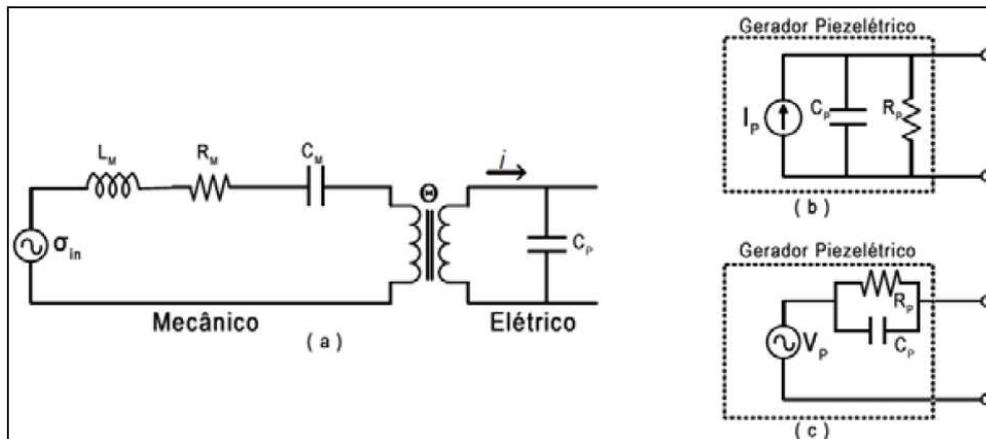


Figura 2.13. Modelos elétricos equivalentes do elemento piezoelétrico (Camara, 2012)

Conforme observado por Camara (2012), na figura 2.13 (a) apresenta um modelo que envolve as partes mecânicas do sistema, sendo representados no domínio elétrico através de uma indutância, uma resistência e uma capacitância em série. Estes componentes são proporcionais à massa (L_m), ao amortecimento (R_m) e inversamente proporcional à rigidez ($C_m = 1/K$) do sistema mecânico, respectivamente. A deflexão da viga σ_{in} gera uma carga que flui no lado mecânico até o transformador Θ , que corresponde ao acoplamento eletromecânico. Quando a piezoestrutura é excitada em sua ressonância, o circuito pode ser simplificado e ser modelado

apenas pela parte elétrica (RAMADASS, 2010), conforme a figura 2.13 (b), onde o elemento piezelétrico é representado por uma fonte de corrente em paralelo com a capacitância e a resistência interna, e figura 2.13 (c), onde o elemento piezelétrico é representado através de uma fonte de tensão em série com a resistência interna em paralelo com a capacitância interna do piezogerador.

2.7.3 Circuito retificador

Emprega-se o circuito retificador para realizar a conversão CA/CC. Este circuito irá retificar o sinal CA proveniente do transdutor para depois armazenar em um supercapacitor (RAMADASS, 2009).

2.7.3.1 Retificador de meia onda

O circuito retificador de meia onda utiliza apenas um diodo e por isso retifica apenas um semi-ciclo. O circuito é mostrado na figura 2.14. No início do semi-ciclo positivo o capacitor C_p carrega e em seguida o diodo D conduz a corrente para a carga. No semi-ciclo negativo o diodo D fica bloqueado e não há caminho para a corrente do capacitor descarregar com isso o capacitor continua carregado com o valor de pico ($+V_{in}$). No próximo semiciclo positivo o capacitor carregado vai subtrair a tensão da fonte do piezelétrico. Nesse caso quando for pico na fonte do piezelétrico a saída será nula ($V_p = V_{in} - V_{in} = 0$). Desse modo a tensão do piezelétrico estará com offset negativo, (OTTMAN, 2003).

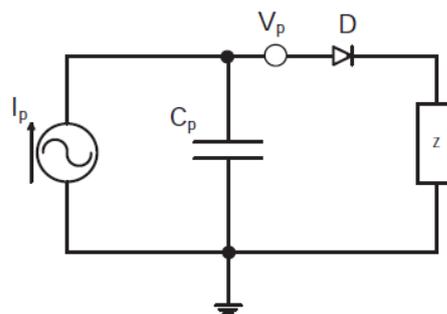


Figura 2.14. Retificador de meia onda (Souza, 2011)

Em regime permanente o diodo D não irá conduzir em nenhum momento, portanto a corrente na carga será nula. Caso o diodo seja trocado para retificar o lado negativo, o capacitor C_p ficará carregado com valor de pico negativo ($-V_{in}$) e a tensão do piezelétrico ficará com offset positivo. Segundo Souza (2011), as características do transdutor piezelétrico inviabilizam o emprego deste retificador.

2.7.3.2 Retificador em ponte

O circuito retificador em ponte é uma das configurações mais utilizadas em *power harvesting*, de acordo com Souza (2011). O circuito retificador com diodos é mostrado na figura 2.15. Este circuito retifica os dois semi-ciclos e a máxima tensão retificada é igual ao pico nos terminais do piezelétrico subtraindo as duas quedas dos diodos.

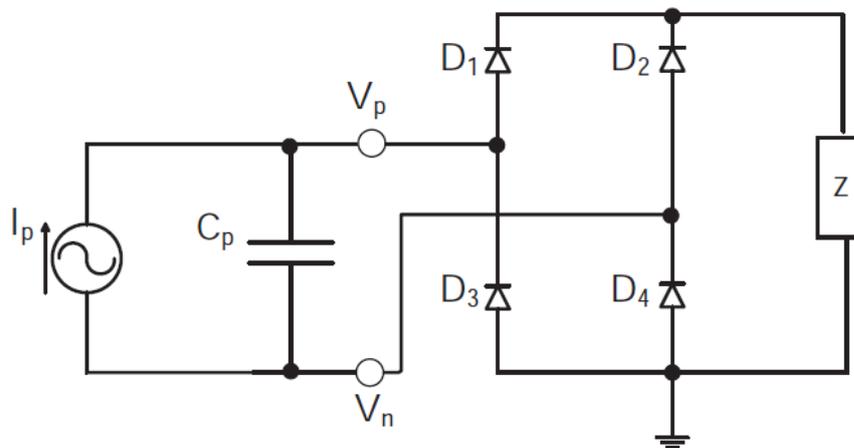


Figura 2.15. Retificador em ponte com diodos (Souza, 2011)

No início do período (instante t_0), ainda segundo Souza (2011), a corrente do piezelétrico flui para o capacitor até carregá-lo, todos os diodos estão bloqueados e não há corrente na carga, figura 2.16 (a). No instante t_1 , o capacitor está carregado positivamente e os diodos D_1 e D_4 conduzem a corrente para alimentar a carga, figura 2.16 (b). No semiciclo negativo a corrente do piezelétrico inverte a sua direção, instante t_2 . A corrente flui para o capacitor interno e faz com que ele descarregue e carregue negativamente, neste momento todos os diodos estão bloqueados,

figura 2.16 (c). No instante t_3 , o capacitor está carregado negativamente e os diodos D_2 e D_3 conduzem a corrente para alimentar a carga, figura 2.16 (d) (apud RAMADASS; CHANDRAKASAN, 2010).

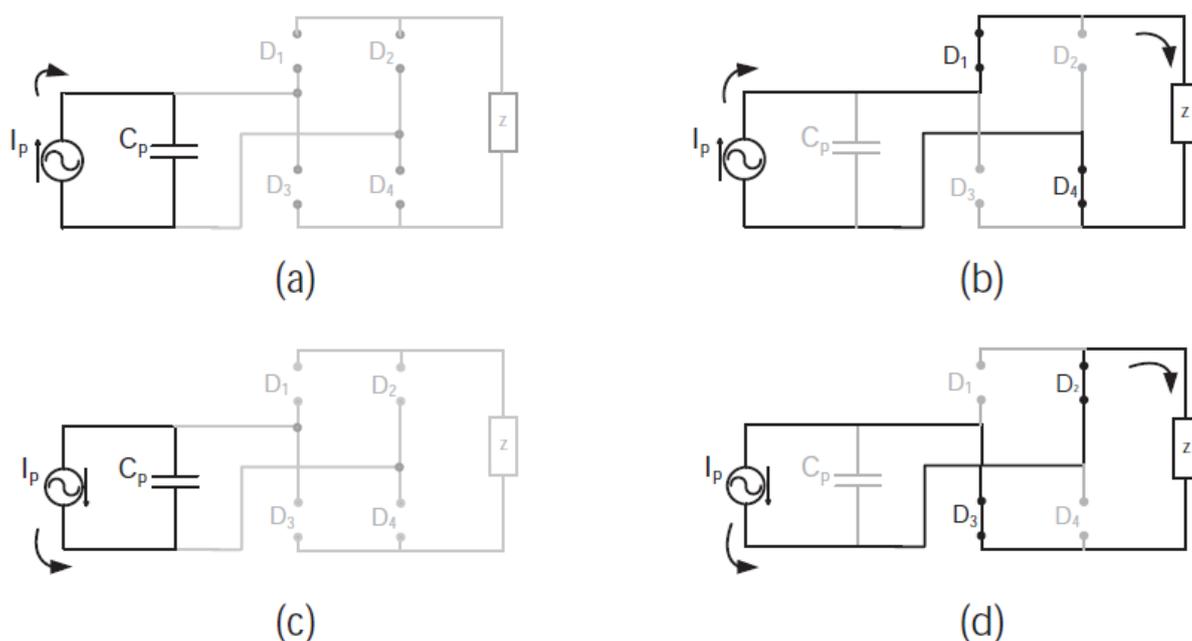


Figura 2.16. Apresentação das etapas de funcionamento de um circuito retificador em ponte (Souza, 2011)

No próximo semi-ciclo positivo (instante t_4), a corrente do piezelétrico volta para direção inicial e faz com que o capacitor descarregue e carregue positivamente, depois disso a corrente é direcionada para a carga e assim sucessivamente.

Entretanto, em cada semi-ciclo a corrente provida pelo piezelétrico percorre o capacitor interno (C_p) do piezelétrico para carregá-lo e descarregá-lo. Isto ocorre devido às características do transdutor piezelétrico. Durante o intervalo em que o capacitor está sendo carregado e descarregado, a corrente não é aproveitada na carga. Ou seja, há uma quantidade de carga perdida no capacitor.

Como apontado por Souza (2011), a principal limitação do retificador em ponte completa é que boa parte da corrente disponível não vai para a carga. Esta perda ocorre devido ao

carregamento e descarregamento do capacitor interno. Isto limita a potência máxima que pode ser extraída do piezelétrico, por isso indica-se a utilização de um regulador de tensão com alto nível de conversão e eficiência, que possui internamente um circuito retificador de onda completa (retificador em ponte) e o uso de um conversor DC-DC, para controlar a potência de saída do gerador piezoelétrico.

2.7.4 Armazenamento de energia gerada

Os elementos utilizados para o armazenamento de energia dependem principalmente da potência requisitada pela carga. É possível, por exemplo, que um sistema baseado em energy harvesting utilize apenas capacitores como elementos para armazenamento de energia (MHETRE, NAGDEO e ABHYANKAR, 2011).

A necessidade do uso de uma bateria, por outro lado, é uma solução comum quando o sistema não é capaz de suprir toda a potência necessária para que a aplicação funcione continuamente. Nesse caso, os sistemas podem recarregar a bateria periodicamente, condição que leva a um aumento da autonomia do dispositivo (DEPEXE, 2014).

Os estudos de Kuhn (2014), citando Sodano et al (2002), apresentam formas de armazenamento de energia, que afirmam a capacidade da placa piezelétrica para armazenar a sua potência em circuitos capacitivos e em bateria recarregável. Foi demonstrado que a potência de saída do material piezelétrico foi capaz de recarregar a bateria totalmente descarregada sem a utilização de fontes de energia externas. O autor mostra também que ambos os métodos de armazenamento de energia podem ser utilizados, no entanto, no uso de pilhas recarregáveis, verificou-se possuir qualidades de energia de armazenamento que permitem que uma gama maior de dispositivos eletrônicos pode ser projetada e utilizada, do que somente o uso do capacitor de armazenamento. Isto se dá devido à fraca capacidade de carga do capacitor para armazenar grandes quantidades de energia e da sua taxa de descarga rápida, o que faz com que a saída do circuito de uma fonte de alimentação tenha um chaveamento on-off periódico.

2.8 Circuitos elétricos

O circuito elétrico pode ser definido de forma simples como, um ou mais caminhos fechados onde a corrente elétrica se movimenta. Porém é necessário entender alguns elementos presentes em um circuito elétrico para que este conceito fique mais claro (MUNDO DA ELÉTRICA, 2018).

Um circuito elétrico que funcione de forma básica é constituído por uma fonte de tensão, podendo ser uma tomada, pilhas, baterias, ou qualquer outra fonte onde haja uma diferença de potencial elétrico. Outro componente básico é a carga, que consumirá a energia elétrica para transformar em outro tipo de energia, que em seguida será empregada por exemplo em uma lâmpada, um resistor, um motor, equipamentos elétricos entre outros. Por fim, os condutores elétricos ou cabos elétricos, que são importantes, por serem responsáveis em estabelecer um caminho para conduzir a corrente elétrica (elétrons) entre a fonte fornecedora e a carga que a consome, devolvendo para a fonte e iniciando um ciclo novo (MUNDO DA ELÉTRICA, 2018).

Existem basicamente três formas de fazer associação em componentes eletrônicos, são elas: circuito com associação em série, circuito com associação paralelo e circuito com associação mista (formado pelo circuito em série e paralelo) (MUNDO DA ELÉTRICA, 2018).

Por meio de um esquema de ligação serão mostradas como fazer uma ligação em série e paralela em transdutores piezoelétricas ou também chamada popularmente pastilha piezoelétrica (figura 2.17) que é o principal componente de estudo desse trabalho, além de explicar o que é circuito em série, circuito em paralelo.

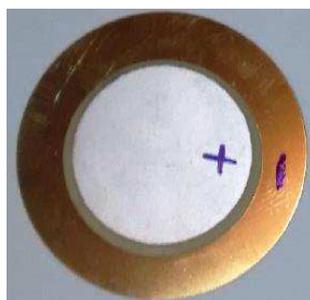


Figura 2.17. Transdutor Piezoelétrico (Silva, 2017)

2.8.1 Circuito em série

É conhecido também como ligação em série, é um circuito formado unicamente por elementos elétricos ou eletrônicos ligados em sequência, isto é, apresentam somente um ponto em comum entre eles (MUNDO DA ELÉTRICA, 2018). A figura 2.18 abaixo mostra o esquema de ligação das pastilhas em série.

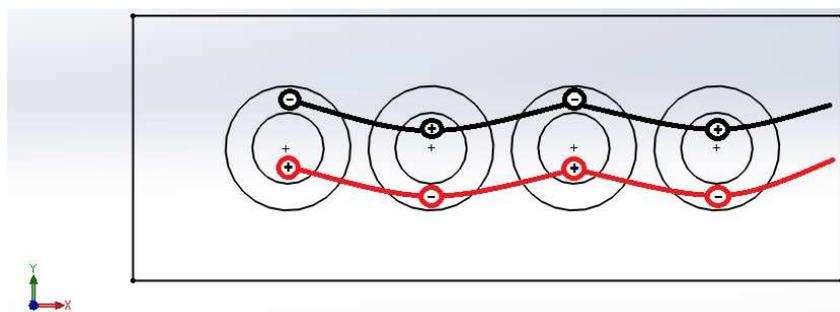


Figura 2.18. Ligação de transdutores em série

Observa-se que na ligação em série os terminais dos fios são conectados de forma que o polo positivo da pastilha se ligue ao polo negativo da outra pastilha, formando assim uma sequência como mostrado na figura acima.

2.8.2 Circuito em paralelo

O circuito em paralelo ou ligação paralela é um circuito composto apenas por componentes elétricos ou eletrônicos ligados em paralelo, ou seja, possuem dois pontos em comum (MUNDO DA ELÉTRICA, 2018). O esquema de ligação das pastilhas em paralelo é mostrado na figura 2.19.

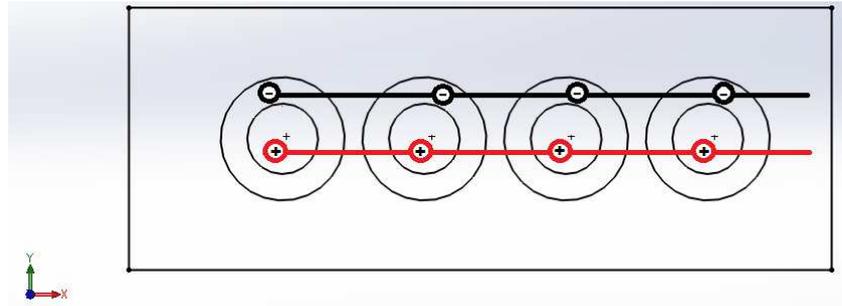


Figura 2.19. Ligação de transdutores em paralelo

Ao contrário da associação em série, na ligação em paralelo, os terminais dos fios são conectados de forma que o polo positivo da pastilha se ligue ao polo positivo da outra e o mesmo ocorre com os polos negativos.

3 METODOLOGIA

Para a realização desta proposta serão adotadas fontes de natureza bibliográfica, experimental e descritiva.

Na pesquisa bibliográfica a metodologia foi baseada em estudos disponíveis em teses, dissertações, monografias, artigos científicos, livros e sites. A priori será feita uma leitura seletiva para eleger os materiais correspondentes aos objetivos do trabalho e posteriormente uma leitura crítica, na qual será feita uma análise aprofundada dos aspectos mais relevantes do levantamento literário anterior.

Para o estudo experimental, far-se-á pequenos protótipos de tapete com pastilhas piezoelétricas para converter energia mecânica em elétrica. De forma geral o experimento acontecerá nas seguintes etapas metodológicas:

- I. Construir protótipo de tapete e executar testes com as configurações de circuito em série e paralelo para verificar qual dessas disposições possibilita mais satisfatoriamente a geração de energia elétrica;
- II. Os dados vão ser coletados utilizando osciloscópio, para melhor analisar o comportamento elétrico que o transdutor pode produzir;

O desenvolvimento desse trabalho foi executado em três partes: revisão e redação da bibliografia, execução de testes experimentais e análise dos resultados. Na figura 3.1 é apresentado um diagrama de blocos da metodologia proposta para o desenvolvimento deste trabalho.



Figura 3.1. Esquema da metodologia para desenvolvimento do trabalho

3.1 Materiais

Para o desenvolvimento experimental deste projeto foram utilizados materiais adequados para transformar energia mecânica em elétrica. Como já mencionado, optou-se por pastilhas piezoelétricas que são perfeitamente habilitadas para esse tipo de processo, pois são capazes de gerar tensão e corrente elétrica. Abaixo estão listados todos os materiais usados na construção do tapete:

- Pastilhas Piezoelétricas de 27mm
- Pastilhas Piezoelétricas de 35mm
- Fios Flexíveis de 0,32 mm² vermelho e preto
- Estanho
- Ferro de solda
- Madeirite
- Papelão
- Placa de material polimérico
- Cola de contato
- Diodos retificadores
- Poliestireno de alto impacto
- Borracha EVA de 3mm
- Resistor de 10 Ω

No primeiro teste foi utilizado papelão como material de base das pastilhas e madeirite como material de anteparo das cargas mecânicas (conforme descrito no Item 3.3), enquanto que no segundo foi utilizado um poliestireno de alto impacto (fornecido pelo Projeto Especial Minibaja da UEMA) como material de base e borracha de EVA como anteparo (descrito no Item 3.4). Esses materiais foram utilizados pela facilidade de encontrar nos lugares de realização dos testes. Nos testes posteriores foi utilizada uma borracha EVA de 3 mm tanto como base como anteparo, para facilitar a deformação das pastilhas piezoelétricas e, dessa forma, contribuir para geração de energia elétrica (Figura 3.2).

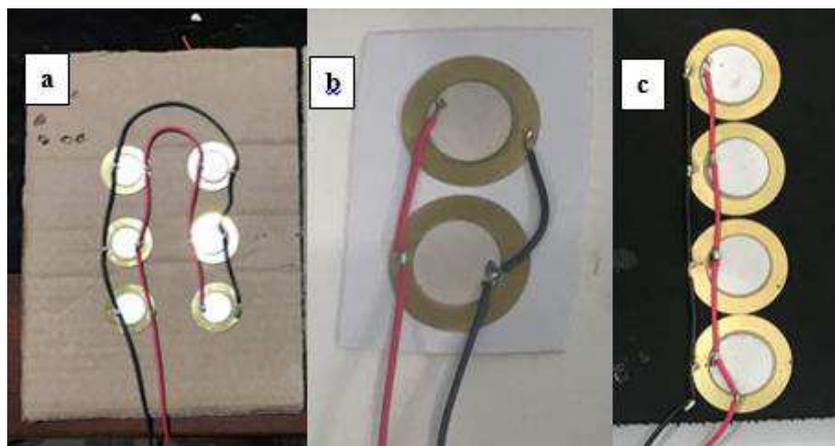


Figura 3.2. Materiais utilizados como base, (a) papelão, (b) poliestireno de alto impacto e (c) borracha EVA

3.2 Pastilha Piezoelétrica

O transdutor piezoelétrico, também conhecido popularmente de pastilhas ou placas piezoelétricas, são vendidos no mercado em vários tamanhos, usou-se no experimento para verificação de tipo de ligação mais eficiente placas de 27 milímetros e para os demais testes as pastilhas de 35mm ambas fabricadas a partir de cerâmica piezoelétrica PZT (Titanato Zirconato de Chumbo). A pastilha possui uma estrutura fina em formato de disco com três camadas principais: a membrana do transdutor piezoelétrico, a folha de metal e o isolador (VIGINOSKI, 2013). A Figura 3.3 mostra a pastilha e sua composição.

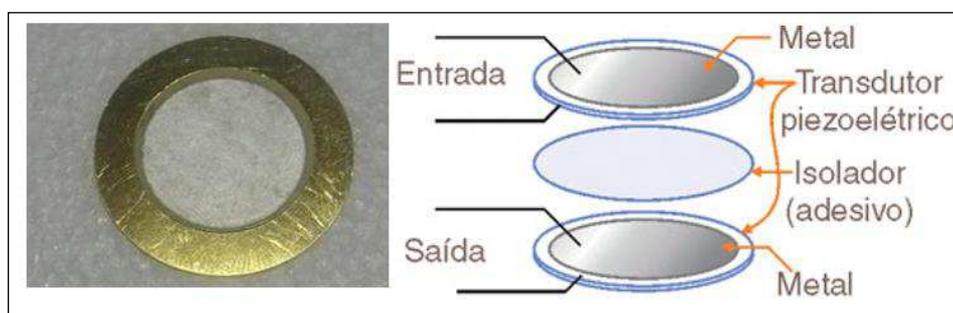


Figura 3.3. Pastilha piezoelétrica e sua composição (Adaptada de Braga, 2017)

Para conhecer a ordem das grandezas das pastilhas piezoelétricas, as respectivas especificações são observadas diretamente em seu datasheet e são apresentadas na figura 3.4 e nos Quadros 3.1 e 3.2.

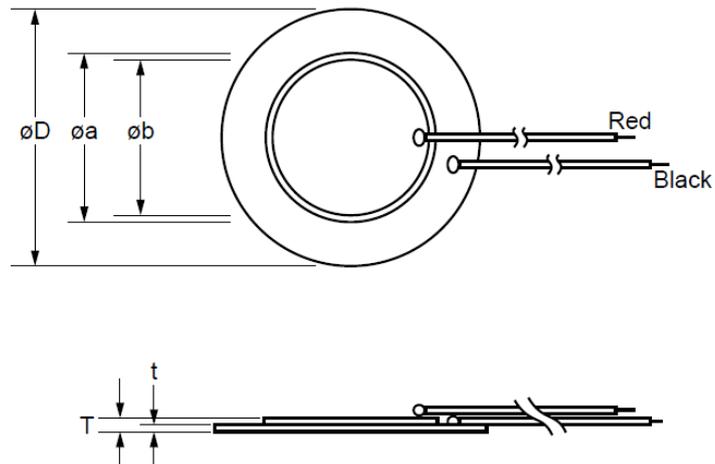


Figura 3.4. Dimensões da pastilha piezoelétrica (Murata, 2012)

Quadro 3.1. Datasheet CUI INC - CEB-27FD44 (Adaptada de CUI INC, 2018)

Descrição: Elemento piezoelétrico- Modelo Fabricante CEB-27FD44	
Frequência	4,5 kHz
Tensão máxima	30 V _{p-p}
Impedância	500 Ohms
Capacitância	16000 pF
Temperatura de operação	-30 ~ +70° C
Peso	2,0 g
Material	Latão
D (Tamanho)	27 mm
a	19.7 mm
b	18.2 mm
T	0.54 mm
t	0.30 mm

Quadro 3.2. Datasheet CUI INC - CEB-35D26 (Adaptada de CUI INC, 2018)

Descrição: Elemento piezoelétrico- Modelo Fabricante CEB-35D26	
Frequência	2,6 kHz
Tensão máxima	30 Vp-p
Impedância	300 Ohms
Capacitância	30000 pF
Temperatura de operação	-20 ~ +70° C
Peso	2,0 g
Material	Latão
D (Tamanho)	35 mm
A	25 mm
b	23 mm
T	0.53 mm
t	0.30 mm

O datasheet descreve as características das placas piezoelétricas a ser utilizadas nos testes práticos deste trabalho. Existem muitos outros modelos de placas cerâmicas piezoelétricas, em que a escolha dependerá das especificações e qual necessidade de aplicação.

3.3 Teste comparativo de tipo de ligação mais eficiente do circuito piezoelétrico para várias cargas mecânicas

Foram testadas 6 pastilhas piezoelétricas de 27 mm com especificações já citadas anteriormente (Quadro 3.1), no intuito de simular um pequeno tapete, elas foram soldadas em fios de seção 0,32mm², tanto em circuito série quanto em paralelo (figura 3.5). Para registro das respostas foi colocado na saída do circuito um multímetro digital da marca Minipa modelo ET-1002 em escala de Volts na tensão DC e faixa de 20V, que de acordo com o fabricante possui erro de $\pm(0.8\%+5D)$ (MANUAL MINIPA, 2017), como mostrado no Quadro 3.3.

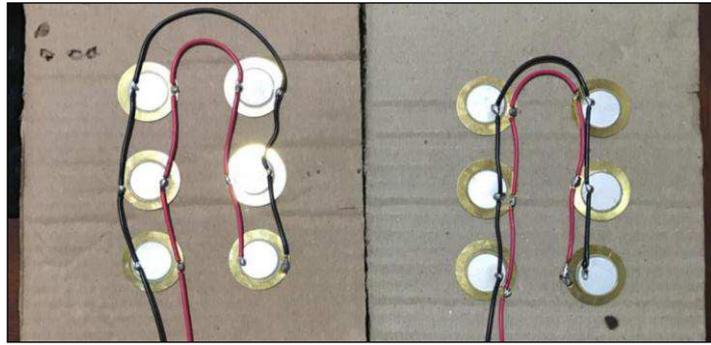


Figura 3.5. Circuito série (esquerda) e circuito paralelo (direita)

Quadro 3.3. Precisão do multímetro Minipa modelo ET 1002 em tensão DC (Manual Minipa, 2017)

Faixa	Precisão	Resolução
200mV	$\pm(0.5\%+5D)$	100 μ V
2000mV	$\pm(0.8\%+5D)$	1mV
20V		10mV
200V		100mV
600V		1V

Para pressionar as pastilhas, foi provocada a queda livre de massas de 1 a 5 Kg, a uma distância de 3 cm, distribuídas sobre uma placa de madeirite de 0,16x0,20 m² de área, essa massa simula pessoas pisando no tapete. A placa possui borrachas na mesma direção das pastilhas, com o intuito de pressionar e amortecer os piezoelétricos. Esse procedimento foi feito nos dois circuitos a fim de mostrar qual deles possui maior tensão de saída. A Figura 3.6 mostra o esquema utilizado.

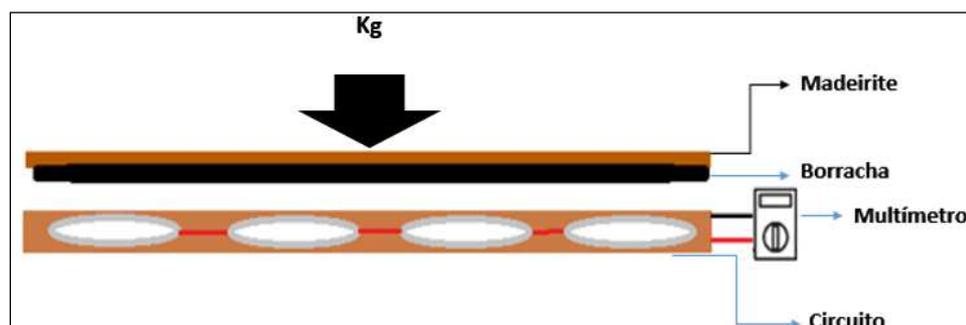


Figura 3.6. Diagrama do procedimento do experimento realizado

Por meio da equação 3.1, pode-se calcular a força peso (F) aplicada nos transdutores piezoelétricos (HALLIDAY, 2008).

$$F = m \times g \quad (3.1)$$

Onde, F é a força peso (N), m é a massa aplicada na pastilha (Kg) e g é a força aceleração gravitacional (m/s^2).

Os valores das tensões dos dois circuitos para as massas de 1 a 5 Kg estão apresentadas nos Quadros 3.4 e 3.5. Para determinar as tensões foram feitas dez repetições com cada massa, posteriormente foram tiradas as médias das respostas de cada uma delas. Como todo instrumento de medição tem seu erro, calculou-se de acordo com a escala, a precisão da medida de cada amostra.

Quadro 3.4. Valores das tensões de saída do circuito série

Circuito Série						Tensão (V)
Medições	Massa (Kg)					
	1	2	3	4	5	
1	0,26	0,54	1,54	1,99	2,44	
2	0,22	0,56	1,31	1,51	2,04	
3	0,29	0,54	1,36	1,96	2,07	
4	0,28	0,56	1,63	1,96	2,10	
5	0,25	0,50	1,32	1,57	2,04	
6	0,28	0,56	1,21	1,97	2,01	
7	0,27	0,50	1,34	1,63	2,04	
8	0,26	0,51	1,17	1,49	2,09	
9	0,25	0,53	1,32	1,33	2,01	
10	0,25	0,51	1,25	1,70	2,12	
Médias	0,26	0,53	1,35	1,71	2,10	
Erro(±)	0,012	0,014	0,020	0,023	0,026	
Desv. Pad. amost	0,020	0,025	0,141	0,243	0,126	

Quadro 3.5. Valores das tensões de saída do circuito paralelo

Circuito Paralelo						
Medições	Massa (Kg)					Tensão (V)
	1	2	3	4	5	
1	0,28	1,16	1,73	2,98	4,21	
2	0,37	1,09	2,35	2,99	3,52	
3	0,23	1,23	1,81	2,57	4,48	
4	0,32	1,35	2,65	2,45	4,86	
5	0,26	1,07	2,55	2,62	4,41	
6	0,35	1,59	1,65	2,66	4,33	
7	0,42	1,10	1,86	2,45	3,86	
8	0,24	1,04	1,76	2,50	3,44	
9	0,23	1,20	1,48	2,40	3,57	
10	0,47	1,12	2,72	2,32	4,51	
Médias	0,32	1,20	2,06	2,59	4,12	
Erro (\pm)	0,012	0,019	0,026	0,0307	0,0429	
Desv. Pad. amost	0,084	0,166	0,461	0,230	0,490	

3.4 Teste comparativo de tipo de ligação mais eficiente do circuito piezoelétrico para uma carga mecânica

A fim de dar segmento aos testes de qual tipo de ligação das pastilhas é mais eficiente na conversão de energia mecânica em elétrica, foi realizado um novo teste comparativo para o cálculo de potência para indicar a quantidade de energia produzida para cada tipo de circuito.

Para o experimento foram usadas pastilhas piezoelétricas de 35 mm (Quadro 3.2), duas ligadas em série (figura 3.7) e outras duas pastilhas ligadas em paralelo (figura 3.8), uma carga mecânica igual para todas as aferições, que foi de 900g (figura 3.9), além de um dispositivo que solta a carga magneticamente a uma distância ajustável, simulando o impacto mecânico (figura 3.10).



Figura 3.7. Ligação do circuito em série

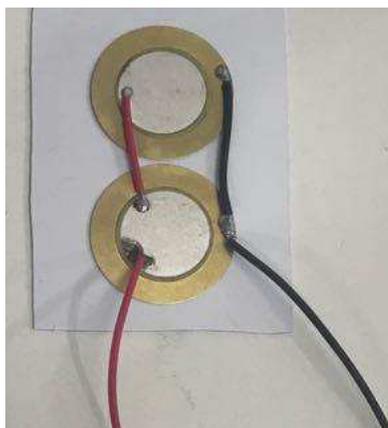


Figura 3.8. Ligação do circuito em paralelo



Figura 3.9. Carga mecânica, tarugo de 900g



Figura 3.10. Aparelho para estudo de queda livre com anteparo e eletroímã

Os testes foram realizados utilizando a altura de 8 cm para todas as medições. Esta altura foi definida por ser a altura estimada de uma passada. Foram utilizados, também, dois multímetros digitais da marca Minipa, modelo ET-1002 concomitantemente, o primeiro para aferição de tensão, o segundo para aferição de corrente, sendo que para medir a corrente foi necessária uma carga elétrica conhecida, utilizando para isto um resistor de 10 Ω (figura 3.11).

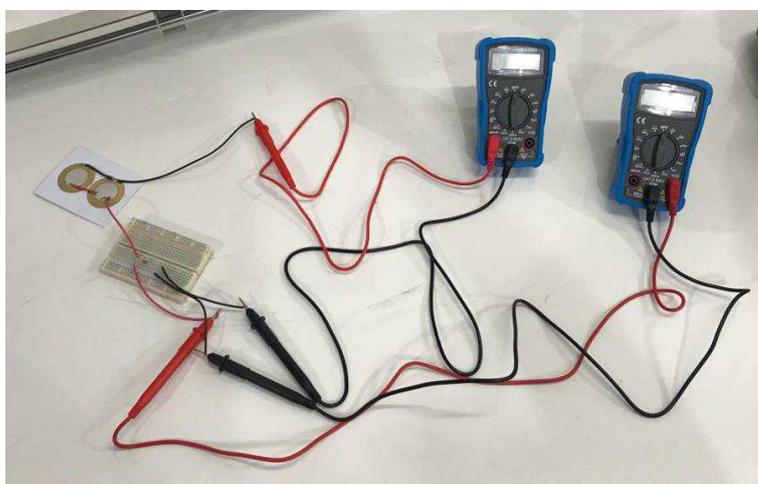


Figura 3.11. Montagem do experimento

Foram feitas dez repetições do teste para cada circuito. Os resultados do circuito em série estão descritos no Quadro 3.6 e os resultados do circuito em paralelo estão descritos no Quadro 3.7.

Quadro 3.6. Testes com pastilhas em série com a carga mecânica de 900g

Teste 1			
Medições	Tensão (V)	Corrente (μA)	Potência (μW)
1	1,15	1,9	2,185
2	1,1	1,6	1,76
3	0,8	0,9	0,72
4	0,6	0,7	0,42
5	0,76	0,8	0,608
6	0,41	0,4	0,164
7	1,15	1,9	2,185
8	0,54	0,5	0,27
9	0,55	0,6	0,33
10	0,83	0,9	0,747
Média	0,79	1,02	0,8
Erro (\pm)	0,016	0,018	0,016
Desv. Pad. Amost.	0,270	0,567	0,793

Quadro 3.7. Testes com pastilhas em paralelo com a carga mecânica de 900g

Teste 2			
Medições	Tensão (V)	Corrente (μA)	Potência (μW)
1	1,89	1,3	2,457
2	2,43	2,1	5,103
3	2,28	2,3	5,244
4	2,1	2,2	4,62
5	2	2,1	4,2
6	2,69	2,6	6,994
7	1,22	1,7	2,074
8	1,14	1,8	2,052
9	1,19	1,1	1,309
10	1,24	1,5	1,86
Média	1,88	1,91	3,78
Erro (\pm)	0,025	0,025	0,040
Desv. Pad. Amost.	0,496	0,39	1,640

3.5 Teste da quantidade de pastilhas piezoelétricas

Buscando verificar se a quantidade de pastilhas influencia na qualidade de geração de energia, foram realizados os testes com 4, 8 e 12 pastilhas associadas em paralelo, como apresentas, respectivamente, nas figuras 3.12, 3.13 e 3.14, sendo acionadas com uma carga mecânica de 1Kg (figura 3.15) lançada verticalmente a uma distância de 3 cm.



Figura 3.12. Circuito com 4 pastilhas ligadas em paralelo



Figura 3.13. Circuito com 8 pastilhas ligadas em paralelo

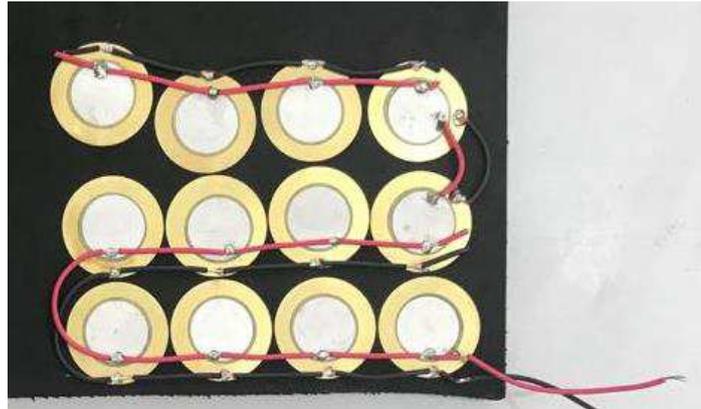


Figura 3.14. Circuito com 12 pastilhas ligadas em paralelo

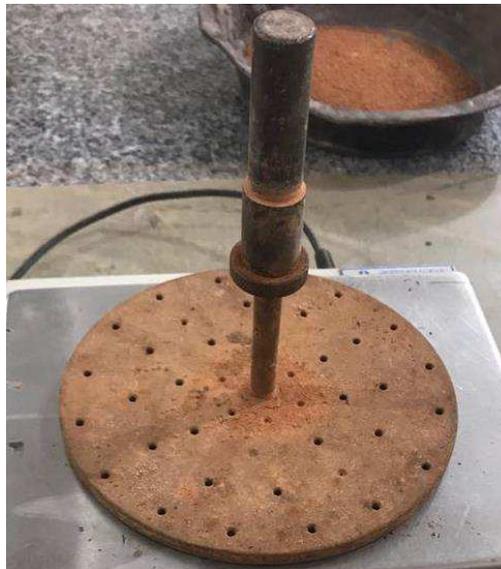


Figura 3.15. Carga mecânica de 1Kg usada no experimento

Para realização do teste foi utilizado um dispositivo resistivo de 10Ω como carga elétrica, um osciloscópio digital Agilent Technologies modelo ODS-1072B conectado em paralelo com as pastilhas, além de um multímetro ligado em série com o circuito, com a finalidade de aferir e registrar os valores da grandeza de tensão e corrente simultaneamente, através de 10 repetições para cada quantidade de pastilhas, como mostra os dados do Quadro 3.8 abaixo.

Quadro 3.8. Valores das tensões de saída do circuito paralelo

Medições	Quantidade de Pastilhas								
	4 PZT			8 PZT			12 PZT		
	Tensão (V)	Corrente (μA)	Potência (μW)	Tensão (V)	Corrente (μA)	Potência (μW)	Tensão (V)	Corrente (μA)	Potência (μW)
1	2,16	3,98	8,6	4,1	7,03	28,82	1,48	2,69	3,98
2	2,14	3,87	8,28	4,07	6,96	28,33	1,56	2,83	4,41
3	2,18	4,06	8,85	3,98	6,77	26,94	1,36	2,52	3,43
4	1,89	2,99	5,65	3,82	6,01	22,96	1,24	2,43	3,01
5	2,18	4,05	8,83	3,98	6,77	26,94	1,28	2,47	3,16
6	2,12	3,59	7,61	4,03	6,89	27,77	1,4	2,57	3,6
7	2	3,45	6,9	3,84	6,63	25,46	1,4	2,57	3,6
8	1,95	3,36	6,55	3,95	6,71	26,5	1,32	2,5	3,3
9	1,98	3,39	6,71	3,99	6,78	27,05	1,48	2,69	3,98
10	1,85	2,98	5,51	3,84	6,63	25,46	1,55	2,78	4,31
Média	2,05	3,57	7,35	3,96	6,72	26,62	1,41	2,61	3,68
Erro (\pm)	0,026	0,039	0,069	0,042	0,064	0,223	0,021	0,031	0,039
Desv. Pad. Amost.	0,125	0,409	1,268	0,098	0,281	1,686	0,110	0,136	0,477

3.6 Avaliação do uso de retificadores para pastilhas piezoelétricas

Com intuito de verificar o comportamento das pastilhas mediante retificação, foram realizados testes com auxílio de um osciloscópio digital Agilent Technologies modelo ODS-1072B, utilizando a carga mecânica da figura 3.9 e o dispositivo da figura 3.10 a uma altura de 3cm. No primeiro momento foram feitos 10 aferimentos de valores de tensão sem circuito retificador, através do osciloscópio conectado em paralelo a uma pastilha piezoelétrica. No segundo momento, foi empregado o uso do circuito retificador utilizando o mesmo método anterior, da onde se obteve os dados do Quadro 3.9.

Quadro 3.9. Dados do comportamento da pastilha piezoelétrica sem o circuito e com circuito retificador

	1 PZT		
Medições	Sem retificador	Com retificador	
1	1,68	2,94	Tensão (V)
2	1,86	3,52	
3	1,64	3,56	
4	1,69	3,84	
5	1,68	3,78	
6	1,72	3,88	
7	1,61	3,6	
8	1,54	3,52	
9	1,64	3,64	
10	1,62	3,56	
Média	1,67	3,58	
Erro (\pm)	0,023	0,038	
Desv. Pad. Amost.	0,084	0,262	

3.7 Aferição de dados elétricos para uma carga mecânica de 70Kg

A fim de buscar os dados das grandezas elétricas quando as pastilhas são submetidas a uma excitação mecânica mais semelhante ao que se pretende aplicar, ou seja, a carga mecânica de uma pessoa caminhando, foi realizado um teste com uma célula de 8 pastilhas piezoelétricas ligadas em circuito paralelo com uma pessoa de 70Kg provocando o esforço mecânico. Foi utilizada a mesma metodologia anterior, ou seja, foram realizadas 10 repetições e verificações dos valores de tensão e corrente de saída na carga elétrica de 10Ω , que correspondem aos valores apresentados no Quadro 3.10.

Quadro 3.10. Dados de tensão, corrente e potência para excitação mecânica de 70Kg

8PZTs			
Medições	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (W)
1	18,91	221,13	4,18
2	19,45	222,77	4,33
3	18,84	221,03	4,16
4	18,36	212,96	3,90
5	19,31	221,45	4,27
6	18,35	220,12	4,03
7	18,41	220,56	4,06
8	17,98	220,44	3,96
9	18,66	220,87	4,12
10	17,97	220,02	3,95
Média	18,62	220,14	4,1
Erro (\pm)	0,159	1,771	0,043
Desv. Pad. Amost.	0,507	2,641	0,141

4 RESULTADOS

Para avaliar a viabilidade da utilização do material PZT, foi necessário realizar vários experimentos laboratoriais, de forma que serão apresentados aqui os resultados obtidos por meio de gráficos e quadros.

Foram propostas algumas metodologias de verificação sobre as pastilhas piezoelétricas, conforme enumeradas abaixo:

- Análise da eficiência de geração energética segundo o tipo de ligação para várias cargas mecânicas;
- Análise da eficiência de geração energética segundo o tipo de ligação para uma carga mecânica;
- Análise da eficiência de geração energética segundo a quantidade de pastilhas piezoelétricas;
- Análise de circuito de retificação em pastilhas piezoelétricas;
- Sistema de extração de potência;
- Custos econômicos.

Os resultados apresentados a partir dessas análises tiveram o objetivo de verificar a viabilidade de implementação do uso das pastilhas piezoelétricas, dispostas como tapete em ambientes de grande movimentação, com o fim de gerar eletricidade como retorno para a sociedade, em forma por exemplo de iluminação pública.

4.1 Análise da eficiência de geração energética segundo o tipo de ligação para várias cargas mecânicas

Este teste, conforme detalhado no Item 3.3 da metodologia, foi realizado com a finalidade de verificar o comportamento das pastilhas piezoelétricas através do sinal de tensão elétrica, sob o aspecto do tipo de associação entre as pastilhas e sob o aspecto de estímulo por várias cargas mecânicas.

Os resultados foram obtidos com a utilização de um multímetro na escala DC de 20 volts, mediante a aplicação das massas (1 a 5 Kg), ou seja, testes nas pastilhas com as cargas mecânicas de força peso de 9,98, 19,62, 29,43, 39,24 e 49,05 Newtons com os piezoelétricos conectados diretamente a ele. Os valores de tensão dos circuitos série e paralelo cada um contendo 6 geradores piezoelétricos estão ilustrados nas figuras 4.1 e 4.2 abaixo.

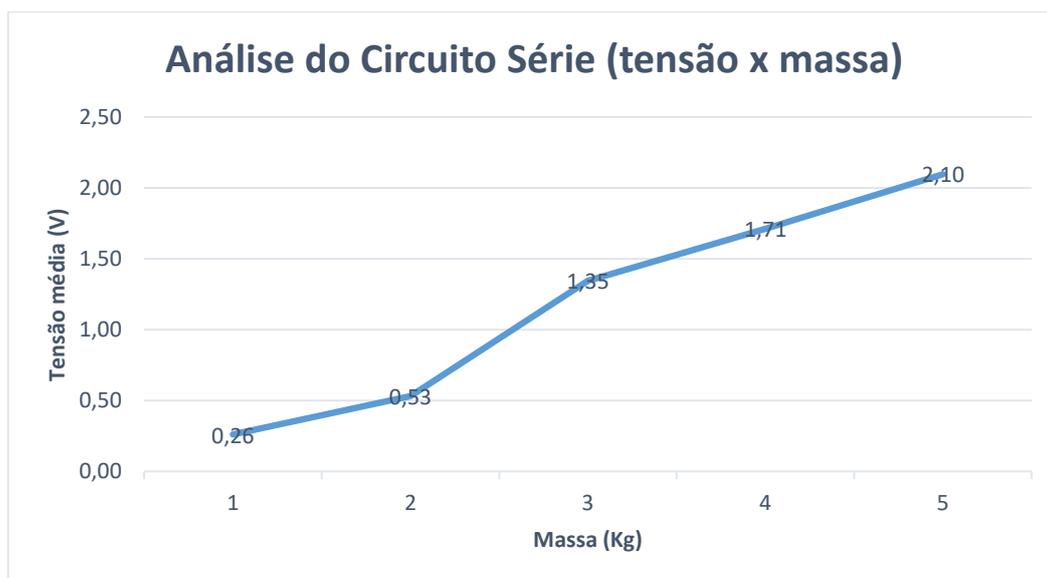


Figura 4.1. Análise do circuito série para massas de 1 a 5 Kg

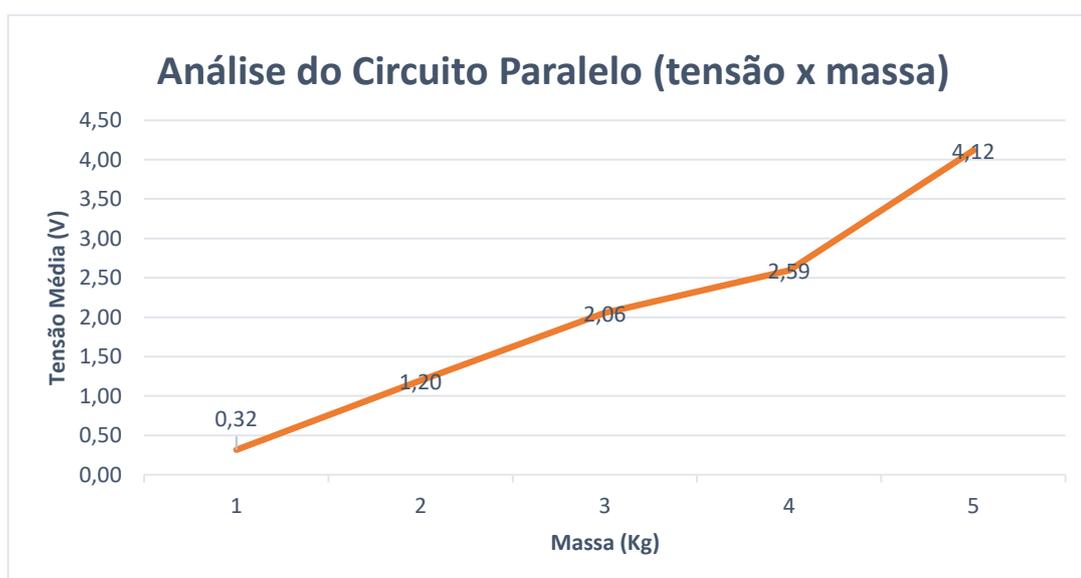


Figura 4.2. Análise do circuito paralelo para massas de 1 a 5 Kg

As figuras 4.1 e 4.2 mostram que as pastilhas, tanto associadas em série quanto em paralelo, apresentam um comportamento aproximadamente linear, ou seja, quando se aumenta a massa mecânica o valor de tensão aumenta de um resultado para o outro, porém esta não dobra, por não ser exatamente linear.

Também é possível verificar que, em ambos os casos, a qualquer excitação das pastilhas com uma quantidade mínima de massa, houve uma resposta de saída de energia, ou seja, pode-se afirmar que quanto maior a pressão exercida através da carga mecânica, maior é a deformação das pastilhas, portanto maior resposta energética.

De posse dos valores de tensão de cada circuito, foi feito um gráfico comparativo (figura 4.3) para melhor visualização do desempenho de cada tipo de circuito, a fim de escolher o mais adequado para construção do tapete piezoelétrico.

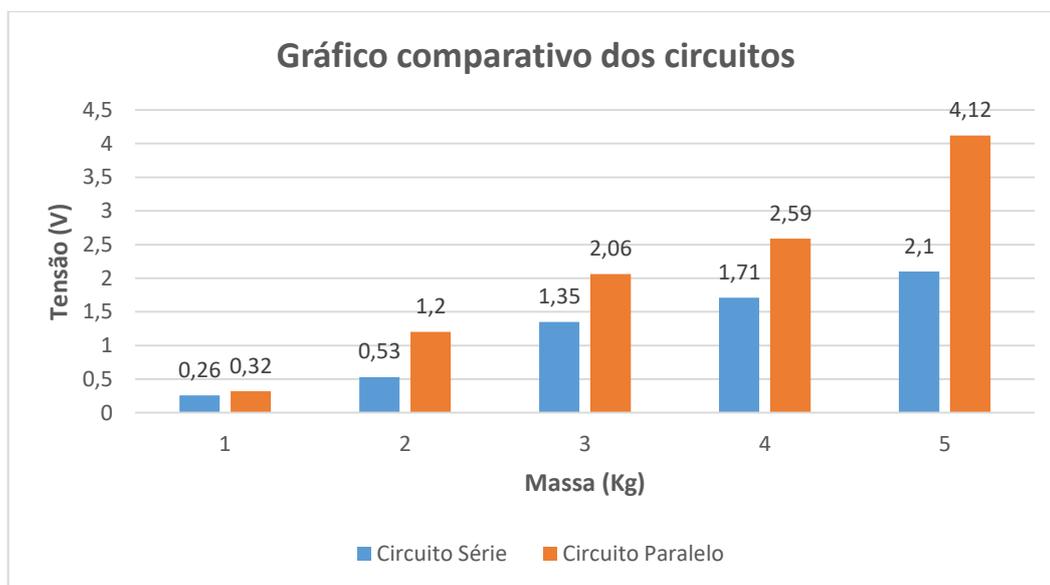


Figura 4.3. Comparação dos resultados dos circuitos série e paralelo

Comparando os resultados dos circuitos série e paralelo, foi possível calcular a porcentagem do aumento de tensão entre os dois circuitos. Para massa de 1Kg houve um aumento de 18,75% do circuito série para o paralelo, para a de 2Kg houve um aumento de 55,83%, para a de 3Kg houve um aumento de 34,43%, 4Kg houve um aumento de 34,64% e para 5Kg um

aumento de 49,02%. Dessa maneira, na perspectiva sob a análise da grandeza de tensão é admissível afirmar que as pastilhas ligadas em paralelo apresentam melhor atuação. Entretanto, somente com a grandeza tensão não se pode comprovar efetivamente que o circuito paralelo é o mais eficiente na geração de energia, pois, do ponto de vista elétrico, isso é avaliado por meio da grandeza física potência elétrica.

4.2 Análise da eficiência de geração energética segundo o tipo de ligação para uma carga mecânica

Com o propósito de constatar se as pastilhas piezoelétricas ligadas em paralelo é a maneira mais adequada no processo de geração de energia, foi realizado um novo teste comparativo, consoante ao método do item 3.4, com a intenção de medir não somente tensão, mas também corrente e, por consequência, potência elétrica, que é o meio mais efetivo de comprovar a eficiência de geração. A potência, consoante Boylestad (1998) pode ser calculada através da equação 4.1:

$$P = V \times I \quad (4.1)$$

Onde, P é a potência fornecida pela cápsula piezoelétrica (W), V é a tensão elétrica fornecida pela cápsula (V) e I é a corrente elétrica fornecida pela cápsula piezoelétrica (A).

Diferente do teste anterior, este foi realizado mantendo-se a mesma intensidade de carga (900g) ou aproximadamente 8,83 N aplicada sobre as pastilhas, porque já é de conhecimento que quando se aumenta a carga mecânica obtêm-se resultados energéticos mais significativos. Além disso, foram utilizadas apenas duas pastilhas associadas em série e duas pastilhas associadas em paralelo para aferimento de tensão e corrente elétricas.

Os dados de corrente e tensão para o circuito série foram apresentados, anteriormente, no Quadro 3.6 e para o circuito em paralelo foram apresentados no Quadro 3.7. A partir desses dados foi possível encontrar os valores de potência que foram plotados graficamente de acordo com o tipo de circuito, como mostra a figura 4.4.

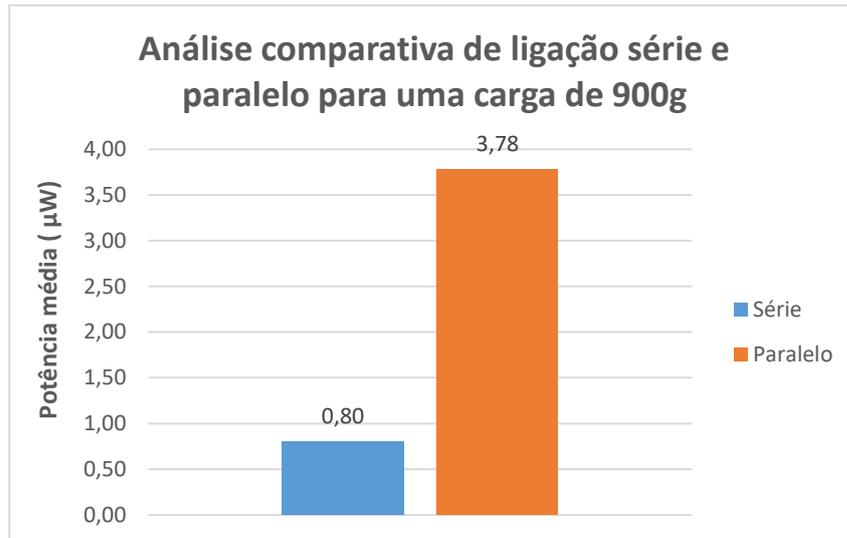


Figura 4.4. Comparação da potência média do circuito série e paralelo, aplicando-se uma carga de 900g

Conforme análise do gráfico de colunas da figura 4.4, pode-se finalmente afirmar que para a situação das pastilhas associadas em paralelo é possível encontrar valores de potência mais significativos, portanto esse tipo de configuração se caracteriza como mais eficiente na geração de energia elétrica.

4.3 Análise da eficiência de geração energética segundo a quantidade de pastilhas piezoelétricas

Como foi confirmado a eficiência do circuito paralelo, foi utilizada essa configuração em um novo teste, tentando averiguar a resposta das pastilhas piezoelétricas sob o aspecto de quantidade de pastilhas associadas para uma mesma carga mecânica de 1Kg, equivalente a uma força peso de aproximadamente 9,98N, aplicada, conforme discriminado no tópico 3.5.

Com o auxílio do osciloscópio e multímetro, foi possível registrar os valores de tensão, corrente elétrica e potência que os circuitos de 4, 8 e 12 PZTs produziram, como mostra o Quadro 3.8. A partir dos resultados dos testes, constatou-se que do grupo de 4 PZTs para o de 8PZTs houve um aumento da tensão, corrente e conseqüentemente da potência, mas quando se observa

o resultado do grupo de 12 PZTs, esses valores decaem consideravelmente como mostra graficamente as figuras 4.5, 4.6 e 4.7.

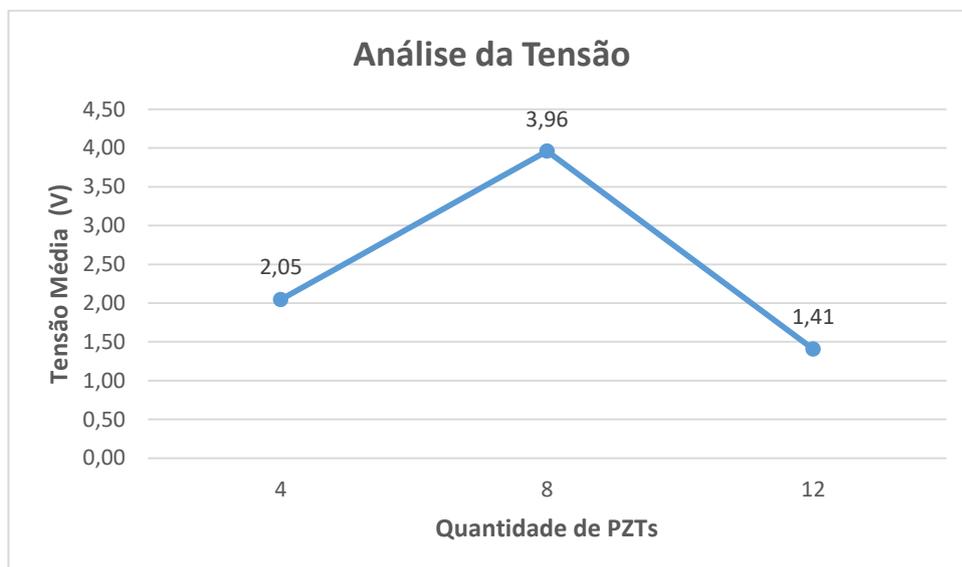


Figura 4.5. Análise da média da tensão para 4, 8 e 12 pastilhas em paralelo, para uma força peso de aproximadamente 9,98N

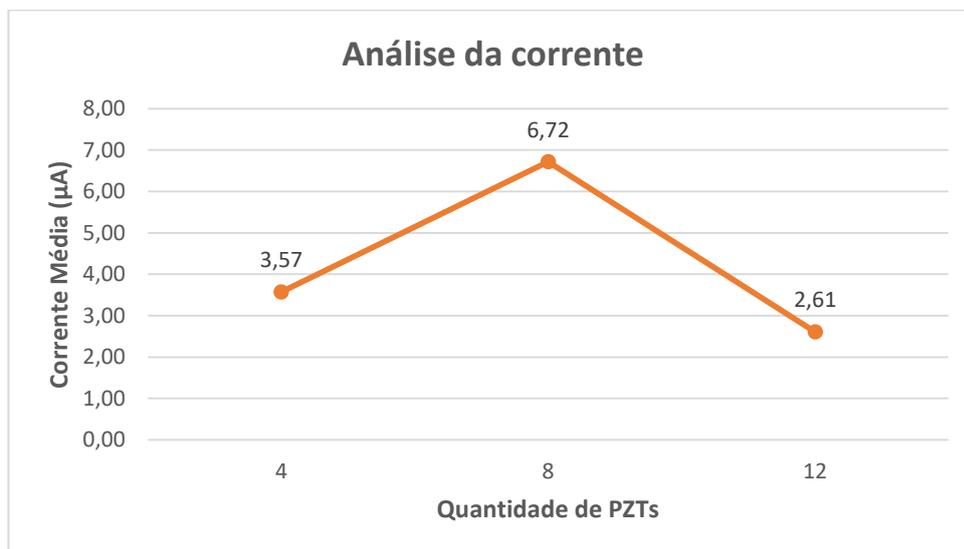


Figura 4.6. Análise da média da corrente para 4, 8 e 12 pastilhas em paralelo, para uma força peso de aproximadamente 9,98N

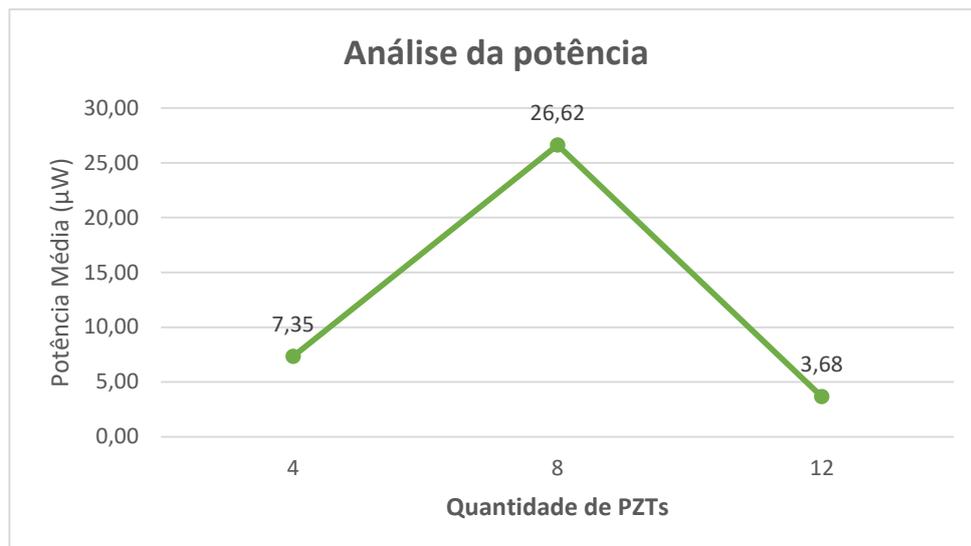


Figura 4.7. Análise da média da potência para 4, 8 e 12 pastilhas em paralelo, para uma força peso de aproximadamente 9,98N

Segundo a lei da conservação de energia, a elevação de fontes, ou seja, o aumento do número de fontes implicaria necessariamente em um aumento da potência extraída do conjunto de pastilhas piezoelétricas associadas, que ao se juntarem resultariam numa potência extraída maior do que quando fosse empregado um número menor de pastilhas. Então, comparando os dois cenários, obviamente entende-se que uma quantidade de pastilhas maior seria ideal para o processo de geração, entretanto esse comportamento não é observado nos resultados dos testes realizados apresentados nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7, aqui descritos já anteriormente. Acontece que ao juntá-las, as pastilhas precisam ser pressionadas mecanicamente por um intervalo de tempo, sendo que essa pressão não se dá uniformemente ao longo de todas as pastilhas.

Analisando esta situação observa-se que por falta de homogeneidade ao se pressionar algumas pastilhas enquanto que outras não, resulta na geração de energia somente por parte das que foram pressionadas, de modo que as que não foram pressionadas passam a receber e consumir a energia das que foram acionadas e exercer o efeito inverso de funcionamento, que é transformar energia elétrica em deformação mecânica, de modo que é um resultado que se perpetua em cadeia.

De um modo geral, os maiores valores encontrados em termos de tensão, corrente e potência, portanto, energia gerada, foram alcançados para a quantidade de 8 pastilhas

piezoelétricas (PZTs) conectadas em paralelo, segundo resultados obtidos no teste, que indicam que com essa quantidade as pastilhas associadas continuam com resultados satisfatórios, todavia, sem apresentarem problemas com retroalimentação. À vista disso, infere-se o uso de 8 pastilhas piezoelétricas formando uma célula (bloco) geradora, controlada, com finalidade de otimizar o processo de geração, por um circuito de extração de potência que inclua um circuito retificador de onda completa. Haja vista que a quantidade células geradoras dependerá da carga em que se deseja aplicar a energia gerada e que para cada célula será necessário um circuito de extração.

4.4 Análise de circuito de retificação em pastilhas piezoelétricas

Diante da problemática da retroalimentação dos componentes piezoelétricos, concluídas através dos resultados adquiridos no tópico anterior, decidiu-se que um recurso seria o uso de componentes que pudessem controlar a saída nas pastilhas piezoelétricas, com o objetivo de que fosse possível melhorar a qualidade da energia gerada.

Optou-se pelo uso de circuitos retificadores de onda completa, também conhecida como retificadores em ponte, por se entender que cada elemento piezoelétrico tem um sinal de resposta diferente e que muitas vezes eles podem se cancelar, resultando em alguns intervalos de pouco ou nenhuma energia gerada, devido à distribuição não homogênea de carga mecânica, que leva a não linearidade na geração de energia. Antes de o sinal ser retificado, apresentava as características da figura 4.8 e a figura 4.9 apresenta o sinal de saída da pastilha piezoelétrica mediante retificação.

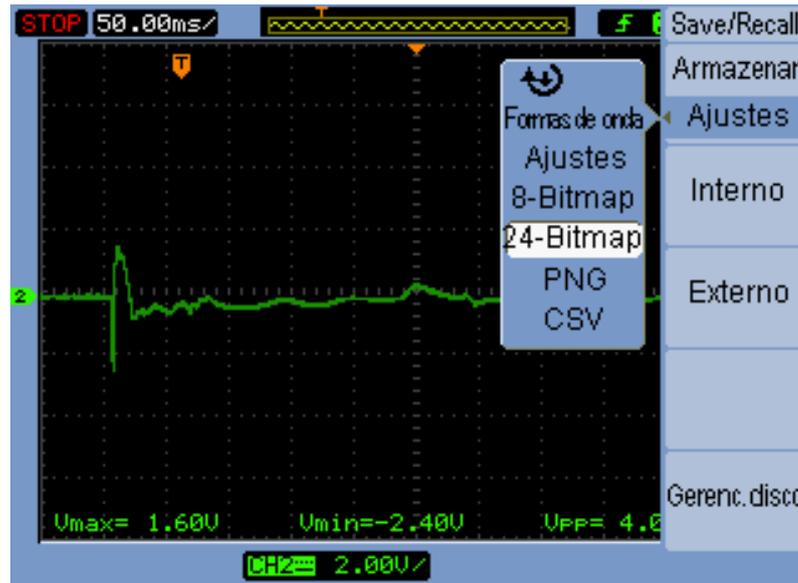


Figura 4.8. Sinal de resposta de uma pastilha piezoelétrica sem circuito retificador visualizado através de osciloscópio



Figura 4.9. Sinal de resposta de uma pastilha piezoelétrica com circuito retificador visualizado através de osciloscópio

A figura 4.10 mostra resultados de tensão gerada para o circuito em aberto e uma comparação da tensão retificada. É notoriamente visível que a retificação melhora consideravelmente os valores máximos de tensão de saída das pastilhas piezoelétricas. A forma

de onda encontrada na Figura 4.9 sugere que a ponte retificadora poderia ser utilizada em ocasiões em que se necessita de um funcionamento ininterrupto da carga externa, dispositivo a ser alimentado, pois apresentada um comportamento contínuo.

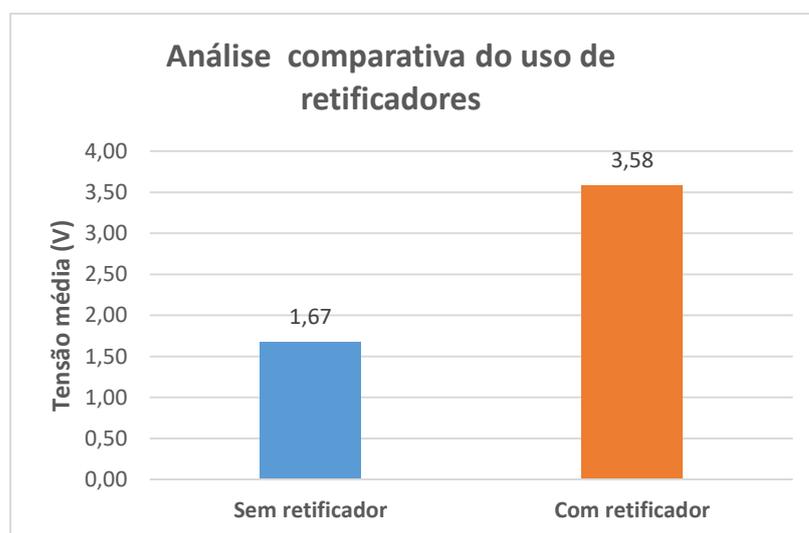


Figura 4.10. Gráfico comparativo da média da tensão máxima para uma pastilha sem retificador e com retificador

4.5 Sistema de extração de potência

O bloco de armazenamento é responsável por armazenar a energia gerada pelos transdutores piezoelétricos quando deformados. Como citado na revisão bibliográfica, no item 2.7.5 o armazenamento deste tipo de aplicação pode ser feito por capacitores, supercapacitores ou por baterias recarregáveis; no entanto, para este projeto será utilizado bateria recarregável, a escolha dos armazenadores se deu com base nas bibliografias e na matriz de decisão, utilizando alguns critérios importantes voltados para aplicação das pastilhas piezoelétricas para iluminação pública como mostra o Quadro 4.1.

Quadro 4.1. Matriz de decisão para escolha do armazenador de energia

Matriz de decisão				
CRITÉRIOS	Pesos	Bateria	Capacitor	Supercapacitor
Custo	5	7	8	5
Capacidade de armazenamento	5	10	2	8
Velocidade de carregamento	3	5	8	10
Velocidade de descarregamento	4	9	5	7
Soma (Peso x Nota)		136	94	123

Por possuir grande capacidade de armazenamento de energia, baixa velocidade de descarregamento e um valor aquisitivo não muito elevado, as baterias podem ser carregadas periodicamente pelas pastilhas piezoelétricas, condição que leva a um aumento da autonomia de todo o sistema, pois a necessidade de potência é suprida continuamente.

Para um sistema de extração eficiente, é necessária uma interface que facilite o armazenamento da energia gerada, para isso é recomendável a utilização de um componente LTC 3588 (figura 4.11), conforme mostram os estudos de Silva (2017) e de Ferreira (2017), que é um tipo de regulador de tensão com alto nível de conversão e eficiência, que permite o acúmulo de cargas em baterias. Segundo Silva (2017), no uso de fontes de energia alternativa podem acontecer picos de tensão e corrente capazes de causar danos a equipamentos que estiverem conectados, então se faz necessário o uso desse componente para controlar a carga.

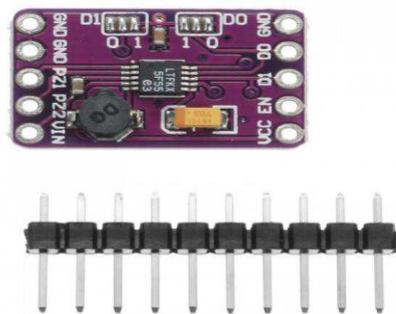


Figura 4.11. Componente regulador de tensão LTC 3588 (Alexnld, 2018)

Conforme datasheet Linear Technology (2018), o LTC 3588 possui nas suas características internas, um retificador de ponte de onda completa e um conversor Buck, que serve para retificar

a entrada das pastilhas piezoelétricas, regular e estabilizar a tensão de entrada do sistema, além de transferir eficientemente a carga armazenada para sua saída.

Ferreira (2017) apresenta em seus estudos o sinal retificado utilizando o retificador de baixa perda do módulo LTC-3588, onde é possível verificar a estabilidade do sinal por intermédio da sua utilização. A figura 4.12 exibe a resposta das pastilhas piezoelétricas através de regulagem por meio do componente LTC-3588.



Figura 4.12. Sinal de piezoelétricos retificado com LTC-3588 (Ferreira, 2017)

Porém, do ponto de vista monetário, esse dispositivo se torna inutilizável para este projeto (tópico 4.6 de custos), porque este propõe verificar a viabilidade de implantação a custos baixos.

Diante desta problemática, buscou-se uma solução alternativa através do uso separado dos dispositivos que compõem o LTC 3588, por apresentarem baixo custo. De acordo com os estudos de Sanches (2015) pode se empregar o uso de CI DB 101, que é um retificador de onda completa, que é bastante eficiente na retificação dos sinais de entrada das pastilhas piezoelétricas, como comprovado experimentalmente no tópico 4.4, o uso de um conversor DC-DC Buck (abaixador), para elevação e estabilização da tensão em relação a amplitude de tensão de entrada. A figura 4.13 ilustra o esquemático do circuito de extração de energia elétrica alternativo utilizado.

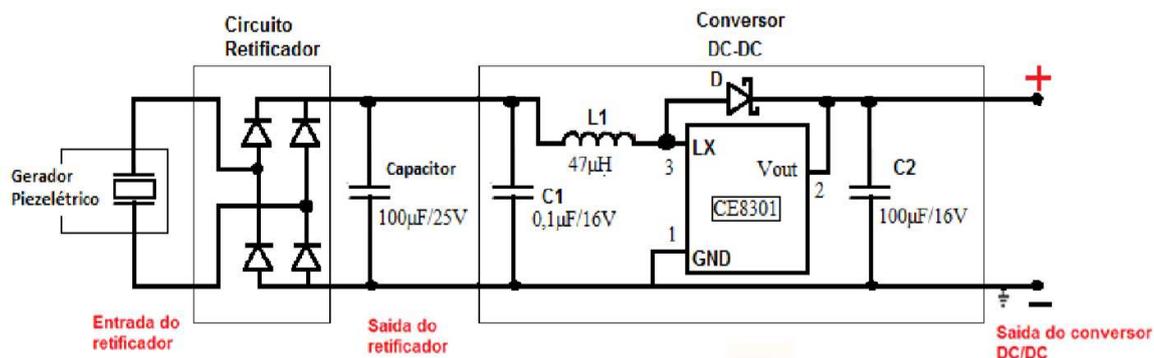


Figura 4.13. Esquema do gerador piezoeletrico conectado ao retificador e conversor DC-DC (Adaptada de Sanches, 2015)

4.6 Custos econômicos

Para termos uma projeção de quanto será necessário para alimentar uma luminária pública em escala real, foi realizado um teste segundo o Item 3.7 da metodologia. Conforme o Quadro 3.10, supõe-se que uma célula de 8 pastilhas piezoelétricas de 35mm ligadas em paralelo submetidas a uma carga mecânica de 70kg consegue gerar uma média de 220 mA e uma tensão de 18,62 V, ou seja, associando em paralelo duas células com 8 pastilhas piezoelétricas cada, seria possível obter 440mA de corrente e 18,62V de tensão, segundo o princípio de associação de geradores em paralelo. Assim duas células associadas conseguiriam fornecer cerca de 8,19W, o que é suficiente para acender uma lâmpada LED de 8W. O Quadro 4.2 apresenta os custos estimados dos materiais para que se possa alimentar uma lâmpada LED através do uso de piezoelétricos.

Quadro 4.2. Custos estimados dos materiais para alimentar uma lâmpada LED de 8W

Componente	Quant.	Preço unitário	Preço total
Pastilhas piezoelétricas 35mm	16	R\$ 1,00	R\$ 16,00
Circuito retificador DB101	2	R\$ 0,99	R\$ 1,98
Conversor DC-DC buck	2	R\$ 2,50	R\$ 5,00
Borracha EVA	200g	13,99 (1kg)	R\$ 2,79
Fio de 0,32mm ²	2m	R\$ 0,50	R\$ 1,00
Bateria recarregável	1	R\$ 18,00	R\$ 18,00
Total			R\$ 44,77

Para que seja feita substituição total ou parcial da energia proveniente da concessionária por uso de geradores piezoelétricos para gerar energia elétrica, com finalidade de iluminação pública de um lugar de grande movimentação é necessário um estudo mais aprofundado da quantidade de luminárias que o sistema deve suprir e o seu consumo detalhado (dados devem ser fornecidos pela concessionária), além de verificação do tamanho da área e um estudo mais aprofundado sobre o circuito de extração e armazenamento para a aplicação em questão. Todas as variáveis devem ser cuidadosamente consideradas para que este tipo de sistema seja eficiente na sua função de gerar energia, pois ainda é passível de comportamentos desconhecidos.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou como principal contribuição um modelo de gerador piezoelétrico, que aponta a possibilidade de aplicação de circuitos simples e pastilhas piezoelétricas de baixo custo em sistemas de *power harvesting* estimulados de forma intermitente, isto é, sem periodicidade definida, proveniente da simulação de impactos da passagem de pessoas caminhando. Para ilustrar e apontar o potencial desta proposta foram realizados procedimentos experimentais, que apresentaram resultados satisfatórios para o desenvolvimento desta área de pesquisa, conforme discutido anteriormente.

Considerando os resultados dos testes realizados, foi certificado que a pastilha piezoelétrica mesmo com pequenos estímulos mecânicos é capaz de gerar facilmente uma diferença de potencial, ou seja, mesmo à mínima incitação de pressão de uma massa e pequena quantidade de piezoelétricos é possível extrair energia desses elementos.

Em relação às respostas das tensões de saída das ligações em série e paralelo das pastilhas, em função da variação da quantidade de massa, observou-se que não apresentam linearidade, porém crescem à medida que se aumenta a carga mecânica, ou seja, dobrando ou triplicando a carga, os valores de tensão não dobram ou triplicam, porém ficam bem próximos dessa condição. Dessa forma, os resultados de maior expressão em termos de tensão e quantidade de carga mecânica foram alcançados pelo circuito paralelo, tendo em média a geração de 38% de energia a mais que o circuito em série.

Os testes experimentais realizados a fim de fundamentar a maior eficiência de geração de energia por pastilhas piezoelétricas ligadas em paralelo comprovaram, não somente em termos de tensão, mas também de corrente e potência, que a ligação em paralelo é a mais apropriada; ou seja, para uma carga mecânica de 900g conseguiu gerar um potência de $3,78\mu\text{W}$ para o circuito em paralelo, à medida que em série foi gerado $0,80\mu\text{W}$ de potência, assim, o circuito paralelo consegue ser aproximadamente 78% mais eficiente do que o circuito série.

Embora se esperasse que a quantidade de energia gerada dependa da quantidade de pastilhas instaladas e que quanto maior a quantidade, mais energia é gerada, constatou-se que a partir da utilização de 9 PZTs, algumas pastilhas, que na pratica nunca são excitadas

homogeneamente, apresentam retroalimentação, o que acaba provocando o efeito inverso de funcionamento nas outras, que é transformar energia elétrica em deformação mecânica, pois estas passam a consumir o que foi gerado. Assim, a quantidade de pastilhas que apresentou resultados mais satisfatório, em teor de potência gerada, foi a de 8 PZTs. Diante destes resultados, propôs-se o uso de 8 pastilhas piezoelétricas formando uma célula geradora, controlada por um sistema de extração.

Com o objetivo de melhorar a qualidade da energia gerada, foi estudado o uso de um circuito retificador de onda completa na saída dos elementos piezoelétricos. Foi verificado que a retificação melhora substancialmente os valores máximos de tensão de saída das pastilhas piezoelétricas e que na ausência do circuito retificador, a não linearidade na geração de energia em cada elemento, leva ao cancelamento dos sinais de respostas gerados pelas pastilhas, que acarreta a nenhuma potência fornecida em alguns intervalos de tempo, o que justifica o uso do circuito retificador.

Pode-se concluir que a tensão de saída do sistema de geração não é fixa, varia muito conforme a pressão aplicada no material piezoelétrico, desta maneira, os resultados confirmam a necessidade de se ter um controle da energia fornecida pelo gerador piezoelétrico. Condizantemente com a bibliografia, indica-se o uso do LTC 3588, que possui em suas características um retificador de onda completa e um conversor Buck, todavia, este dispositivo possui alto custo de aquisição, o que não é adequado para este projeto, já que é visado implementação a baixos custos. Assim sendo, sugeriu-se o uso separado dos dispositivos que compõem o LTC 3588, por apresentarem baixo custo, um circuito CI DB 101, que é um retificador de onda completa, e um conversor DC-DC Buck (abaixador), para que a tensão seja regulada na sua saída e possa ser armazenado em baterias recarregáveis, que foi o dispositivo de armazenamento escolhido segundo a matriz de decisão juntamente com pesquisas bibliográficas por aumentar a condição de autonomia de todo o sistema.

A partir do teste experimental simulando o caminhar de uma pessoa de 70Kg no tapete com uma célula de 8 pastilhas (ligadas em paralelo), alcançou-se para uma média de potência de 4,10W. Com base nesse resultado, foi possível estimar que duas células associadas forneceriam cerca de 8,19W, potência suficiente para acender uma lâmpada de LED de 8W. Tendo a posse desses valores, o custo total para alimentar essa lâmpada foi de 44,78 reais, porém para

implementação definitiva dos geradores para iluminação pública em um lugar de grande movimentação é fundamental um estudo mais aprofundado, pois esse sistema é passível de comportamentos desconhecidos.

Por fim, pode-se inferir que todos os objetivos do proposto trabalho foram alcançados. Comprovando de fato a conversão da energia mecânica em energia elétrica, podendo ser caracterizado como um sistema de energia alternativa, limpa e de baixo custo, porém é importante ressaltar a necessidade de realizar mais estudos, apontados no tópico abaixo.

5.1 Estudos futuros

Tendo em vista tudo que foi elucidado na realização desse trabalho, entende-se como uma sequência natural fazer melhorias e explorar mais abordagens sobre o tema, em razão do panorama de uso de pastilhas piezoelétricas como geradoras de energia elétrica ainda ser relativamente novo, de forma que se sugere uma continuidade deste trabalho, em forma de trabalhos futuros. Assim, se propõe o seguinte:

- Elaborar um estudo sobre o tempo de carga de bateria em função do fluxo de pressão nos piezoelétricos.
- Estudar materiais e geometrias mais complexas para base e anteparo das pastilhas piezoelétricas na construção do tapete, de modo a explorar a deformação das pastilhas para definir qual a forma que melhora o seu desempenho.
- Considerar outras topologias para o circuito de extração de energia, as quais incluem elementos para controle da energia gerada.
- Outra proposta seria aumentar o número de pastilhas em um nível de escala real, de modo a construir um protótipo para que este seja aplicado e avaliado por análises qualitativas e quantitativas.
- Realizar avaliação econômica mais completa para uma implementação prática do tapete piezoelétrico em um lugar de grande movimentação, como na rua Grande da cidade de São Luís, que possui o fluxo de transeuntes muito intenso.
- Além de aperfeiçoar a técnica de soldagem dos fios nas ligações das pastilhas.

Ao desenvolver estas propostas, todos os estudos e testes apresentados neste trabalho podem ser aperfeiçoados, abrangendo uma gama maior de aplicações e contribuindo de forma mais ampla e efetiva tanto para conhecimentos acadêmicos, quanto para a sociedade.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de informações da geração.** Brasília, DF. 2010. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp>>. Acesso em: 06 abr. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.** Brasília, DF. 2009. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/nreh2009772.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2018.

ALEXNLD. 2018. Disponível em: <<https://alexnld.com/product/gy-ltc3588-ltc3588-energy-harvester-breakout-ltc-3588-energy-harvest-collector/>>. Acesso em: 20 maio 2018.

ANDERSON, Robert S.; ANDERSON, Suzanne P.. **Geomorphology: The Mechanics and Chemistry of Landscape.** Boulder: Cambridge University Press, p. 187, 2010. 651 p.

BONNABEL, A.; CHARENTENAY, Y. De. Emerging Energy Harvesting Devices. **Yole Développement- Market & Technology Report**, n.12, 2012.

BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos.** 10. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

BOYLESTAD, Robert; Nashelsky, Louis. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 5ta. Ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1998.

BRAGA, N. C. **Instituto Newton C. Braga.** Junho 2017. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/artigos/54-dicas/5389>>. Acesso em: 12 abr. 2018.

CADY, W. G.; Piezoelectricity: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals. Dover Press, 1964.

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução.** 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CAMARA, Fernando Henrique de Oliveira. **Análise de uma piezoestrutura (PZT) multifrequência para geração, extração e armazenamento de energia.** 2012. 102 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

CELLULAR, Ana Carolina Souza. **Análise da influência de efeitos não-lineares em sistemas de colheita de energia baseados em vibração utilizando materiais piezoelétricos.** 2016. 72 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, (coppe), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CUI INC. Disponível em: <<https://www.cui.com/product/audio/buzzers/audio-transducers/piezo-elements/ceb-27fd44>>. Acesso em: 07 maio 2018.

DAHIYA, Ravinder S.; VALLE, Maurizio. **Robotic Tactile Sensing: Technologies and System.** New York: Springer Netherlands, 2013. 248 p. (TRADUÇÃO)

DEPEXE, Márcio Dalcul. **Concepção de um circuito energy harvesting aplicado a redes de sensores sem fio para sistemas de iluminação.** 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014. Cap. 2.

DINEVA, Petia et al. **Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials: Solution of Time-Harmonic Problems via BIEM.** 7. ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2014.

DUPONT, Fabrício Hoff; GRASSI, Fernando; ROMITTI, Leonardo. Energias renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n. 1, p.70-81, 18 ago. 2015.

DU TOIT, Noel Eduard. **Modeling and Design of a MEMS Piezoelectric Vibration Energy Harvester** - Massachusetts Institute of Technology 2005.

EIRAS, José Antônio. **Materiais Piezoelétricos.** São Carlos, SP. Departamento de Física da Universidade Federal de São Carlos, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2014: ano base 2013.** Rio de Janeiro: EPE, 2014.

FARRET, Felix Alberto. **Aproveitamento de pequenas fontes de energia elétrica.** 3ª edição. Santa Maria: Editora da UFSM – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 2014. 319p.

FERREIRA, Luiz Fernando Suzarte Silva. **Sistema de geração de energia via sensores piezoelétricos**. 2017. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas - Fatecs, Centro Universitário de Brasília - Uniceub, Brasília, 2017. Cap. 2.

FORWOOD, Anthony K. **They Would Be Gods**. Lulu.com. ISBN 9781257373628, 2011.

FREITAS, Ricardo Luiz Barros. **Fabricação, caracterização e aplicações do composto PZT/PVDF**. 2012. 124 f. Tese (doutorado) - Área de Conhecimento: Automação, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira. Disponível em: <<http://base.repositorio.unesp.br/handle/11449/100281>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

GOMES, Daniel Sampaio; LANDIM, Gustavo José Gomes C.; ALVARENGA, Silas das Dores de. **CONSTRUÇÃO DE TAPETE PIEZOELÉTRICO**. Artigo (Iniciação Científica) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Educacional Nossa Senhora Auxiliadora, Rio de Janeiro, 2016.

GRAFF, K.F. **A history of ultrasonics Physical Acoustics**. v.15. Ed. New York: Academic, 1981, pp 2–97.

HALLIDAY, David. **Fundamentos da Física volume 1**, 8ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

HARVEY, James A. **Smart Materials**. In: Kutz, M. Handbook of Materials Selection, Ed. John Wiley & Sons, E.U:A, 2002.

HERBERT, J. M., em “**Ferroelectric Transducers and Sensors**”, Gordon and Breach Science Publishers, N. York – London – Paris, 1982.

IKEDA, Takuro. **Fundamentals of piezoelectricity**. New York: Oxford university press, 1990. 263p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, IEA – **World Energy Outlook 2009**, Paris, 2009b.

JABBAR, H. et al. **RF Energy harvesting and circuits for charging RF energy harvesting system of mobile devices**. IEEE Transactions on Consumer Electronics, v56, p.277-253, 2010.

JAFFE, Bernard.; COOK JR , W. R.; JAFFE, Hans. **Piezoelectric ceramics**. New York: Academic press inc., 1971. 317p.

JANNUZZI, Gilberto de Martino; VARELLA, Fabiana K. O. M.; GOMES, Rodolfo Dourado Maia. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil: Panorama da atual legislação.** Campinas: International Energy Initiative, 2009. 53 p.

JORDAN, T.; OUNAIES, Z. **Piezoelectric Ceramics Characterization**, 2001, ICASE Report No. 2001-28, Disponível em:<<http://hdl.handle.net/2002/14062>>. Acesso em: 11 Abr. 2018.

KASAP, S. O., **Electronic Materials and Devices**, International Edition, 2^a ed, Boston 2000.

KAWAI, H. The Piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride). **Japanese Journal of Applied Physics**, v.8, May 1969.

KHALIGH, A., ONAR, O., **Energy Harvesting: Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems.** Energy, Power Electronics, and Machines, CRC Press, 2009.

KUHN, Gustavo Gomes. **Caracterização de um sistema piezoeletrico para geração de energia elétrica.** 2014. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

LAGOUDAS, D.C., “**Shape Memory Alloys, Modeling and Engineering Applications**”, Department of Aerospace Engineering Texas A&M University, Springer Science Business Media, LLC, 2008.

LINEAR TECHNOLOGY. DATASHEET LTC 3588. Disponível em: <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/35881fc.pdf>> Acesso em: 20 mai. 2018.

MAKKI, Noaman; POP-ILIEV, Remon. **Piezoelectric power generation in tires**, SPIE Smart Sens. 20 May 2011, SPIE Newsroom. Vol.: Published online DOI: 10.1117/2.1201104.003702, 2011.

MANUAL MINIPA. Multímetro digital ET-1002. Disponível em <<http://www.minipa.com.br/images/Manual/ET-1002-1103-BR.pdf>> Acesso em 07 abril.2017

MARTINS, Pedro; LOPES, Ana Catarina; LANCEROS-MENDEZ, Senentxu. Polímeros piezoeletricos: Características, aplicações, perspectivas. **Gazeta de Física: Para os físicos e amigos da física**, Portugal, v. 37, n. 3, p.3-6, 2014. Trimestral.

MHETRE, M. R.; NAGDEO, N. S. e ABHYANKAR, H.K. **Micro Energy Harvesting for Biomedical Applications: A review**. 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, v. 3, p. 1-5, 2011.

MINETO, Andreza Tangerino. **Geração de Energia Através da Vibração Estrutural de Dispositivos Piezelétricos Não Lineares**. 2013. 167 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Carlos, São Carlos, 2013. Cap. 1.

MONTANHER, Diogo Zampieri. **Caracterização e Desempenho de Transformadores de Estado Sólido Radiais Multiferroicos**. 2010. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Graduação da Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

MOTOKI, Akihisa. **Mineralogia e petrografia para iniciantes**. 2003. 18 f. Apostila - Curso de Mineralogia, Uerj, Rio de Janeiro, 2003.

MUNDO DA ELÉTRICA. **Ligação em série ou ligação em paralelo?** 2018. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/ligacao-em-serie-ou-ligacao-em-paralelo/>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

MURATA. **Manual do componente Buzzer Piezoelétrico**. Disponível em : <www.murata.com/products/catalog/pdf/p15e.pdf > Acesso em 07 maio 2018.

NEWNHAM, RE et al. **Composite piezoelectric transducers**. Mater. Eng. 1980; 2:93–106.

OLIVEIRA, Sergio de Almeida. **Modelagem termomecânica de ligas com memória de forma em um contexto tridimensional**. 128 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2013.

OTTMAN, G. K.; HOFMANN, H. F.; LESIEUTRE, G. A. **Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode**. IEEE Transactions on Power Electronics, New York, v. 18, n. 2,p. 696-703, 2003.

PADILHA, Angelo Fernando. **Materiais de engenharia: Microestrutura e Propiedades**. Curitiba: Hemus, 2000. 343 p.

PEARSON, R. P. **Modeling and development of piezoceramic energy harvester for munitions applications**. 2006. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Villanova Universty, Philadelphia, Pennsylvania - EUA , 2006.

PEREIRA, Antônio Henrique Alves. **Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades.** 2010, Atcp Engenharia Física, São Carlos, 2010. 2-4.

PERLINGEIRO, Antônio Ramos; PIMENTA, Gilberto Maia; SILVA, Salviano Evaristo da. **Geração de energia através de materiais piezoelétricos.** 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2016.

PINNA ,L.; DAHIYA, Ravinder S; VALLE, Maurizio, G.M. Bo, **Analysis of self-powered vibration-based energy scavenging system**, in ISIE 2010: The IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bari, Italy, 2010, p. 1–6.

PREUMONT, A. **Vibration control of active structures: an introduction.** 2 ed. Norweel, Ma – EUA: Luwer Academic, 2002.

PRIYA,S., INMAN, D. J., **Energy Harvesting Technologies.** Springer Publishing Company, Incorporated, 1st ed., 2008.

RAMADASS, Y. K.; CHANDRAKASAN, A. P. **An efficient piezoelectric energy harvesting interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor.** IEEE Journal of Solid-State Circuits, Piscataway, v. 45, n. 1, p. 189-204, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2009.2034442>>. Acesso em: 16 abr. 2018.

RAMADASS,Y. K. **Energy processing circuits for low-power applications.** 2009. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Massachusetts Institute of Technology,Cambridge, Massachusetts – EUA, 2009.

SANCHES, Fabricio Marqui. **Sistema de geração e armazenamento de energia elétrica utilizando transdutor piezoelétrico na forma pulsada.** 2015. 75f. Dissertação (Mestrado). Curso de Automação, Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2015.

SANTOS, Pedro Miguel Andrade. **Desenvolvimento de um robô móvel com energy harvesting.** 2015. 199 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015. Cap. 2.

SILVA, L.L. et.al. **“On the Effect of the Piezoelectric Hysteretic Behavior in the Vibration-Based Energy Harvesting”**, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013, 24:1278-1285.

SILVA, Patrick Kazmierczac da. **Geração de energia através do efeito piezoelétrico inserido no concreto translúcido aplicado em faixas de segurança.** 2017. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2017. Cap. 2.

SING, Timon. **New Piezoelectric Railways Harvest Energy From Passing Trains.** 2010. Disponível em: <<https://inhabitat.com/new-piezoelectric-railways-harvest-energy-from-passing-trains/>>. Acesso em: 7 abr. 2018.
SMOLEMKII, G. A, **Soviet Physics**, Solid State **1**, 150, 1950.

SODANO, H. A. et al. **Electric Power Generation from Piezoelectric Materials.** 13th International Conference on Adaptive Structures and Technologies. Berlin: Proceedings of the IEEE. 2002.

SOUZA, Felipe Nobre de. **Correlação entre processamento térmico, microestrutura e propriedades de microfibras cerâmicas de PZT.** 2006. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Cap. 4.

SOUZA, Flavilene da Silva. **Sistema de extração de potência (*power harvesting*) usando transdutores piezoelétricos.** 2011. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011. Cap. 2.

TERRA, Site. **Pista de dança cinética energiza boate holandesa.** 2008. Disponível em: <<http://tecnologia.terra.com.br/noticias/0,,OI3314969-EI12882,00-Pista+de+danca+cinetica+energiza+boate+holandesa.html>>. Acesso em: 7 abr. 2018.

TRAINER, M. **Kelvin and piezoelectricity.** European Journal of Physics, v.24, 2003, p.535-542.

URSAIA, Guilherme Crippa. **As energias renováveis no Brasil.** Palhoça: Unisul, 2011. Disponível em: <<https://www.austerenergy.com.br/energias-renovaveis-utilizadas-brasil/>>. Acesso em: 05 Abr. 2018.

VILLAR, Diego Branches. **Gerenciamento de energia residencial com geração fotovoltaica utilizando recozimento simulado.** 2016. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016. Cap. 2.

WANG, Z.L. Smart Perovskites. In: Schartz, M. **Encyclopedia of Smart Materials**, John Wiley & Sons, New York, E.U.A. 2002.

WARNER, A. W.; ONOE, M.; COQUIN, G. A., **The Journal of the Acoustical Society of America** **42**, 1223, 1967.

WILLIAMS, C.B. AND YATES, R.B. **Analysis of a Micro-Electric Generator for Microsystems**. *Sensors and Actuators A: Physical*, 52, 8-11, 1996.

VIGINOSKI, Cibele Lemos Freire. **Sistema utilizando vibração de um transdutor piezoelétrico para medir densidade de um líquido**. 2013. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. 24-25.

VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 1ª ed. Editora Érica, São Paulo, 2012.