



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Tecnologia – FT



THAIS SCALET

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO DISPOSITIVOS PIEZELÉTRICOS

Limeira
2017

Thais Scalet

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO DISPOSITIVOS
PIEZELÉTRICOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Tecnologia, na área de Sistemas de Informação e Comunicação.

ORIENTADOR: PROF. DR. FRANCISCO JOSÉ ARNOLD
COORIENTADOR: PROF. DR. RANGEL ARTHUR

Este exemplar corresponde à versão final da
Dissertação defendida por Thais Scalet e
orientada pelo Prof. Dr. Francisco José Arnold.

Limeira
2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): Não se aplica.

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

Sca44 Scalet, Thais, 1992-
Geração de energia elétrica usando dispositivos piezelétricos / Thais Scalet. – Limeira, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Francisco José Arnold.
Coorientador: Rangel Arthur.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Energia limpa. 2. Transdutores piezoelétricos. 3. Colheita de energia. 4. Energia - Armazenamento. I. Arnold, Francisco José, 1965-. II. Arthur, Rangel, 1977-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Generation of electrical energy using piezoelectric devices

Palavras-chave em inglês:

Clean energy

Piezoelectric transducers

Energy harvesting

Energy storage

Área de concentração: Sistemas de Informação e Comunicação

Titulação: Mestra em Tecnologia

Banca examinadora:

Francisco José Arnold [Orientador]

Leonardo Lorenzo Bravo Roger

Alexandre Camilo Junior

Data de defesa: 22-09-2017

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

FOLHA DE APROVAÇÃO

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa de dissertação para o Título de Mestra em Tecnologia na área de concentração de sistema de informação e comunicação, a que submeteu a aluna Thais Scalet, em 22 de Setembro de 2017 na Faculdade de Tecnologia- FT/ UNICAMP, em Limeira/SP.

Prof. Dr.

Francisco Jose Arnold

Prof. Dr.

Leonardo Lorenzo Bravo Roger

Faculdade de Tecnologia - Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr.

Alexandre Camilo Junior

Universidade Estadual de Ponta Grossa

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica da aluna na Universidade.

“Se tens de servir a Deus com a tua inteligência, para ti estudar é uma obrigação grave.”

(São Josemaria Escrivá)

Agradecimentos

Agradeço a meus pais Arnaldo Scalet e Rosa Scalet, irmãos e sobrinhos pelo apoio psicológico e financeiro em todo este período. E também pela carinhosa aceitação de minhas ausências.

Ao Prof. Dr. Francisco Arnold por toda orientação prestada.

Ao meu grande amigo Paulo Kretikouski por sempre, com muita boa vontade, se dispor a me ajudar.

Ao Sr. João Viana pelo tempo e empenho dedicado na minha instrução e montagem da máquina de teste. Bem como aos bolsistas do laboratório de Telecomunicações, amigos da faculdade e ao mesmo Sr. João por todos os serviços, amizade e fraterna convivência que tornaram este momento de pesquisa mais leve e divertido.

Sobretudo agradeço ao Bom Deus e a Maria Santíssima por generosamente me proporcionarem esta oportunidade de aprendizado e crescimento.

RESUMO

Nas últimas décadas, graças às inovações de tecnologia em dispositivos eletrônicos de baixo consumo, surgiram possibilidades nas utilizações de novas fontes de geração de energia para alimentação destes dispositivos. Uma das alternativas de geração e reaproveitamento de energia limpa é a partir do uso de transdutores piezelétricos empregados na colheita de energia (*power harvesting*) que podem realizar o aproveitamento de energia por meio de atividades quotidianas, proporcionando à energia, normalmente desperdiçada, uma nova aplicabilidade na alimentação de equipamentos de baixo consumo. A finalidade do presente estudo é a realização de arranjos com materiais piezelétricos para colheita de energia focando no aproveitamento da energia dissipada. Através da alocação da cerâmica piezelétrica em uma máquina de ensaio eletroeletrônica mecânica composta por pistão a ar pneumático são realizados ensaios com frequências de 1 e 2 Hz. Os ensaios realizados variaram a pressão e frequência nos mesmos arranjos piezelétricos, a fim de investigar a viabilidade da geração de energia. O tipo da cerâmica piezelétrica utilizada no estudo é do tipo *buzzer*. Por fim, objetiva-se a conclusão sobre se a pressão mecânica efetuada nos arranjos e sua geração de energia com a cerâmica piezelétrica estudada é eficaz na geração de energia elétrica e se a utilização deste modelo possibilita a alimentação de dispositivos eletrônicos de baixo consumo e o carregamento de uma bateria de NiMH.

Palavras-chaves: *power harvesting*, transdutores piezelétricos, *buzzer*, colheita de energia.

ABSTRACT

In the last decades, thanks to the innovations of technology in electronic devices of low power consumption, possibilities started to appear in the uses of new sources of power generation to power these devices. One of the alternatives for the generation and reuse of clean energy is through the use of piezoelectric transducers used in energy harvesting (power harvesting). It can utilize the energy through daily activities, giving to the normally wasted energy a new applicability in the feeding of low consumption equipment. The purpose of the present study is to make arrangements with piezoelectric materials to harvest energy focusing on the use of dissipated energy. The tests were performed using a mechanical electronic test machine composed of pneumatic air piston that enable teste for determined frequencies of 1 and 2 Hz and this emulation occur through the allocation of the piezoelectric ceramic on this mechanical electronic test machine. The tests were executed varying the frequency and the pressure too in the same piezoelectric arrangements order to analyze the viability of the power generation. The type of piezoelectric ceramic used in the study is the buzzer type. The final goal is to conclude on whether the mechanical pressure performed in the in the arrangements and its energy generation with the piezoelectric ceramic studied is effective on the generation of electric energy and if the use of this model allows the powering of low power consumption electronic devices and the charging a NiMH battery.

Key-words: Power Harvesting, piezoelectric transducer, buzzer, energy harvesting.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 1 - Cerâmica piezelétrica do tipo <i>buzzer</i> | 20 |
| Fig. 2 - Formato dos componentes utilizados por KYMISSIS et al..... | 24 |
| Fig. 3 – Esquemático da montagem realizada por ROCHA et al..... | 26 |
| Fig. 4 – Esquemático da estrutura utilizada por OGAWA et al..... | 27 |
| Fig. 5 – Sistema utilizado por KUANG et al..... | 29 |
| Fig. 6 - Diagrama de blocos de um circuito colhedor de energia..... | 31 |
| Fig. 7 - Forças de compressão em um material de comprimento dx | 34 |
| Fig. 8 - Deformação mecânica causada por uma força longitudinal..... | 34 |
| Fig. 9 - (a) Aplicação de campo elétrico em uma molécula dielétrica neutra (b) Polarização da molécula dielétrica..... | 36 |
| Fig. 10 - Modelo explicativo de uma molécula piezelétrica. (a) Estrutura piezelétrica sem deformação. (b) Estrutura piezelétrica submetida a uma força. c) Material com polarização em sua superfície..... | 37 |
| Fig. 11 - Conversão de energia no efeito piezelétrico direto..... | 38 |
| Fig. 12 - Conversão de energia no efeito piezelétrico indireto..... | 38 |
| Fig. 13 - Direção dos eixos de materiais piezelétricos..... | 43 |
| Fig. 14 – Resposta em frequência de um material piezelétrico PZT..... | 47 |
| Fig. 15 - Arranjo experimental para medição de d_{33} circuito armazenador de cargas e conversor Coulomb-Volt..... | 49 |
| Fig. 16 – Sistema mecânico de ensaio composto por pistão pneumático..... | 51 |
| Fig. 17 – Diagrama de sistema eletroeletrônico mecânico..... | 52 |
| Fig. 18 – Ligação mecanicamente em série e eletricamente em paralelo dos <i>buzzers</i> piezelétricos a) esquemático b) real..... | 54 |
| Fig. 19 - Circuito retificador para carregar bateria..... | 56 |
| Fig. 20- Circuito sugerido por Kymissis et al como circuito condicionador de energia..... | 56 |
| Fig. 21 – Tempo necessário para a saída ser 5 V em função da quantidade de piezos, pressão e 1 Hz..... | 64 |
| Fig. 22 – Tempo necessário para a saída ser 5 V em função da quantidade de piezos, pressão e 2Hz..... | 64 |
| Fig. 23 – Tempo para geração de 5 V, 3 bar e 1 Hz e desvio padrão..... | 65 |
| Fig. 24 - Tempo para geração de 5 V, 4 bar e 1 Hz e desvio padrão..... | 66 |
| Fig. 25 - Tempo para geração de 5 V, 5 bar e 1 Hz e desvio padrão..... | 66 |
| Fig. 26 - Tempo para geração de 5 V, 3 bar e 2 Hz e desvio padrão..... | 67 |

| | |
|--|----|
| Fig. 27 - Tempo para geração de 5 V, 4 bar e 2 Hz e desvio padrão..... | 67 |
| Fig. 28 - Tempo para geração de 5 V, 5 bar e 2 Hz e desvio padrão..... | 68 |
| Fig. 29 – Curva de potências geradas nas condições de 14 cerâmicas piezelétricas, 3 bar e 2Hz..... | 69 |
| Fig. 30 - Curva de potências geradas nas condições de 14 cerâmicas piezelétricas, 4 bar e 2Hz..... | 69 |
| Fig. 31 - Curva de potências geradas nas condições de 14 cerâmicas piezelétricas, 5 bar e 2 Hz..... | 70 |
| Fig. 32 – Comparativo das potências geradas com cargas na saída variando de 5,1 k Ω a 100 k Ω | 70 |
| Fig. 33 – Carregamento da bateria de NiMH..... | 71 |
| Fig. 34 – Código do programa em linguagem Ladder e sua explicação..... | 80 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Cerâmicas piezelétricas e constantes de caracterização..... | 47 |
| Tabela 2 – Valores das frequências de ressonância e antirressonância, impedância de ressonância e antirressonância, k , média e desvio padrão..... | 60 |
| Tabela 3 – Média do tempo necessário para geração de 5 V na saída para cada arranjo piezelétrico e desvio padrão..... | 63 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------------------|--|
| BaTiO ₃ | Titanato de Bário |
| LED | Diodo emissor de luz (Light Emitting Diode) |
| MFC | Macro Fiber Composite |
| NiMH | Níquel-Hidreto Metálico |
| PVDF | Polímero de fluoreto de polivinilideno (Poly-Vinilidene Fluoride) |
| PZT | Titanato-zirconato de chumbo (Lead Titanate Zirconate) |
| RFID | Identificação por radiofrequência (Radio-Frequency Identification) |
| TH | Thunder Unimorfo |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|---|
| Ah | Unidade de carga elétrica transferida durante uma hora |
| d | Coefficiente de deformação piezoelectrico (m/V) |
| D | Deslocamento elétrico (C/m^2) |
| E | Campo elétrico (V/m) |
| F | Unidade de capacitância |
| Hz | Frequência expressa em termos de ciclos por segundo |
| k | Coefficiente de acoplamento eletromecânico |
| L | Indutância do indutor |
| Q | Fator de qualidade mecânico |
| s | Complância mecânica do material (m^2/N) |
| S | Deformação mecânica (m/m) |
| Vo | Tensão de saída |
| Y | Módulo de Young (ou módulo de elasticidade do material) (N/m^2) |
| ϵ | Permissividade dielétrica (F/m) |

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.....16

Revisão bibliográfica

- 1.1 Aplicações de dispositivos piezelétricos.....16
- 1.2 Utilização de materiais piezelétricos para a colheita de energia.....21
- 1.3 Diagrama do circuito colhedor de energia.....30
- 1.4 Objetivos.....31

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....33

- 2.1 Conceitos introdutórios.....33
 - 2.1.1 Deformação (S) e tensão mecânica (T).....33
 - 2.1.2 Campo elétrico (E) e deslocamento elétrico (D).....35
- 2.2 Piezeletricidade.....36
- 2.3 Equações piezelétricas.....38

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA.....44

- 3.1 Caracterização das cerâmicas piezelétricas.....45
 - 3.1.1 Frequências de ressonância e antirressonância e coeficiente de acoplamento eletromecânico.....46
 - 3.1.2 Coeficiente piezelétrico.....48
- 3.2 Sistema mecânico de ensaio.....49
 - 3.2.1 Descrição mecânica.....49
- 3.3 Arranjos piezelétricos.....53
 - 3.3.1 Medição do tempo de carregamento.....55
- 3.4 Circuito eletrônico.....55
 - 3.4.1 Circuito regulador de tensão.....55
- 3.5 Medição de potência elétrica.....57
- 3.6 Carregamento de bateria.....58

CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....59

- 4.1 Resultados (discussão geral).....59
- 4.2 Caracterização das cerâmicas piezelétricas.....59
 - 4.2.1 Frequência de ressonância e antirressonância e coeficiente de

| | |
|--|-----------|
| acoplamento eletromecânico..... | 59 |
| 4.2.2 Coeficiente piezelétrico..... | 61 |
| 4.3 Tempo de carregamento..... | 62 |
| 4.4 Potência fornecida na carga..... | 68 |
| 4.5 Carregamento da bateria..... | 71 |
| CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES..... | 73 |
| 5.1 Conclusões e discussões finais..... | 73 |
| 5.2 Perspectivas para trabalhos futuros..... | 75 |
| Referências bibliográficas..... | 76 |
| Apêndice A - Programação Ladder..... | 80 |

CAPÍTULO 1

Introdução

Piezeletricidade é o termo utilizado para designar materiais capazes de gerarem diferença de potencial quando pressionados ou ao serem excitados com uma diferença de potencial produzir um deslocamento mecânico. Sua origem etimológica provem no termo grego “*piezein*”, que significa eletricidade por pressão. A descoberta do efeito piezelétrico em cristais ocorreu em 1880 pelos irmãos Jaques e Pierre Curie, quando constataram que certos cristais, incluindo turmalina, quartzo, topázio e sal de Rochelle (SAFARI; AKDOGAN, 2008), quando submetidos à pressão geravam uma diferença de potencial. Este acontecimento foi denominado posteriormente de efeito piezelétrico direto. A ação oposta, que é a ocorrência de vibração nos cristais quando expostos a uma diferença de potencial, o efeito piezelétrico inverso, foi previsto matematicamente em 1881 por Lippmann, sendo confirmada experimentalmente pelos irmãos Curie no mesmo ano.

O desenvolvimento da ciência de materiais permitiu que ao longo do século XX novos cristais com capacidade de conversão piezelétrica maior fossem desenvolvidos. Entre eles surgiram cerâmicas e polímeros piezelétricos, que atualmente participam em grande parte do desenvolvimento da tecnologia de dispositivos piezelétricos (KATZIR, 2003). As aplicações com transdutores piezelétricos são muito diversificadas. Transdutores piezelétricos são usados em sistemas de ultrassom, em microfones, em sistemas que geram micro deslocamentos, circuitos eletrônicos, na produção de energia elétrica atuando como componentes de colheita de energia, captando a energia mecânica causada por deformações, deslocamentos, movimentos, vibrações e transformando-a em energia elétrica. Neste trabalho, o uso de transdutores piezelétricos será abordado para o fim de conversão de energia mecânica em energia elétrica, portanto será focado o efeito piezelétrico direto. O segmento de pesquisa na área da conversão direta de energia do efeito piezelétrico vem ganhando especial destaque nos últimos anos, devido à busca por fontes alternativas e sustentáveis de geração de energia elétrica. Por esse motivo o estudo da aplicabilidade desses cristais e a obtenção de energia a

partir dos mesmos têm sido profundamente pesquisados e são vistos como soluções para crises energéticas e para a conservação e produção de energia sustentável, pois os meios de geração e armazenamento não são poluentes e não utilizam combustíveis.

Similarmente a empregabilidade dos cristais é vista como vantajosa, principalmente pela possibilidade de aumentar a vida útil de fontes de energia ou pela sua utilização como fonte de auto alimentação (SODANO et al. 2004) ou ainda no desenvolvimento de equipamentos portáteis e de alimentação para dispositivos de baixo consumo de energia, como por exemplo, sensores sem fio, implantes médicos, controles remotos, sensores de temperatura, dispositivos de monitoramento, relógios, instrumentação eletrônica embutida, dispositivos de monitoração para fins militares e acessórios de pequeno porte para uso pessoal e como fonte de auto alimentação (SODANO et al. 2004). Em razão desta crescente demanda por fontes de energia portáteis, recentemente a integração de dispositivos de conversão piezelétrica no vestuário humano estão sendo difundidos (ROCHA et al. 2010). Os conversores são distribuídos por diferentes partes do corpo e com a energia mecânica decorrente da movimentação do usuário é estabelecida a geração de eletricidade que pode, entre outras utilizações, ser armazenada em baterias.

Sabido que os materiais piezelétricos no efeito direto realizam conversões a partir de pressões mecânicas, seu melhor posicionamento é em ambientes onde ocorra vibração: estações de trem, construção civil, fábricas, ruas, vestimentas, e também em calçados onde os níveis de pressão causados pelo peso são máximo.

A conversão piezelétrica direta e a eficiência do aproveitamento da energia convertida dependem: (a) das dimensões e dos parâmetros físicos do material que compõe o transdutor; (b) da disposição física dos transdutores em relação à recepção da pressão mecânica e; (c) dos circuitos eletrônicos que promoverão a regulação e o armazenamento da energia.

Em relação ao item (a) há uma dependência dos elementos piezelétricos encontrados no mercado, os quais são produzidos fora do Brasil com formas e composições que atendam demandas específicas do mercado.

A disposição dos transdutores citada em (b) é um assunto complexo quando se trata de utilizar sensores acoplados às formas do corpo humano. Uma vez que cada indivíduo possui uma movimentação própria a eficiência da pressão

decorrente da atividade física sobre os transdutores pode ser diferenciada. De fato, a condição ideal seria a de que a pressão fosse realizada sobre toda a superfície dos elementos piezelétricos para que houvesse maior acúmulo de cargas elétricas e, conseqüentemente, maior geração de tensão elétrica. O foco do estudo é na emulação de testes através de máquina de ensaio eletroeletrônica mecânica. A montagem da disposição dos materiais piezelétricos foi sempre visando à aproximação de uma situação real, realizando a pressão sobre todo o componente e focando na otimização do espaço para alocação dos arranjos.

A partir da emulação com a ação de uma máquina de ensaio sobre os transdutores piezelétricos foi possível estabelecer indícios sobre um melhor posicionamento e disposição de transdutores piezelétricos no interior de um calçado, por exemplo, e a melhor frequência de excitação para obtenção da melhor resposta para os componentes utilizados no presente estudo.

Finalmente, no item (c) pode-se dizer que a avaliação de um sistema de coleta de energia (*energy harvesting*) é feita pela análise da potência que o circuito eletrônico de regulação consegue fornecer a partir da pressão nos transdutores piezelétricos.

Há, portanto, um problema a ser confrontado que é a escolha dos tipos de transdutores e seus posicionamentos para que se atinjam melhores níveis de eficiência no processo de conversão e de aproveitamento de energia. Neste trabalho, foi feita uma investigação sobre as configurações a serem utilizadas na instalação de transdutores que poderiam ser inseridos em ambientes e as possibilidades de geração de energia a partir desta inserção.

A partir da emulação com a ação de uma máquina de ensaio sobre os transdutores piezelétricos foi possível estabelecer indícios sobre um melhor posicionamento e disposição de transdutores piezelétricos no interior de um calçado, por exemplo, e a melhor frequência de excitação para obtenção da melhor resposta para os componentes utilizados no presente estudo.

Revisão bibliográfica

1.1 Aplicações de dispositivos piezelétricos

Nesta seção é realizada uma revisão bibliográfica tratando de conceitos do transdutor piezelétrico, aplicações práticas desses materiais, uma introdução a *power harvesting* e a crescente investigação sobre a utilização de materiais piezelétricos para o fim de colheita de energia bem como uma sugestão de emprego em calçados (*footwear*).

A primeira aplicação de materiais piezelétricos, considerando o efeito piezelétrico inverso (energia elétrica convertida em energia mecânica), foi idealizada por Langevin, um físico francês, em 1917. Sua criação utilizava cristais de quartzo acoplados a estruturas metálicas, com a finalidade de gerar frequências ultrassônicas na faixa de algumas dezenas de kHz em sonares para atividades militares. Com a evolução da ciência dos materiais, na década de 1940, Roberts descobriu que cerâmicas ferroelétricas de titanato de bário polarizadas apresentavam o efeito piezelétrico. O advento das cerâmicas piezelétricas permitiu grande avanço em suas utilizações, principalmente pela diversificada possibilidade de confeccionar a geometria do componente.

Embora o quartzo seja menos utilizado que a cerâmica, especialmente por possuir um efeito piezelétrico muito menor, existem aplicações na eletrônica onde seu uso é preferível graças a sua baixa perda acústica (energia perdida na propagação de ondas sonoras), essa característica o torna um ótimo ressoador mecânico voltado para aplicações em relógios e rádios.

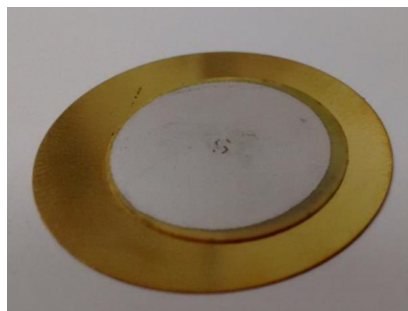
Outro elemento piezelétrico utilizado são os polímeros piezelétricos, a palavra polímero é proveniente do termo grego “poli” = muitas e “meros” = partes, ou seja, a junção de pequenas partes formam macromoléculas polímeras. Este termo passou a ser utilizado em 1832 pelo químico alemão J. Berzelius, mas só se tornou conhecido como o conhecemos hoje em dia após 1922 (MORAWETZ, 1995), mesma década quando o primeiro polímero piezelétrico (eletreto) foi descoberto, sendo constituído por cera de carnaúba, cera de abelha e colofônia (SAAD, 2012). Este tipo de polímero, que por meio de processos simples e de baixo custo, podem ser utilizados para fabricação de polímeros piezelétricos (RAMADAN et al. 2014) são

conhecidos como polímeros eletroativos (polímeros que manifestam alteração em seu tamanho quando excitado por um campo elétrico), podem ser naturais ou artificiais/sintéticos. Neste trabalho será citado nas revisões bibliográficas o PVDF (polímero de fluoreto de polivinilideno), que é um tipo de componente muito estudado na atualidade por ser mecanicamente flexível, de baixo custo de fabricação e possuir um alto índice de coeficiente piezelétrico (RAMADAN et al. 2014).

Similarmente, a cerâmica piezelétrica PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) é muito utilizada em *power harvesting*, porém a mesma é naturalmente muito quebradiça limitando as deformações que podem ser realizadas no material (SODANO et al, 2005). Por este motivo e visando melhorar a eficiência do sistema, pesquisadores têm testado e estudado outros materiais piezelétricos que podem ser utilizados em sistemas de colheita de energia.

Neste trabalho foi dado enfoque às cerâmicas piezelétricas do tipo PZT. Na Figura 1 é mostrada uma cerâmica PZT do tipo *buzzer*, largamente utilizada comercialmente como dispositivo de alerta sonoro. A maioria das cerâmicas piezelétricas comerciais possui forma de disco e em suas partes planas são depositados eletrodos compostos por películas metálicas nas quais são conectadas ligações elétricas para excitação elétrica e geração de deformações mecânicas (efeito piezelétrico inverso) ou colheita de energia elétrica decorrente da aplicação de alguma força externa (efeito piezelétrico direto).

Figura 1 - Cerâmica piezelétrica do tipo *buzzer*.



Fonte: O autor (2016)

1.2 Utilização de materiais piezelétricos para a colheita de energia

No século XX, estudos foram publicados sobre a utilização de materiais piezelétricos como meios de colheita de energia; termo utilizado para denominar o ato do reaproveitamento da energia perdida de variadas formas e meios para alimentar dispositivos eletrônicos.

ANTON et al (2007) apresenta uma ampla sucessão de estudos sobre *power harvesting* e principalmente sobre melhoramento da eficiência dos componentes utilizados para este fim, ou seja, materiais piezelétricos, bem como de dispositivos que acoplados ou não ao próprio componente são capazes de vibrar o transdutor em sua frequência de ressonância assim tornando-o mais eficiente na geração de energia.

Entre os vários tipos de piezelétricos existentes, o PZT PSI – 5H4E foi estudado por SODANO E INMAN (2005), bem como outros dois tipos de materiais piezelétricos. Nesse estudo realizado por SODANO E INMAN foi realizada uma apuração dos materiais mais adequados para o carregamento de baterias e isso se sucedeu por meio do estudo de três tipos de materiais piezelétricos: Quick Pack Actuator, PZT PSI – 5H4E (6.35 x 6.032cm) e MFC (*Macro Fiber Composite*) (8.255 x 5.715 cm). A eficiência dos três componentes foi testada por meio de condições de excitação variadas nos materiais e, embora o material PZT seja mais quebradiço, susceptível a quebras acidentais, mais rígido e ser o menos robusto dos três tipos, foi o material que se mostrou mais eficiente no propósito do carregamento de capacitores e baterias, principalmente pela eficiência no carregamento do dispositivo mais utilizado no estudo, uma bateria NiMH (Níquel-Hidreto Metálico). Por conseguinte foi concluído, pelos autores, que o PZT é o material mais adequado para o propósito de carregar capacitores e baterias por meio da aplicação de compressões externas, pois por meio da realização dos testes é analisada a eficiência do PZT em relação aos outros componentes. O tempo necessário para o carregamento das baterias estudadas é menor analisando a frequência de ressonância e antirressonância do PZT, o qual se mostrou mais estável e eficaz para este fim.

O conceito de utilizar materiais piezelétricos combinados com capacitores como armazenadores da energia foi estudado por UMEDA et al. (1997). Estudos teóricos e testes práticos com várias configurações foram realizadas a fim de serem

determinadas as melhores combinações. Em 1998, uma patente de armazenamento em capacitor da energia retificada gerada pelo material piezelétrico foi emitida para KIMURA (1998). Esta patente trata da utilização de, pelo menos, um disco piezelétrico sendo contraído e expandido gerando assim uma tensão alternada em seus eletrodos de forma a ser retificada e armazenada em um capacitor, este trabalho de geração e armazenamento da energia gerada pelo dispositivo piezelétrico ocorre sem a utilização de fontes externas de geração de energia, como uma bateria, por exemplo, de forma que a energia pode ser gerada a qualquer momento quando houver necessidade.

SODANO et al. (2005) analisaram a eficácia do armazenamento da energia gerada pelo piezelétrico em um capacitor e uma bateria. Porém como capacitores têm seu tempo de descarregamento muito menor que o de baterias, sua utilização se torna inadequada para aplicações que necessitem fornecimento de energia constante, como é o caso de dispositivos computacionais. Também, segundo este estudo, a utilização de apenas um capacitor não é capaz de fornecer energia para um dispositivo eletrônico, sendo necessária a utilização de circuitos adicionais, que se tornam inviáveis pela dissipação de energia adicional. A energia do circuito gerada com o capacitor pode ser utilizada quase instantaneamente, com a ressalva de a energia de saída ser pulsante. O uso da bateria NiMH se fez mais adequada para armazenamento da energia gerada pelo circuito estudado, pois a mesma possui uma alta capacidade de carregamento e alta densidade de energia (que se dá pela relação da quantidade de energia contida e o espaço do sistema). Diferentemente das baterias de Lithium, elas não requerem reguladores de voltagem incorporados ao circuito (SODANO et al. 2005). No estudo realizado foi demonstrado que uma bateria de 40 mAh foi carregada em aproximadamente meia hora com a frequência em ressonância e em poucas horas com um sinal randômico.

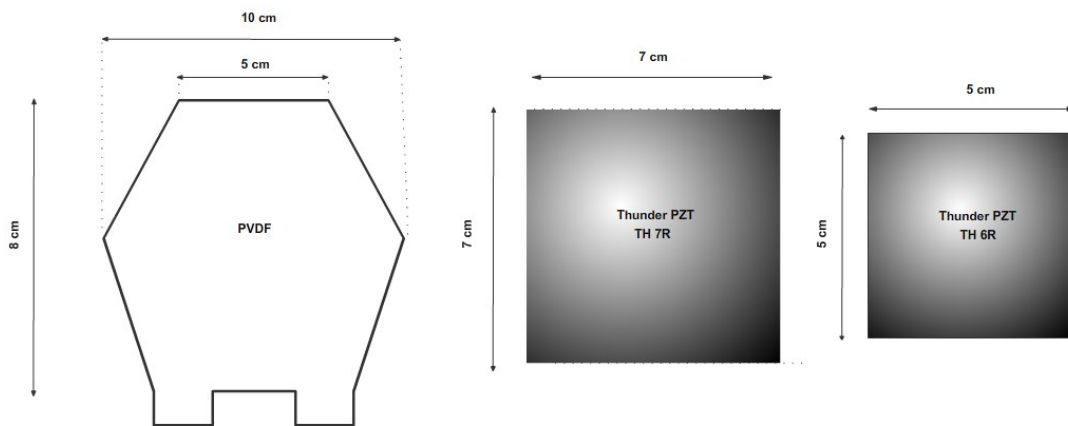
Com a ideia de reaproveitamento de energia despendida em atividades cotidianas, pesquisadores sugerem o uso da energia gerada pelo corpo humano, seja a partir da respiração, da movimentação dos órgãos ou do caminhar para alimentar componentes eletrônicos. Seguindo esse conceito KYMISSIS et al (1998) estudaram três meios de aproveitamento da energia gerada pelo caminhar: dois pela utilização de materiais piezelétricos e um último por um gerador magnético rotacional. O primeiro material experimentado se faz a partir da utilização do material

piezelétrico PVDF (fluoreto de polivinilideno), que é um material descoberto por Kawai em 1969. Uma das maiores vantagens dos piezos polímeros (PVDF) em relação às cerâmicas é sua baixa impedância acústica, que é muito mais próxima da impedância acústica da água, de tecidos humanos e materiais orgânicos. Impedância acústica das cerâmicas piezelétricas é a resistência que o material opõe à passagem da onda acústica. Possuir uma impedância próxima à desses elementos piezelétricos permite uma transferência de sinais acústicos na água e nesses tecidos de maneira muito mais eficiente, de forma que quanto maior for a diferença acústica entre os componentes em questão maior será a reflexão do sinal sonoro enviado. A impedância acústica das cerâmicas piezelétricas é aproximadamente 11 vezes maior que a dos polímeros piezelétricos, enquanto que polímeros tem a impedância acústica 2,6 vezes maior que a da água. Para o experimento realizado por KYMISSIS et al uma ripa de material foi implementada, a ripa é composta por multicamadas de material laminado e por oito camadas do material piezelétrico PVDF com formato hexagonal. As dimensões das ripas são de 8 cm de comprimento por 10 cm de largura, como pode ser visualizado na Figura 2. A fim de diminuir a impedância no piezelétrico PVDF, que é composto pelas camadas laminadas formando eletrodos, todos esses componentes foram conectados em paralelo resultando em uma capacitância de 330 nF.

No segundo teste foram utilizados dois materiais unimorfos *Thunder* de PZT. *Thunder* PZT são dispositivos ferroelétricos que têm sua fabricação baseada em tecnologia fornecida pela NASA e comercializada pela *Face® International Corporation* (Face ® internacional Corporation, 2015). Fazem parte da família de produtos que contém *smart materials*, pois são compostos por camadas de aço inoxidável, alumínio e cerâmicas piezelétricas PZT. Essas múltiplas camadas coladas por um adesivo de poliamida também patenteado pela NASA (LaRC™ - SI), permitem uma alta robustez ao material piezelétrico e grande capacidade de performance. A colagem das múltiplas camadas é primordial para manter a cerâmica em compressão, que é importante para torná-la menos quebradiça, robusta e confiável (Face ® internacional Corporation, 2015). Os materiais utilizados para os testes foram um TH 7R (7 cm de altura x 7 cm de largura, 180 nF de Capacitância) e TH 6R (5 cm de altura x 5 cm de largura, 70 nF de Capacitância). O

terceiro experimento, porém, por se tratar de um gerador magnético não será tratado neste estudo.

Figura 2 – Formato dos componentes utilizados por KYMISSIS et al.



Fonte: O autor (2017)

As pressões nos materiais piezelétricos são realizados por meio de uma caminhada de dois passos por segundo por uma pessoa de 68 kg.

A eficiência da conversão de energia mecânica para energia elétrica dos componentes piezelétricos foi estimada em 0.5% para o material PVDF, 1,5 % para TH 6R e de 5 % para TH 7R. A tensão produzida pelo piezelétrico PVDF apresentam picos de aproximadamente 60 V e 20 mW, enquanto que para o *Thunder* Unimorfo foram picos de aproximadamente 150 V e 80 mW. Devido a área dos componentes PZT TH 6R e TH 7R verifica-se que o PZT TH 7R tem capacidade de gerar 30 % a mais de energia que o PZT TH 6R.

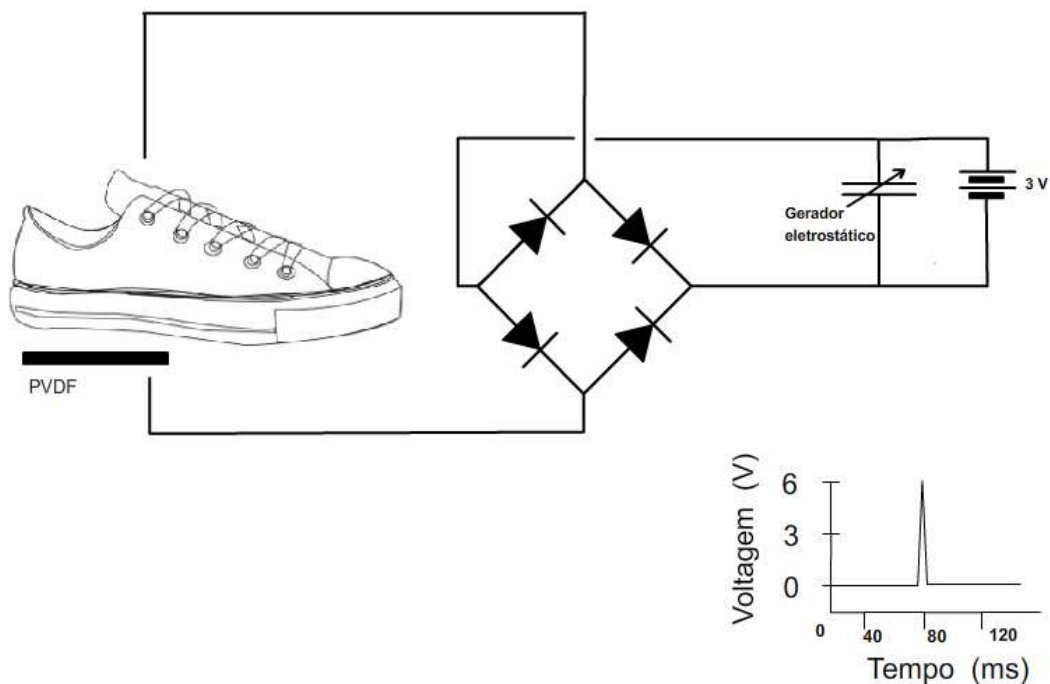
Ambos PZT TH 6R e TH 7R foram acoplados em solas de tênis utilizados para a montagem do experimento. Concluiu-se que a cerâmica piezelétrica (*Thunder*) é mais eficiente para a conversão de energia gerada. Na utilização do material PVDF é observada uma pequena deficiência mecânica na conversão de energia causada pelo atrito entre a rigidez do substrato do material com a derrapagem na lâmina piezelétrica e o calçado, porém ainda assim sua utilização é eficaz em variadas aplicações de baixa potência (KYMISSIS et al 1998).

Segundo informações fornecidas neste estudo, a tensão medida no capacitor situado logo após a ponte retificadora, segundo um gráfico fornecido pelos autores, é verificada ultrapassando 12,6 V. Entretanto, para a alimentação das etiquetas de RFID, que é o componente qual eles desejam munir, são necessários 5 V na entrada do transmissor acoplado ao circuito, por esse motivo foi utilizado o regulador de tensão MAX 666, o mesmo regulador e o mesmo circuito utilizado posteriormente por SODANO 2005 e que será explanado na seção 3.4.

STARNER (1996) realizou um estudo onde angariou possibilidades de geração de energia a partir de movimentos do corpo humano, entre as alternativas estudadas estão o respirar, caminhar, calor do corpo, movimento dos dedos enquanto digitam etc. Foi constatado que o caminhar é a atividade que fornece energia mais eficazmente para a alimentação de outros dispositivos, a ponto de serem gerados de 5 a 8,3 W de potência por uma pessoa pesando 68 kg em um caminhar de dois passos por segundo em média, que mostrou-se ser uma energia suficiente para operar dispositivos ligados ao corpo humano. Enquanto que a utilização de uma faixa com material piezelétrico na circunferência dos pulmões, gerando energia por meio de 10 ciclos de respiração geraria no máximo 0,83 W, ROCHA et al., 2010 utilizaram materiais piezelétricos (PVDF) como meios de colheita de energia aproveitando a energia gerada pelo caminhar. O motivo da escolha pelos polímeros ao invés de cristais e cerâmicas piezelétricas é que películas de polímero são mais flexíveis e podem ser fabricados de acordo com a forma e tamanhos desejados por meio de processos simples, além da fabricação de polímeros ser mais barata que a de cristais e cerâmicas. No trabalho em questão, a fabricação do polímero piezelétrico é própria e patenteada pelos pesquisadores. Para o circuito eletrônico foi montada uma ponte retificadora com Diodos Schottky completa conectada ao dispositivo piezelétrico que foi acoplado na sola de um sapato. A utilização de diodos Schottky é justificada pela queda de tensão no sentido direto praticamente nula, muito abaixo dos diodos de silício comuns, para ativar a condução. Os impactos no material piezelétrico geram picos de aproximadamente 6 V após a retificação como ilustrado na parte inferior da Figura 3. Para otimizar o aproveitamento da energia, usou-se um gerador eletrostático. O gerador usado é constituído por placas metálicas separadas por um material dielétrico flexível e com capacitância em estado estacionário é de 20 pF. A capacitância pode ser modificada

de acordo com as pressões aplicadas na direção de sua espessura. Sua funcionalidade se dá à medida que o material é submetido à pressão, aumentando a capacitância aproximadamente duas vezes, diminuindo a tensão pela metade. Nesse momento a tensão no piezelétrico é maior que a dos terminais do gerador eletrostático, de forma que este será carregado. Quando a pressão é retirada do capacitor a capacitância do gerador eletrostático diminui e a tensão aumenta, de forma que quando a tensão do gerador excede a tensão da bateria (bateria de 3 V) o carregamento do gerador é transferido para a bateria. Na Figura 3 é demonstrado o esquemático do funcionamento deste estudo realizado por ROCHA et al.

Figura 3 – Esquemático da montagem realizada por ROCHA et al.

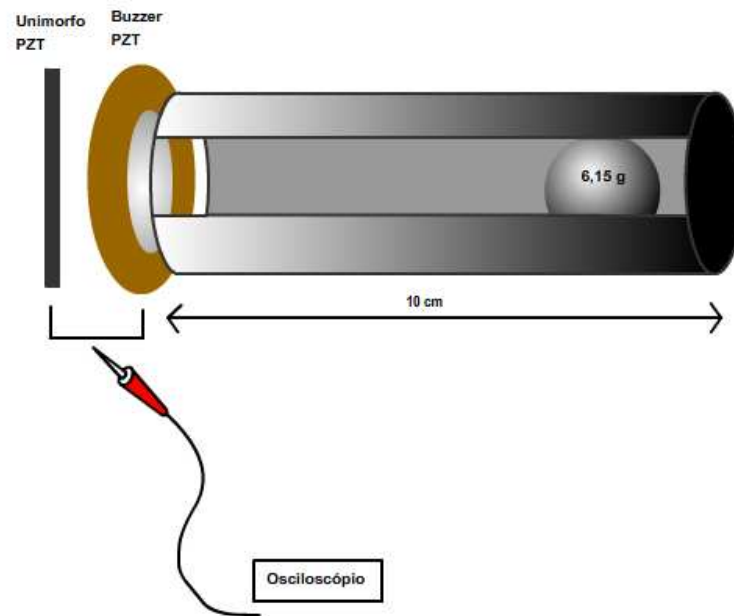


Fonte: O autor (2017)

Em 2013 OGAWA et al estudaram a utilização de uma estrutura composta por um *buzzer* piezelétrico possuindo 14 mm de diâmetro, 0,2 de espessura e capacitância de 10 nF e um unimorfo posicionados um sobre o outro em uma extremidade de um cilindro, a 10 cm de distância de uma extremidade a outra, como pode ser visualizada no esquemático mostrado na Figura 4, os materiais geradores de energia posicionados foram pressionados por uma esfera pesando 6,15 g assim que o movimento de caminhada era realizado. O funcionamento dessa

estrutura permitiu a geração de aproximadamente 30 V em frequência de ressonância possibilitando a utilização desta energia para acender LEDs em um calçado.

Figura 4 – Esquemático da estrutura utilizada por OGAWA et al.



Fonte: O autor (2017)

Também utilizando *buzzers*, SANCHES, 2015 estudou a utilização de combinações de 2, 4 e 8 *buzzers* ligados em série e paralelo, sendo acionados por um dispositivo eletropneumático configurado para exercer duas faixas de frequência; 0.5 e 1 Hz, e com intensidades de carga de 0,53 kg (5,22 N) para dois *buzzers*, 1,07 kg (10,45 N) para quatro *buzzers* e 2,13 kg (20,98 N) para 8 *buzzers* de forma a manter uma pressão constante de 3,33 N/cm². Foi concluído que com a utilização dos *buzzers* em paralelo, a geração de energia é superior à quando os *buzzers* estão estruturados em série e os resultados mais significativos para todas as estruturas ocorrem quando a frequência de excitação é de 1Hz. No caso de 8 *buzzers* foram medidos valores para tensão, corrente e potência no capacitor (100 µF/25 V) posicionado após um retificador (Db 101), posteriormente um carregamento de cinco minutos.

A fim de se aproximar mais de um circuito de *power harvesting*, foram

ainda realizados testes com um circuito retificador de onda completa e um conversor DC-DC. Conversor DC-DC é um modelo de circuito capaz de converter uma corrente contínua ou tensão, para uma determinada corrente contínua ou tensão. Para este teste foi utilizada somente a disposição de 8 *buzzers* em paralelo com cargas variáveis de 0,53 kg e 2,13 kg nas frequências de excitação de 0,5 Hz e 1Hz, realizando separadamente as medições. O rendimento dos circuitos envolvidos, retificador de onda completa e conversor DC-DC foi de 51 %.

Por fim, é inferido neste trabalho, que para o fim de utilização dos materiais piezelétricos na alimentação de circuitos autônomos deve-se usar a maior quantidade de PZTs possível.

Ainda com o intuito de acoplar materiais piezelétricos no corpo humano e aproveitar a geração de energia a partir desta prática KUANG et al 2016, baseando-se em estudos realizados a partir da excitação dos materiais piezelétricos com altas frequências, impraticáveis ao corpo humano, gerando assim altos níveis de energia, projetaram um sistema magnético capaz de excitar bímorfos mantendo-os vibrando na frequência de ressonância mesmo quando a frequência de entrada (originada pelo corpo humano) fosse baixa.

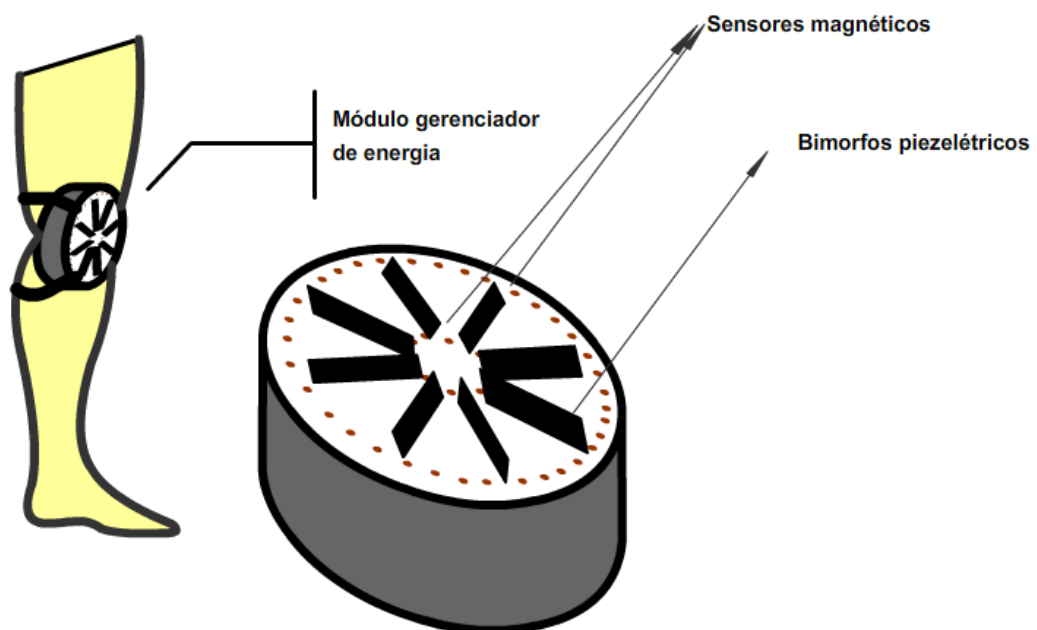
Para a montagem deste protótipo magnético são utilizados 64 sensores magnéticos na ordem de $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ posicionados em volta a um círculo de 88 mm de diâmetro localizados a 1,5 mm de distância cada sensor magnético do outro. Na parte de dentro do círculo são acoplados oito materiais piezelétricos bímorfos T215-H4-303X de $38,1 \times 12,7 \times 0,38 \text{ mm}^3$ em paralelo ao círculo, formando raios (solares) separados 26 mm de distância na maior extensão do círculo. Os bímorfos são colados aos sensores magnéticos do mesmo tamanho que os posicionados em volta ao círculo. Os sensores magnéticos foram arranjados de forma que a força magnética entre eles fosse sempre repulsiva, pois assim é gerada uma maior energia de saída do que quando a força entre esses *plugs* é atrativa. Os materiais piezelétricos bímorfos foram ligados cada um a um retificador individual de onda completa, e os terminais dos oito piezelétricos ligados em um ponto comum, de forma que ficassem ligados eletricamente em paralelo.

Todo o sistema magnético e de colheita de energia é então fixado por tiras elásticas na coxa do usuário deixando o sistema estrategicamente posicionado no joelho, pois quando o ato de caminhar é realizado, com o movimento do joelho são

acionados os sensores magnéticos e, desta forma, através da força magnética gerada é realizada a vibração dos materiais piezelétricos na frequência de ressonância (270 Hz), mesmo quando a frequência do caminhar é baixa.

Conjuntamente com este circuito é acoplado ao sistema um módulo de gerenciamento de energia que carrega um capacitor eletrolítico de 22 mF que alimenta a interface de gerenciamento do fluxo de energia com o intuito de alimentar um sensor sem fio, como pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5 – Sistema utilizado por KUANG et al.



Fonte: O autor (2017)

Os testes consistiram em caminhadas contínuas de 3 minutos a uma velocidade de 3 a 7 km/h. O primeiro teste realizado foi a uma velocidade de 4 km/h, com 180 segundos de caminhada a média de potência conseguida foi de 2,72 mW, demonstrando que cada bimorfo piezelétrico gerou em média 0,34 mW na velocidade de 4 km/h. Em maiores velocidades de caminhada é observado que ocorre um aumento na potência gerada e portanto o carregamento ocorre mais rapidamente. Conclusivamente, os autores afirmam que, conforme o aumento de velocidade de 3 a 7 km/h, a geração de energia aumenta de $(1,9 \pm 0,12)$ para $(4,5 \pm 0,35)$ mW, de forma que o circuito colhedor de energia foi usado para o fim de alimentar o sensor sem fio como sugerido a priori.

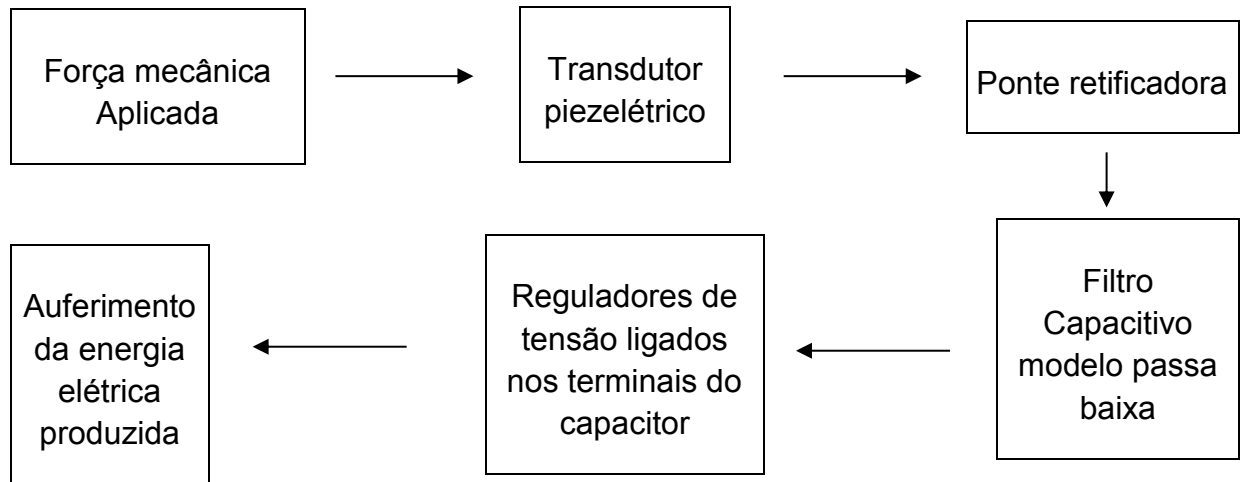
1.3 Diagrama do circuito colhedor de energia

Na Introdução deste estudo são mencionadas três variáveis a serem consideradas para que o sistema de colheita de energia proposto pelo trabalho seja efetivo:

- 1ª Transdutor piezelétrico;
- 2ª Pressão mecânica;
- 3ª Circuito eletrônico;

Na Figura 6 vemos um diagrama de blocos, onde é possível observar as três variáveis citadas anteriormente. A primeira delas está relacionada ao transdutor piezelétrico utilizado, que será caracterizado na seção 3.1, e é visualizada no segundo bloco do diagrama “Transdutor piezelétrico”, o componente que capta a força mecânica aplicada. A segunda variável é relacionada à disposição do transdutor piezelétrico em relação à recepção da pressão mecânica, que será abordada na seção 3. Ainda no segundo bloco ocorre a disposição deste componente para que a captação de energia seja satisfatória. A terceira variável é o meio pelo qual será tratada essa energia gerada, ou seja, a retificação (terceiro bloco) regulação (quarto bloco) e armazenamento da energia (quinto bloco). Este tratamento, referente à terceira variável, ocorre mediante a utilização de um circuito eletrônico que promove a retificação, regulação e o armazenamento da energia. O princípio de operação dos circuitos eletrônicos que regulam a energia convertida para carregar uma bateria é baseado em um circuito retificador e um filtro capacitivo do tipo passa baixa, similar ao de uma fonte de alimentação convencional. A tensão nos terminais do capacitor do filtro passa baixa, produzida a partir das cargas geradas no elemento piezelétrico, passa por reguladores eletrônicos de baixa potência. A Figura 6 mostra o diagrama de blocos desse circuito.

Figura 6 - Diagrama de blocos de um circuito colhedor de energia.



Fonte: O autor (2016)

1.4 Objetivos

A proposta deste trabalho é de realizar emulação com um esquemático físico e analisar as respostas fornecidas por este esquemático. Para tanto, os objetivos gerais são: (a) projetar um sistema de colheita de energia por conversão piezelétrica e avaliar sua capacidade de geração de potência elétrica; (b) comparar a capacidade de armazenar energia a partir da geração em uma condição ideal produzida por uma máquina de ensaio de modo a buscar por configurações mais adequadas, bem como as frequências de excitação que gerem maior quantidade de energia.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Caracterizar cerâmicas piezelétricas do tipo *buzzer* para realização da análise de capacidade de conversão de energia;
- Construir dispositivo para coletar energia convertida e avaliar a capacidade da conversão piezelétrica das cerâmicas caracterizadas em condições de pressão gerada por uma máquina de ensaio;

- Realizar estudos sobre variados arranjos piezelétricos, variando a quantidade de materiais piezelétricos utilizados em cada arranjo;
- Utilizar circuito eletrônico, citado frequentemente na literatura, para realizar coleta e armazenamento da energia convertida e desenvolver uma metodologia para determinação do tempo necessário para obtenção de tensão mínima de saída 5 V.
- Análise da viabilidade de alimentação cargas variáveis e de carregamento de uma bateria de 1,2 V.

CAPÍTULO 2

Fundamentação teórica

Neste capítulo será exposta uma introdução sobre os conceitos básicos da piezeletricidade, as equações piezelétricas e a descrição do modo de vibração espessura de placas piezelétricas.

2.1 Conceitos introdutórios

O entendimento da piezeletricidade passa pela definição preliminar de grandezas mecânicas e elétricas. Nesta seção vamos definir os conceitos de tensão mecânica (T), deformação (S), campo elétrico (E) e deslocamento elétrico (D).

2.1.1 Deformação (S) e Tensão Mecânica (T)

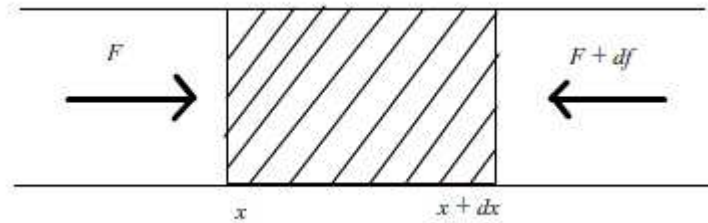
Para compreender a grandeza da deformação imaginemos um material de comprimento L , seção transversal s e sujeito a forças longitudinais F , como pode ser visto na Figura 7. Quando uma força longitudinal F é aplicada, é produzido um deslocamento longitudinal ξ de cada partícula desse material. O efeito deste deslocamento longitudinal é descrito na Equação 1 como sendo uma função da distância x ao longo do material e do tempo t .

$$\xi = \xi(x, t) \quad (1)$$

Se observarmos a Figura 8 vemos uma distância dada por $\xi + d\xi$ que é percorrida pela força F no material ao sofrer o deslocamento longitudinal. Este deslocamento da força se encontra entre o plano original x e $x+dx$, de forma a poder afirmar que a deformação S do material é tida como a relação do deslocamento longitudinal $d\xi$ pelo comprimento original do material dado por dx :

$$S = \frac{d\xi}{dx} \quad (2)$$

Figura 7 – Forças de compressão em um material de comprimento dx

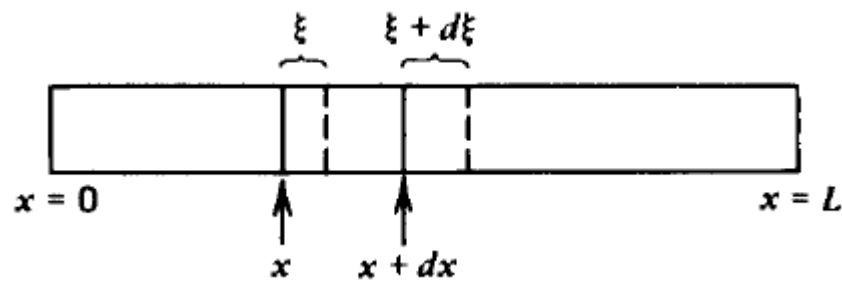


Fonte: O autor (2017)

A força que é produzida quando um material é tensionado age através da seção transversal do material mantendo-o compacto. A representação dessa força longitudinal que mantém o material compacto é dada por $F = F(x,t)$, onde, convencionalmente, é aceito que forças de compressão o valor de F positivo e para forças de tensionamento o valor de F negativo.

A Figura 7 apresenta uma força de compressão, logo positiva, em um material de comprimento dx (Kinsler et al, 2010).

Figura 8 - Deformação mecânica causada por uma força longitudinal



Fonte: Kinsler, et al (2000)

A tensão mecânica causada em um material é definida pela relação entre esta força F aplicada pela área de seção transversal s do material:

$$T = \frac{F}{s} \quad (3)$$

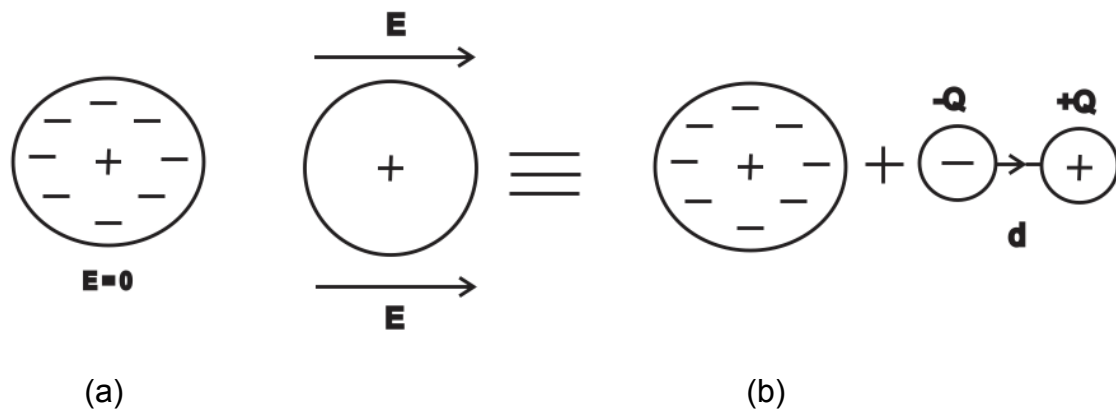
Ao ser realizada uma deformação em um material piezelétrico e considerado o efeito piezelétrico inverso onde é aplicada uma tensão no material,

essa deformação causada pelo estresse aplicado varia em torno de 0,1% da dimensão original do material.

2.1.2 Campo elétrico (E) e Deslocamento Elétrico (D)

Um campo elétrico é um campo de forças criado pelo acionamento de cargas elétricas, conhecidas como elétrons, prótons ou íons em um determinado material. O campo elétrico é visto como um vetor de cargas, e pode funcionar como uma força repulsiva ou atrativa. Quando uma carga elétrica é aplicada em um dielétrico ocorre um deslocamento elétrico, que é entendido como um deslocamento de elétrons livres nas camadas atômicas mais externas do material. Esse deslocamento elétrico ocorre em um material quando um campo elétrico, ou seja, uma força externa, é aplicada no mesmo. Se imaginarmos um átomo de um material dielétrico constituído de uma carga negativa $-Q$ (nuvem eletrônica) e uma carga positiva $+Q$ (núcleo), como é mostrado na Figura 9a, e consideramos uma reprodução parecida para uma molécula dielétrica, onde os núcleos das moléculas são cargas pontuais e as nuvens eletrônicas uma nuvem de cargas negativas, tendo o mesmo número de cargas positivas e negativas, portanto uma molécula eletricamente neutra. A partir da aplicação de um campo elétrico E a carga positiva se desloca em $F_+ = QE$ e a carga negativa se desloca em $F_- = QE$, como mostrado na figura 9b. Desse deslocamento é derivado um dipolo e desta forma o dielétrico é considerado polarizado. De acordo com o sistema internacional de unidades a unidade do campo elétrico é Newton por Coulomb $\left(\frac{N}{C}\right)$.

Figura 9 – (a) Aplicação de campo elétrico em uma molécula dielétrica neutra. (b) Polarização da molécula dielétrica.



Fonte: Sadiku, Matthew, N. O. (2012)

2.2 Piezeletricidade

O termo piezeletricidade vem sendo usualmente utilizado para caracterizar a capacidade de alguns materiais de desenvolverem deslocamentos elétricos D , que são diretamente proporcionais ao stress mecânico aplicado T (SAFARI; AKDOGAN 2008). Este efeito piezelétrico ocorre em 20 dos 32 grupos de cristais existentes (VIJAYA, 2013). Uma condição básica para ocorrência de piezeletricidade é a não simetria dos cristais, ou seja, que não possuam centro e planos de simetria perpendiculares (KATZIR, 2003), sendo assim materiais anisotrópicos (característica de um material em que suas respostas serão diferentes conforme as diferentes direções em relação ao estímulo externo sofrido).

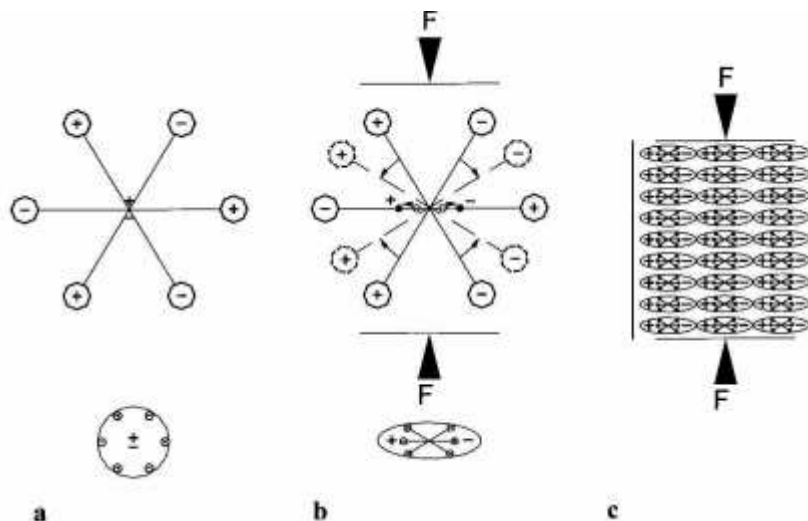
Em cristais com centro de simetria, a movimentação de cátions e ânions quando submetidos a uma diferença de potencial, causa deformação praticamente nula, sendo que a polarização responsável pela piezeletricidade surge de pequenos deslocamentos de íons na estrutura cristalina, causando a deformação no material. Esse tipo de material pertence à seção de *smart materials*, termo este originado há aproximadamente 30 anos e sendo utilizado para designar materiais que apresentam propriedades peculiares de transdução quando sofrem estímulos externos (VIJAYA, 2013).

Na Figura 10a vemos um modelo da estrutura de um material piezelétrico, onde pode ser analisada a geração de uma carga elétrica resultante de uma força

externa aplicada no material.

Antes de ser aplicada uma força externa no material, o centro de gravidade das cargas positivas e negativas de cada molécula coincidem, de forma a serem canceladas, fazendo com que a molécula seja considerada uma molécula eletricamente neutra, porém ao ser exercida uma força sobre sua superfície, é ocasionada uma deformação e as cargas positivas e negativas do material são separadas gerando desse modo pequenos dipolos elétricos, como pode ser visto na Figura 10b. A polarização do material (Figura 10c) acontece quando as cargas do polo são canceladas de forma que uma nova combinação de cargas apareça na superfície do material, gerando uma diferença de potencial que então pode ser medida e/ou utilizada para outros fins.

Figura 10 - Modelo explicativo de uma molécula piezelétrica. (a) Estrutura piezelétrica sem deformação. (b) Estrutura piezelétrica submetida a uma força. (c) Material com polarização em sua superfície.

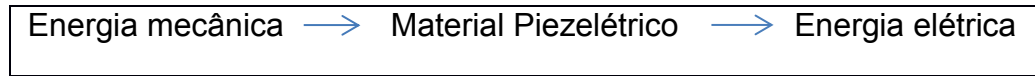


Fonte: Antonio Arnau (2008)

A piezeletricidade pode ser analisada de duas formas:

O efeito piezelétrico direto consiste na conversão de energia mecânica em forma de tensão (*stress* T) ou deformação (*strain* S), aplicado no componente piezelétrico, em energia elétrica em forma de campo elétrico (E) ou deslocamento elétrico (D). (VIJAYA, 2013). O diagrama desta conversão pode ser visualizado na Fig. 11.

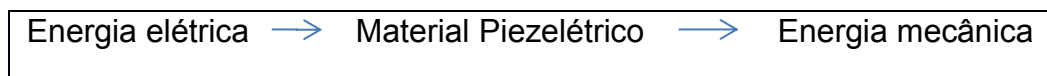
Figura 11 - Conversão de energia no efeito piezelétrico direto.



Fonte: O autor (2016)

No efeito piezelétrico indireto, diagramado na Figura 12. Ocorre a conversão de energia elétrica em forma de campo elétrico (E) ou tensão (V) em energia mecânica em forma de stress (T) ou strain (S). (VIJAYA, 2013).

Figura 12 - Conversão de energia no efeito piezelétrico indireto.



Fonte: O autor (2016)

2.3 Equações piezelétricas

O fenômeno piezelétrico é descrito pelas equações piezelétricas. Essas equações são definidas como relações lineares entre as grandezas mecânicas e elétricas citadas na seção anterior.

Em uma primeira abordagem realizada pelos irmãos Curie, quando descobriram que o efeito piezelétrico direto ocorre quando o material é submetido a uma tensão mecânica (*stress*) gerando assim uma carga elétrica proporcional à tensão mecânica aplicada, uma polarização piezelétrica P_p era fornecida e composta pelo coeficiente piezelétrico d do material multiplicado pelo *stress* (tensão mecânica) ao qual o material foi submetido, d é o coeficiente piezelétrico, entendido como a proporcionalidade entre a carga gerada à ação mecânica aplicada, no caso do efeito direto. E a deformação gerada em relação ao campo elétrico aplicado, no caso do efeito inverso.

Sendo então suas unidades de medidas $\text{m/V} \times 10^{-12}$ (metros/Volt) ou $\text{C/N} \times 10^{-12}$ (Coulombs/Newton). Por meio desta constante é possível determinar o caráter do material piezelétrico o que é fortemente relevante em projetos de posicionadores e sensores de força e deformação.

$$P_p = dT \quad (4)$$

Como mostrado na equação 5, a polarização piezelétrica é equivalente à constante piezelétrica e e multiplicada pela deformação S produzida pelo efeito piezelétrico, bem como também pode ser entendida pela multiplicação da constante piezelétrica e pelo coeficiente piezelétrico d e campo elétrico aplicado E :

$$S_p = eS_p = edE \quad (5)$$

Dado que E é constante, a polarização piezelétrica P_p aumenta de acordo com o aumento do campo elétrico aplicado.

Posteriormente, foi verificado pelos irmãos Curie no efeito piezelétrico inverso que a razão entre a deformação produzida e a magnitude do campo elétrico aplicado no efeito inverso é igual à razão entre a polarização piezelétrica produzida e a magnitude da tensão mecânica aplicada no efeito direto (ARNAU, 2008). Dessa forma, o efeito piezelétrico inverso ocorre quando um campo elétrico é aplicado no material, causando uma deformação S_p , determinada pelo produto do coeficiente piezelétrico d e o campo elétrico E aplicado:

$$S_p = dE \quad (6)$$

A Equação 6 é uma expressão do efeito piezelétrico inverso para um material piezelétrico linear, pois até um dado limite de tensão elétrica aplicada a deformação de resposta é linear. Também ao ser submetido a um campo elétrico E , um material piezelétrico é submetido a um deslocamento elétrico D dado pela permissividade dielétrica ε multiplicada pelo campo, como segue:

$$D = \varepsilon E \quad (7)$$

Essa deformação, causada pela aplicação de um campo elétrico devido à polarização piezelétrica, aumenta a densidade de superfície de cargas em uma quantidade dada pela Equação 8. Como o campo elétrico é mantido constante a polarização piezelétrica aumenta o deslocamento elétrico de cargas livres propondo um deslocamento elétrico total dado por:

$$D = \varepsilon E + P_p = \varepsilon E + edE = \bar{\varepsilon} E \quad (8)$$

Sendo $\bar{\varepsilon}$ uma constante piezelétrica efetiva englobando a contribuição piezelétrica (ARNAU, 2008).

Como mostrado na equação 5, a polarização piezelétrica é equivalente à constante piezelétrica e e multiplicada pela deformação S produzida pelo efeito piezelétrico, bem como também pode ser entendida pela multiplicação da constante piezelétrica e pelo coeficiente piezelétrico d e campo elétrico aplicado E :

$$P_p = eS_p = edE \quad (9)$$

Dado que E é constante, a polarização piezelétrica P_p aumenta de acordo com o aumento do campo elétrico aplicado.

Tanto o efeito piezelétrico direto como inverso podem ser escritos de formas variadas (equações 10 e 11) se considerada a propriedade elástica c do material, esta é entendida como a “constante da mola” do material, é o coeficiente que estabelece a proporcionalidade da tensão mecânica T gerada pela aplicação da deformação, s é o coeficiente de compliância que relaciona a deformação produzida pela aplicação da tensão. A utilização desta constante é principalmente vista na equação 10 do efeito piezelétrico inverso. E e e é a constante da tensão mecânica piezelétrica (ARNAU, 2008).

$$P_p = dT = dcS = eS \quad (10)$$

$$T_p = cS_p = cdE = eE \quad (11)$$

Quando um material piezelétrico sofre uma deformação, são causados dois efeitos: 1) É gerada uma tensão elástica T_e que é proporcional à tensão mecânica $T_e = cS$. 2) Será gerada uma polarização piezelétrica de acordo com a Equação (7), que criará um campo elétrico interno, dado pela Equação 12:

$$E_p = \frac{P_p}{\epsilon} = \frac{eS}{\epsilon} \quad (12)$$

Com a criação desse campo elétrico é produzida uma força contrária à deformação na estrutura do material, criando assim uma tensão $T_p = eE_p$. Essa tensão, bem como a tensão elástica produz uma ação contrária à deformação, de forma que a tensão gerada a partir da aplicação da deformação é dada por:

$$T = T_e + T_p = cS + \frac{e^2}{\epsilon} S = \left(c + \frac{e^2}{\epsilon}\right) S = \bar{c}S \quad (13)$$

A constante de rigidez piezelétrica é dada por \bar{c} , ela provoca um aumento do valor da constante elástica no material devido ao efeito piezelétrico.

De forma geral, o efeito piezelétrico direto, bem como o inverso, pode ser descrito como uma relação de tensão mecânica T , deformação S , campo elétrico E e deslocamento elétrico D matematicamente são expressos pelas Equações que estão escritas em notação matricial compacta seguintes:

$$D = dT + \varepsilon E \quad \text{Efeito direto} \quad (14)$$

$$S = sT + dE \quad \text{Efeito inverso} \quad (15)$$

Além das formas descritas anteriormente, as equações piezelétricas podem ser anunciadas de diferentes formas, dependendo da escolha das variáveis dependentes e independentes, são elas:

$$D = eS + \varepsilon E \quad (16)$$

$$T = cT - eE \quad (17)$$

$$E = -gT + \beta D \quad (18)$$

$$S = sT + gD \quad (19)$$

$$E = -hS + \beta D \quad (20)$$

$$T = cD - hD \quad (21)$$

A constante de tensão piezelétrica g que é a constante que determina a proporção entre a diferença de potencial gerada em relação à tensão mecânica aplicada, considerando a cerâmica medindo 1 metro. Considera-se a mesma medida da cerâmica piezelétrica PZT, a extensão é de -1 a 60 V para cada newton que será aplicado, de forma que aumentando a força ou diminuindo a medida da cerâmica o módulo da tensão aumenta. Essa é uma constante muito relevante para projeto de sensores. Sua unidade de medida é dada por Vm/N – Volts x metros/Newton.

Eficiência e modos dos materiais piezelétricos:

SHENCK (1997) esclarece que existem três fatores que estão estreitamente relacionados com a resposta do piezelétrico, em relação à força aplicada. São eles:

- Dimensão do elemento e suas geometrias;
- As propriedades do material piezelétrico que está sendo utilizado;
- A direção da excitação mecânica ou elétrica aplicada;

As direções são definidas por modos eletromecânicos estabelecidos pelos eixos excitados elétrica e mecanicamente, os modos são dependentes da estrutura cristalina do cristal, pois são o resultado das ondas estacionárias do corpo sólido analisado (KINSLER, 2000).

Os eixos são comumente utilizados para localização de um corpo no espaço e suas orientações são x, y e z dentro um plano cartesiano, nas especificações de materiais piezelétricos os eixos do material são enumerados 1, 2, 3 e mostrados na Figura 13.

Nesta mesma Figura 13 é ilustrado o material piezelétrico, onde são definidas as direções que o deslocamento pode ser realizado. Como pode ser visto na figura o modo 33 ocorre quando existe propagação de onda elástica paralela à direção da excitação elétrica realizada, ou seja, a tensão gerada no eixo z ou 3 será colhida paralelamente à tensão mecânica aplicada ao eixo 3. Por esse motivo todas as características especificadas pelo material serão seguidas pelos números “33”, o primeiro relacionado à orientação da tensão aplicada e o segundo relacionado à orientação da tensão resultante medida. Desta forma conclui-se que no estudo que segue o modo a ser analisado é o modo espessura.

Sendo assim, as equações piezelétricas utilizadas para um transdutor em modo espessura são dadas por:

$$S_3 = \frac{1}{Y_3} T_3 + d_{33} E_3 \quad (22)$$

$$D_3 = d_{33} T_3 + \epsilon_{33}^T E_3 \quad (23)$$

Onde:

S, T : são vetores de deformação e tensão mecânicas;

D, E : são vetores de deslocamento elétrico e campo elétrico;

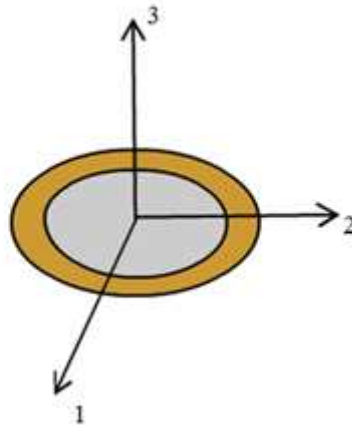
s : é uma matriz de compliância mecânica;

ε : é uma matriz das constantes dielétricas de permissividade dielétrica do material piezelétrico;

d : matriz dos coeficientes de deformação piezelétrico;

Y_i^E $i = 1, 2, 3$ módulo longitudinal na direção i (Módulo de Young, que é o módulo de elasticidade, proporcionando uma medida da rigidez do material);

Figura 13 - Direção dos eixos de materiais piezelétricos



Fonte: O Autor (2017)

YANG et al. 2005 mostrou que no modo 33 a potência de saída do sistema é proporcional ao coeficiente de acoplamento k e à constante dielétrica ε . Essa informação confirma o entendimento de que dispositivos com maiores coeficientes de acoplamento produzem maior potência e comportamento mais eficiente. Também, neste estudo, é demonstrado que quando um sistema opera em ressonância são observados mais deslocamentos do que quando operam abaixo ou acima da frequência de ressonância.

CAPÍTULO 3

Metodologia

Neste capítulo é descrito como a obtenção dos dados experimentais foi realizada, bem como os equipamentos utilizados para realização dos testes, geração, captação, retificação, regulação e armazenamento da energia.

A metodologia do trabalho está dividida em:

- A) Caracterizar as cerâmicas piezelétricas utilizadas nos testes;
- B) Desenvolver um sistema eletroeletrônico mecânico para a realização de ensaios de pressão das cerâmicas;
- C) Adaptar arranjos com valores variáveis de cerâmicas piezelétricas para maior geração de energia;
- D) Construir um circuito eletrônico, já utilizado na literatura, para a coleta e regulação da tensão elétrica convertida;
- E) Medir a potência elétrica fornecida pelo circuito eletrônico a partir de níveis de pressão e frequência aplicados pela máquina de ensaio;
- F) Carregar uma bateria na condição mais eficaz de geração de energia encontrada nos testes.

A motivação para o seguimento dessa metodologia se depara com objetivo geral do trabalho; o aproveitamento da energia gerada pela pressão realizada nos *buzzers* piezelétricos. Para tanto, se faz necessário o conhecimento do material que está sendo utilizado, quais são as principais características do componente, e desta forma analisar sua capacidade de conversão de energia, tendo como base quanto maior o valor fornecido por d_{33} melhor sua capacidade de conversão. Para essas dúvidas serem sanadas a caracterização das cerâmicas é fundamental.

A partir da caracterização do componente realizada, será analisada a resposta das mesmas cerâmicas quando pressionadas com variadas pressões e frequências pelo sistema eletroeletrônico mecânico de ensaio. Este desenvolvimento do sistema eletroeletrônico mecânico para a realização do ensaio é indispensável para a obtenção de valores seguros para realização da emulação. Por meio da

utilização deste sistema é possível a variação de frequência com que a pressão mecânica será realizada sobre os arranjos piezelétricos, tal como a variação da pressão efetuada. Desta forma duas componentes distintas variadas de acordo com a máquina de ensaio.

Após a caracterização das cerâmicas, é aplicado o método de verificação das respostas dos arranjos quando pressionados com o sistema de ensaio. É o momento de serem ajustados os arranjos e determinados quais serão capazes de proporcionar maior aproveitamento do componente e de sua energia gerada, ou seja, qual é a quantidade de piezos, a frequência e a pressão mais eficiente para atingir o objetivo do estudo.

Para a realização da coleta, retificação e regulação da tensão fornecida pelos arranjos piezelétricos se faz necessário um circuito eletrônico condicionador de energia, este foi desenvolvido por KYMISSIS et al. em 1998 e é apresentado na seção 3.4.

A medição da potência é relevante, pois determina o montante de energia fornecido pelo esquemático. Para realização desta medição são utilizados resistores de cargas variáveis na saída do circuito eletrônico, as cargas variando de $5,1\text{k}\Omega$ até $100\text{ k}\Omega$ fornecem a queda de tensão em cada resistor, possibilitando o cálculo da potência por meio da fórmula 26, seção 3.5.

Em seguida uma bateria NiMH de 1,2 V de armazenamento e 750 mAh será vinculada ao circuito de retificação e regulação de tensão, será mostrado o armazenamento de energia introduzido nos testes, bem como a medição da potência fornecida e a verificação se o uso da mesma se torna eficaz.

3.1 Caracterização das cerâmicas piezelétricas

A caracterização das cerâmicas piezelétricas é de ampla relevância, pois é a partir dessa atividade que são descobertas as principais particularidades de cada cerâmica e então uma avaliação comparativa entre as mesmas pode ser realizada. Nesse estudo será focada a medição das frequências de ressonância e antirressonância e a constante d_{33} que é o coeficiente mecânico.

As medidas e a caracterização realizada foram feitas em 18 cerâmicas

piezelétricas do tipo *buzzer* similar ao exibido na Figura 1. O *buzzer* constitui-se pela junção de uma fina camada da cerâmica PZT ligada a uma chapa de metal circular através de adesivos. Os eletrodos são colados na cerâmica piezelétrica por meio de uma solução em gel adesivada no disco cerâmico (MURATA, 2012). As dimensões do disco metálico são 35 mm e 0,6 mm de diâmetro e espessura, respectivamente. A cerâmica, colada concentricamente, mede 20 mm de diâmetro e 0,3 mm de espessura. A escolha do *buzzer* deu-se pelo fato do mesmo ser de fácil acesso comercial e sua aquisição ser de baixo custo.

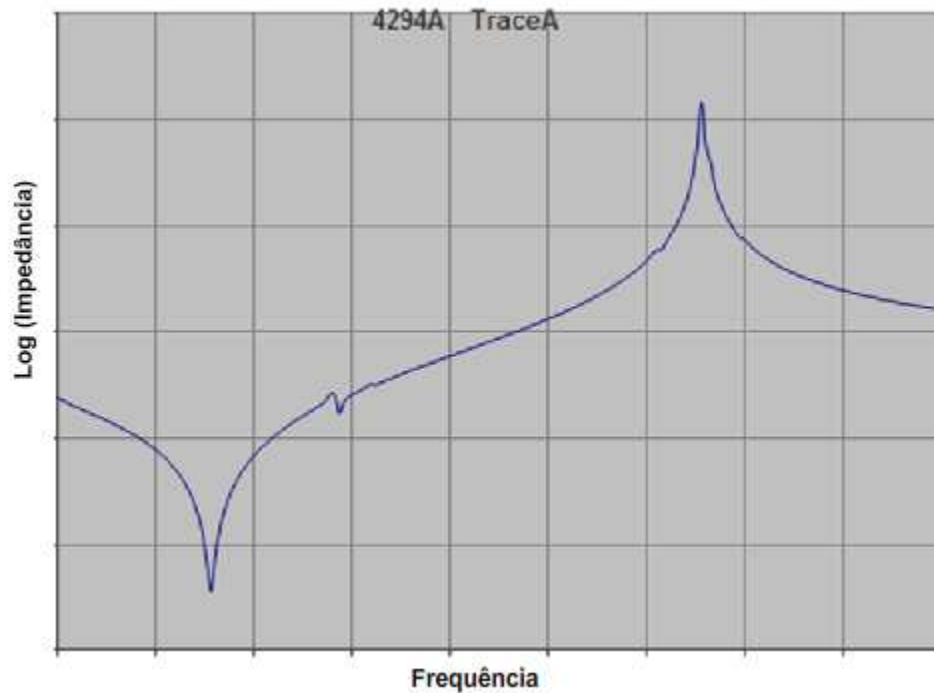
3.1.1 Frequências de ressonância e antirressonância e coeficiente de acoplamento eletromecânico

As frequências de ressonância e antirressonância do modo espessura foram obtidas através da utilização do analisador de impedância HP4294A que é um equipamento fornecedor do módulo e as componentes resistiva e reativa do componente.

A coleta deste tipo de informação é importante, pois a partir dela são obtidos os valores de impedância máxima, onde a corrente é mínima, e a impedância mínima, onde a corrente é máxima. Este conhecimento permite o agrupamento dos componentes mais semelhantes entre si, de forma que os arranjos sejam menos disformes possíveis, permitindo um melhor funcionamento e maior geração de energia pelo componente piezelétrico. O contato do analisador de impedância com o componente piezelétrico se dá por meio de duas pontas de prova em contato com o material a ser medido. Como explicada na seção 1.1, a cerâmica piezelétrica é composta pela camada de material piezelétrico colada sobre uma camada de latão, que é o eletrodo. Essa camada de eletrodo é milímetros sobressalente à da cerâmica piezelétrica, portanto para a medição ser executada uma ponta de prova é colocada sobre a cerâmica piezelétrica e a outra ponta de prova sobre o latão. A análise realizada é no domínio da frequência, configurando o impedômetro em um intervalo de 1 Hz a 200.

Na Figura 14 é possível visualizar o gráfico da resposta em frequência de um material piezelétrico PZT, a imagem fornece a frequência de ressonância, que se encontra no vale da onda onde a impedância é mínima, e a frequência de antirressonância no pico da onda onde a impedância é máxima.

Figura 14 – Resposta em frequência de um material piezelétrico PZT.



Fonte: O autor (2017)

Um comparativo entre cristais de quartzo e BaTiO_3 (cerâmica piezelétrica) e constantes piezelétricas foi adaptado por Berlincourt et al. e são encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Cerâmicas piezelétricas e constantes de caracterização.

| | Complância elástica ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N})(S_{33})$ | Constante dielétrica K_{33}^T |
|------------------|---|------------------------------------|
| Quartzo | 9,60 | 4,68 |
| BaTiO_3 | 15,7 | 168 |

Fonte: (Berlincourt et al, 1964).

Com os valores da frequência de ressonância (f_r) e frequência de antirressonância (f_{ar}) de cada *buzzer* é possível a obtenção do valor de coeficiente de acoplamento eletromecânico, dado pela equação 24 (IEEE Standard, 1987). O coeficiente de acoplamento eletromecânico calculado é uma aproximação, pois o método para obtenção das frequências de ressonância e antirressonância do material piezelétrico foram obtidas no modo radial 31 e não espessura 33, isso

acontece por conta da impossibilidade de separação do material piezelétrico da estrutura que ele vem colado.

$$k_{ef} = \sqrt{\frac{f_{ar}^2 - f_r^2}{f_{ar}^2}} \quad f_{ar} > f_r \quad (24)$$

3.1.2 Coeficiente piezelétrico

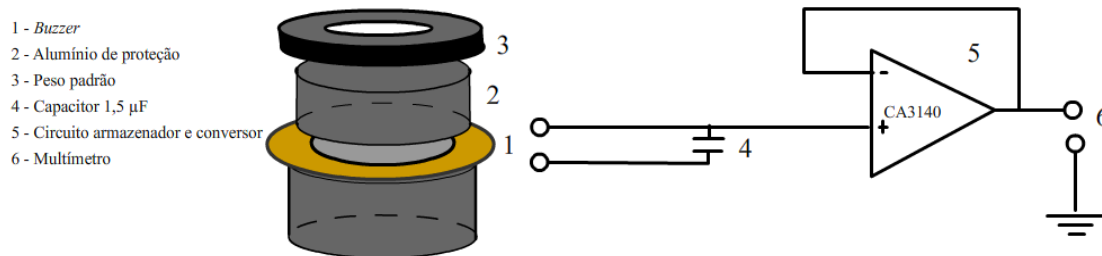
O coeficiente mecânico d_{33} é entendido como a eficiência da cerâmica; a quantidade de tensão gerada com determinada compressão mecânica realizada, portanto quanto maior o d_{33} o material melhor é sua resposta.

A caracterização da cerâmica do tipo *buzzer* e de seu coeficiente mecânico foi realizada por meio da medição da tensão gerada versus compressão mecânica efetuada, definindo assim seu d_{33} , que é a proporcionalidade entre a carga gerada e a ação mecânica aplicada, como dito anteriormente, na seção 2.3. Essa medição foi realizada utilizando pesos padrão e um circuito armazenador de cargas e conversor Coulomb-Volt, que pode ser visualizado na Figura 15. A impedância em função da frequência foi medida através da utilização do impedômetro HP4294A.

Ainda na Figura 15, visualizamos o capacitor utilizado para armazenamento de cargas, sua capacitância de 1,5 μF muito superior à capacitância intrínseca da cerâmica (39 nF) possibilita que a diferença de potencial gerada na cerâmica seja armazenada integralmente no capacitor e mantenha-o carregado, isto ocorre em consequência do “buffer” de alta impedância, moldado pelo amplificador operacional CA314 de ganho unitário vinculado ao capacitor (ARNOLD, 1995). Por fim, na saída do capacitor é posicionado o voltímetro digital Minipa ET-1100A para mensuração da tensão gerada pelo material piezelétrico.

A compressão mecânica foi realizada com o auxílio de peso padrão de 1 kg, fornecendo assim uma compressão mecânica de 1 kg sobre a área plana do *buzzer* $A = 314 \text{ mm}^2$. A força aplicada no componente piezelétrico gera uma diferença de potencial em sua superfície que, armazenada no capacitor do circuito armazenador de cargas, é medida com o auxílio de um multímetro, como explicada anteriormente.

Figura 15 - Arranjo experimental para medição de d_{33} , circuito armazenador de cargas e conversor Coulomb-Volt.



Fonte: O autor (2017)

Obtendo a diferença de potencial e sabendo a pressão mecânica realizada é possível calcular o coeficiente piezelétrico d_{33} por meio da equação:

$$d_{33} = \frac{CV}{TA_c} \quad (25)$$

Onde:

C: Capacitância no capacitor em F

V: Tensão no capacitor em V

T: Tensão mecânica realizada pelo peso padrão (tensão mecânica dividida pela área do alumínio)

A_c : Área do material piezelétrico

3.2 Sistema mecânico de ensaio

A estrutura mecânica elaborada tem como intenção emular impacto variando a frequência e a pressão realizadas. Com a utilização deste sistema foram realizados diversos ensaios com pressões, frequências e cargas variáveis. A execução desse sistema é uma forma de aumentar e aprimorar a produção de testes e obtenção de resultados em relação à geração de energia das cerâmicas piezelétricas.

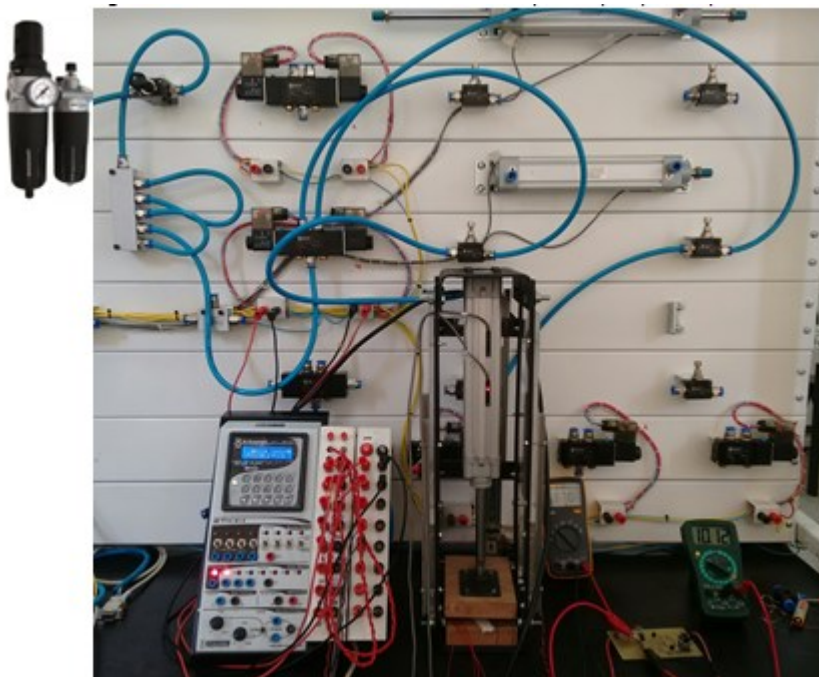
3.2.1 Descrição mecânica

A estrutura mecânica consiste em um esquema de emulação de impacto onde são analisadas as respostas das cerâmicas aos serem pressionadas. A

utilização do pistão e do regulador de pressão e rosca ¼" BPS permite a variação de pressão, entre 0,2 a 8 bar (20000 a 800000 Pa), exercida sobre os componentes (WERK-SCHOTT pneumática).

Para teste, desenvolvimento e melhor aproveitamento da cerâmica piezelétrica foi solicitado ao engenheiro João Francisco Viana a construção de um dispositivo capaz de fornecer melhor rendimento nos testes e proporcionar uma larga gama de informações com valores de cargas variáveis de acordo com o funcionamento do utensílio. O equipamento pneumático desenvolvido, como mostrado na Figura 16 é composto por um cilindro (pistão) pneumático a ar comprimido de dupla ação de amortecimento com 32 mm de diâmetro, do modelo cwu e03273410 0150 fabricado pela Werk Schott pneumática com amortecimento ajustável (Werk Schott 2015). A fim de atender às normas de segurança, o sistema pneumático foi cercado por paredes acrílicas, e para facilitar a passagem e adequação das cerâmicas em dois lados amurados foram construídas portas acrílicas controladas por micro *switches* (chaves de fim de curso), este se trata de um comutador eletrônico capaz de conduzir com baixíssima força física, ligadas à micro controladores, desta forma as portas só serão abertas quando o pistão não estiver em funcionamento.

Figura 16 - Sistema mecânico de ensaio, composto por pistão pneumático.

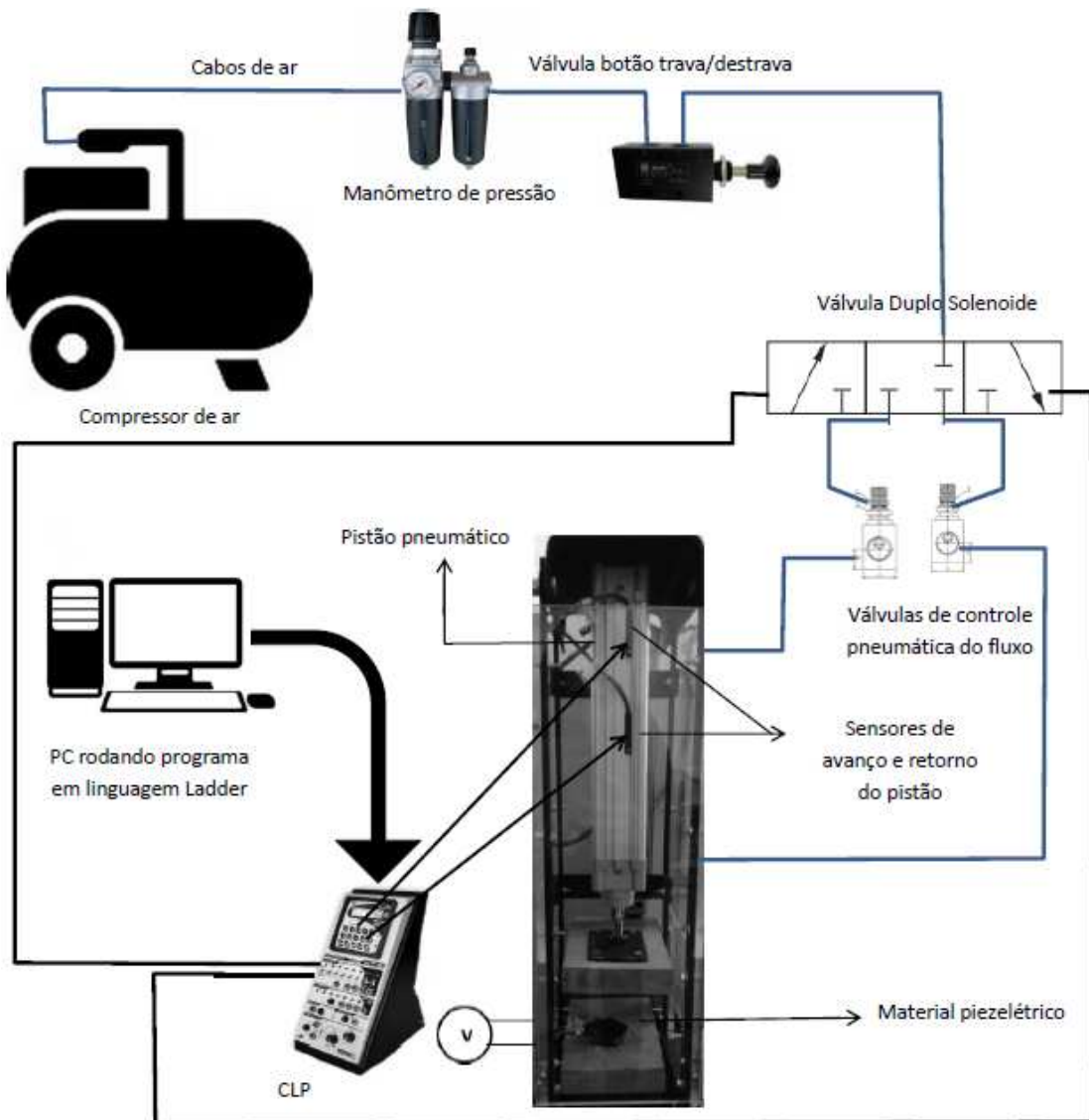


Fonte: O autor (2017)

O dispositivo mecânico visto na Figura 16 é alimentado pelo compressor de ar comprimido csv10 Schulz Pratic Air. O ar fornecido pelo compressor é canalizado por intermédio de mangueiras de ar até o conjunto lubrificador, onde a pressão é manualmente ajustada. Após a definição da pressão é desabilitada, manualmente, a válvula de liberação do ar que é então direcionado para a válvula de duplo solenoide (que é um tipo de aparelho influenciador de percurso do fluido, atua na direção do fluxo, paradas e partidas). O funcionamento da válvula duplo solenoide é definido por pulsos de 24 Vcc controlados pelo CLP (Controle lógico programável) (HI Tecnologia ZTK Ezap 91x). No CLP é onde ocorre o gerenciamento do *software* que permite o funcionamento do pistão na sua função de gerar impactos. O ar liberado pela válvula duplo solenoide será então regulado pelas duas válvulas de controle de fluxo, por meio de um parafuso regulador para cada válvula, é ajustado o avanço e o retorno da haste do pistão. Desta forma é possível variar a velocidade do cilindro e assim estipular a frequência por ciclo de trabalho.

Na Figura 17 é mostrado como funciona o sistema eletroeletrônico mecânico por meio de um diagrama.

Figura 17 – Diagrama do sistema eletroeletrônico mecânico



Fonte: O autor (2017)

De acordo com a metodologia explanada anteriormente, foi montado o sistema de teste com o sistema eletroeletrônico mecânico de forma que fosse possível selecionar as condições desejadas para que a realização dos testes abrangesse a estimativa desejada.

Para o bom funcionamento deste sistema é necessário o ajuste de algumas variáveis na máquina de testes, são elas: a) fixação da pressão de funcionamento na máquina de ensaio; b) Escolhas das frequências de emulação.

a) Para fixação da pressão de funcionamento na máquina de ensaio é utilizado um manômetro analógico que foi configurado em três pressões: 3, 4 e 5

bar, gerando desta forma uma força de 24,60 kgf, 32,80 kgf e 41,00 kgf respectivamente. Para obtenção desses valores são necessárias algumas poucas conversões matemáticas de unidades de medida e aplicação na fórmula $F = pA$, onde p é a pressão exercida e A a área do êmbolo, ou seja, obtendo o valor de pressão escolhido e gerado no sistema eletroeletrônico mecânico, dado em bar, multiplica-se pela área do êmbolo do pistão ($804,25 \text{ mm}^2$) podemos adquirir o valor da força exercida em kgf e multiplicando o valor por 9,8066 obtemos na grandeza de Newtons.

b) As frequências escolhidas para emulação são frequências que podem ser produzidas por humanos, caminhadas e leves corridas: 1 Hz e 2 Hz, para a fixação desta variável são utilizadas válvulas de controle pneumático de fluxo, que servem para regular o tempo de avanço e retorno do pistão, de forma que a frequência seja estipulada através do aferimento do tempo necessário para a realização de determinada quantidade de ciclos.

3.3 Arranjos Piezelétricos

Para a escolha do tipo de arranjo piezelétrico a ser utilizado, é fundamental aferir qual o modelo de ligação dos componentes, tanto elétrica quanto mecânica, é o mais adequado para geração de energia elétrica bem como a quantidade de materiais piezelétricos utilizados para o teste, é o necessário para que a geração seja efetiva.

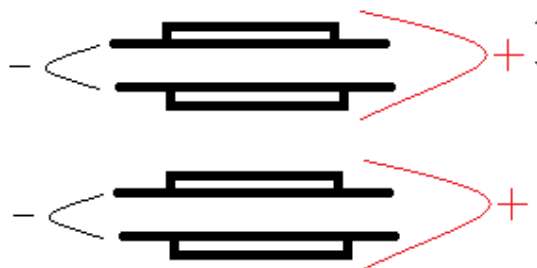
ANTON e SODANO (2003 - 2006) apresentam uma ampla atualização de estudos relacionados a materiais piezelétricos das últimas décadas, dentre esses casos apresentados, encontra-se o estudo de NG e LIAO (2004, 2005) onde foram estudados dois tipos de ligação com bimorfos piezelétricos (duas placas de material piezelétrico montados em uma viga de material metálico). A primeira ligação eletricamente em série e a segunda eletricamente em paralelo. O resultado foi que para a ligação eletricamente em paralelo a potência de saída gerada é maior que para a ligação eletricamente em série. Em estudo semelhante SANCHES (2015), realizou um extenso trabalho comparativo entre a utilização de *buzzers* piezelétrico em ligação em série e paralelo, a conclusão é que em ligação eletricamente em paralelo a configuração apresenta mais linearidade que em série e as respostas de potência também são melhores.

Segundo ANTON e SODANO (2003-2006) essa melhora na ligação eletricamente em paralelo ocorre por conta da máxima transferência de potência que ocorre quando a resistência da carga coincide com a impedância do material piezelétrico e também por conta da variação da frequência de excitação (SANCHES, 2015).

Reconhecidas essas informações, foi concluído que o melhor arranjo piezelétrico para geração de energia a ser utilizado é com a ligação eletricamente em paralelo como é visualizado na Figura 18.

O próximo ponto a ser variado é a quantidade de materiais piezelétricos utilizados nos testes, para isto foram organizados grupos de 4, 6 e 8 *buzzers*, de forma que variando suas montagens foi possível fazer testes de 4, 6, 8, 10, 12 e 14 componentes. A junção dos componentes é realizada mecanicamente em série (um sobre o outro), e eletricamente em paralelo, ou seja, o polo positivo de um componente ligado com o polo positivo de outro, da mesma forma o polo negativo de um ligado com o polo negativo de outro, como pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 - Ligação mecanicamente em série e eletricamente em paralelo dos *buzzers* piezelétricos a) esquemático b) real.



(a)



(b)

Fonte: O autor (2017)

3.3.1 Medição do tempo de carregamento

A forma de comparação da eficácia dos arranjos piezelétricos é o tempo necessário para que a saída do circuito eletrônico forneça 5 V. A pressão realizada pelo sistema eletroeletrônico mecânico nos arranjos piezelétricos fornecem pulsos de tensão, que ao alimentarem o circuito eletrônico, tratado na seção 3.4, fornecem uma tensão de saída de 5 V. O tempo necessário para o fornecimento da saída ser 5 V é cronometrado e plotado em gráficos de maneira a realizar uma comparação desses arranjos piezelétricos e das quantidades de cerâmicas utilizadas versus o tempo de fornecimento da tensão.

3.4 Circuito eletrônico

O circuito eletrônico foi inserido no sistema de testes e coleta de informações dos componentes estudados. O mesmo circuito foi utilizado para coleta, retificação e regulação da energia.

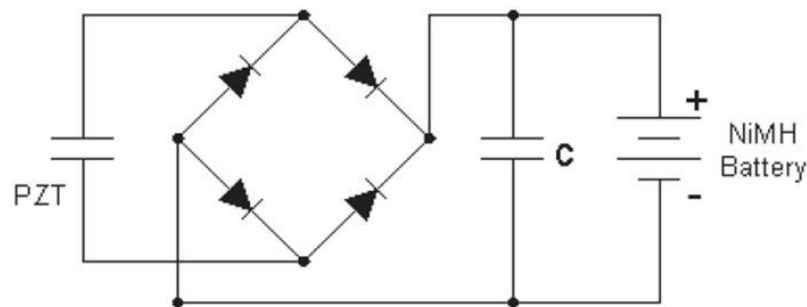
3.4.1 Circuito regulador de tensão

Como mencionado anteriormente em 1.2, SODANO et al. realizaram um estudo de análise da energia gerada por materiais piezelétricos e formas de armazenamento da mesma. Para a realização do estudo foram utilizados dois circuitos, um deles, mostrado na Figura 19 menos complexo composto por materiais piezelétricos como fonte de alimentação, uma ponte retificadora de onda completa, um capacitor de 1000 μF onde é armazenada a carga gerada e retificada pelo circuito que o antecede, e por fim, uma bateria NiMH (Níquel hidreto metálico) ligada em paralelo com o capacitor.

O segundo circuito utilizado se trata de um esquemático montado a princípio por KYMISSIS et al. em 1998 e utilizado por vários autores como circuito condicionador de energia. Esse circuito é mostrado na Figura 20. Seu funcionamento se dá pela tensão elétrica pulsante gerada pelos transdutores piezelétricos, então retificada pela ponte retificadora de onda completa D1. A energia é armazenada no capacitor C1; os transistores Q1 e Q2 funcionam como um circuito SCR; conduzindo fortemente corrente quando polarizados diretamente e conduzindo corrente praticamente nula quando polarizados inversamente, por fornecer

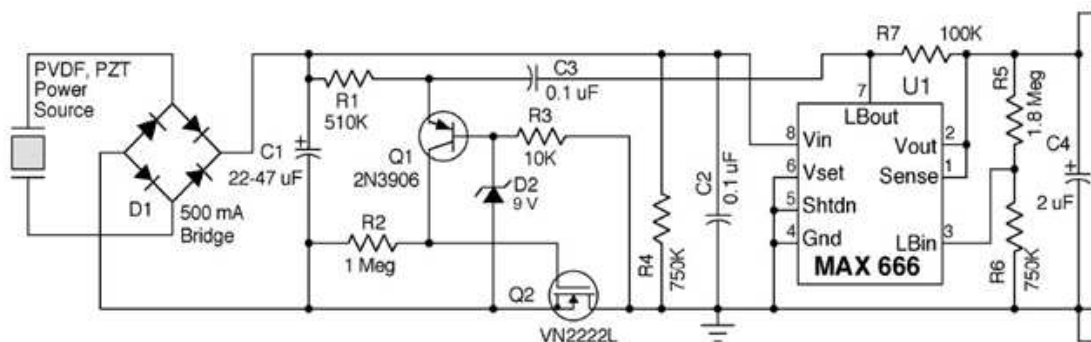
resistência interna elevada. A princípio, tanto Q1 quanto Q2 se encontram desligados de forma que o CI MAX 666, que é um regulador de tensão de baixa potência, regula para que a saída para 5 V não esteja alimentada. O diodo zener D2 setado em 9 V determina que C1 só liberará a energia acumulada quando carregar até 9,6 V, de forma que essa energia liberada ativará Q1 e Q2 alimentando o regulador de tensão. Quando o carregamento de C1 cai abaixo de 4,5 V a alimentação do CI é desligada de forma que um pulso negativo é enviado a C3 desligando Q1 e Q2, C1 então começa a carregar novamente recomeçando o ciclo de funcionamento do circuito.

Figura 19 - Circuito retificador para carregar bateria



Fonte: Kymissis et al (1998)

Figura 20 - Circuito sugerido por Kymissis et al como circuito condicionador de energia.



Fonte: Kymissis et al (1998)

3.5 Medição da potência elétrica

A potência será determinada pela medição da tensão na saída do circuito, sua medição se faz necessária para a verificação do funcionamento do circuito e da geração de energia a partir dos materiais piezelétricos estudados e então a certificação de sua montagem e utilização em *power harvesting* se torna eficaz.

O circuito utilizado necessita de uma tensão de entrada de no mínimo 8V fornecendo após a passagem pelo CI MAX 666 uma saída de 5 V, esta tensão de saída geralmente é a energia suficiente para carregamento de equipamentos eletrônicos que carecem de baixa alimentação, como por exemplo sensores de temperatura, controle remoto, NFC (*Near Field Communication*) sem fio, relógios, etc. A coleta da tensão e potência gerada pelo circuito é realizada com a ajuda de aparelhos de medidas como multímetros e osciloscópios. Estes são colocados na saída do circuito da Figura 20 em que o funcionamento do CI MAX666 fornece uma tensão de 5 V.

Para realização da medição da potência do circuito foram escolhidos resistores variando de 5 kΩ, 10 kΩ, 50 kΩ e 100 kΩ. Valores inferiores a esses não foram utilizados, pois a carga se assemelharia a um curto circuito por possuir uma resistência muito baixa. Para cargas com resistências elétricas superiores a tensão se assemelha a um circuito aberto e a tensão medida na carga seria sempre de 5 V. A partir destas cargas colocadas na saída do circuito em paralelo com o capacitor C4 mediu-se a tensão nos seus terminais e calculou-se a potência por meio da Equação 26.

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (26)$$

Para cada teste realizado foi modificada somente a pressão aplicada, ou seja, a frequência manteve-se a mesma para todos os testes, 2 Hz e o grupo de materiais piezelétricos também. Foi mantida a quantidade de 14 *buzzers* ligados eletricamente em paralelo, dado que essas combinações de quantidade de materiais e a frequência de 2 Hz forneceram os melhores resultados de eficiência em relação ao tempo de carregamento do capacitor. Os resultados obtidos se encontram na seção 4.4.

3.6 Carregamento de bateria

Para realizar o teste de carregamento da bateria, foi utilizada uma bateria recarregável Pilhafacil AAA Rayovac NiMH 1,2 V 750 mAh, com capacidade de recarregamento de até 300 vezes, e mantida as melhores condições de resposta com o arranjo de 14 materiais piezelétricos, frequências de 2 Hz e pressões variáveis de 3, 4 e 5 bar, desta forma foi analisado o tempo de carregamento da bateria.

O modelo de bateria NiMH foi escolhido para o teste porque, como mencionado na seção 1.1, o uso da mesma se torna mais efetivo por possuir uma alta capacidade de carregamento e alta densidade de energia (SODANO et al. 2005). Também sua escolha se deve ao fato do não uso de cádmio em sua fabricação, tornando-a muito menos poluente que outros tipos de bateria semelhantes, haja vista que o cerne do presente trabalho em reaproveitar a energia desperdiçada está intrinsecamente ligado ao melhor uso e consumo desta energia e para isto no desenvolvimento sustentável dos dispositivos eletrônicos utilizados para a captação e armazenamento da carga gerada.

A bateria foi introduzida na saída do circuito eletrônico, em paralelo com C4. O teste se iniciou com a bateria carregada em 0,6 V e seu carregamento foi monitorado por um multímetro ligado paralelamente aos seus terminais. O teste comparativo foi realizado em relação ao tempo de carregamento versos a tensão carregada na bateria. Os valores se encontram na seção 4.5.

CAPÍTULO 4

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados da caracterização das cerâmicas e demais resultados referentes às descrições dos capítulos anteriores. Para tanto, são apresentados gráficos e curvas que demonstram o funcionamento e as respostas de geração e carregamento de energia utilizando os materiais piezelétricos.

4.1 Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados da caracterização e os testes realizados com os arranjos piezelétricos, máquina de teste eletroeletrônica mecânica, potência na carga e carregamento de bateria mostrados no capítulo 3.

4.2 Caracterização das cerâmicas piezelétricas

Os valores que seguem para a caracterização da cerâmica são referentes à metodologia citada em 3.1. Foram obtidos valores de força e tensão elétrica e são mostrados na Tabela 2, a partir da obtenção desses valores é possível determinar o valor do coeficiente piezelétrico.

4.2.1 Frequência de ressonância e antirressonância e coeficiente de acoplamento eletromecânico

Como citado na seção 3.1, para a realização da caracterização da cerâmica piezelétrica *buzzer* foi utilizado o impedômetro HP4294A, este é capaz de fornecer as curvas de impedância e fase do componente. O teste foi realizada para cada uma das 18 cerâmicas piezelétricas do tipo *buzzer* utilizadas nos testes obtendo valores variantes de 75,62 kHz a 79,00 kHz para frequências de ressonância e de 80,19 kHz a 88,78 kHz, nas frequências de antirressonância. As próximas frequências de ressonância e antirressonância não são possíveis serem encontradas por meio dos equipamentos disponibilizados em laboratório. Na tabela 2 são encontrados os valores medidos para frequência de ressonância e antirressonância, impedância de ressonância e antirressonância, k (coeficiente de

acoplamento eletromecânico), a média dos valores e seus respectivos desvios padrão.

Tabela 2 – Valores das frequências de ressonância e antirressonância, impedância de ressonância e antirressonância, k , média e desvio padrão

| Frequência de Ressonância (Fr) (kHz) | Impedância de Ressonância Zr (Ω) | Frequência de Antirressonância (Fa) (kHz) | Impedância de Antirressonância (Za) (Ω) | k |
|---|--|--|---|--------------------|
| 79,00 | 45,00 | 85,37 | 259,12 | 0,38 |
| 75,82 | 52,01 | 80,19 | 159,95 | 0,32 |
| 78,60 | 52,73 | 84,17 | 248,95 | 0,36 |
| 79,00 | 122,00 | 84,00 | 414,00 | 0,34 |
| 78,80 | 41,69 | 84,57 | 189,00 | 0,36 |
| 77,01 | 44,25 | 83,77 | 284,35 | 0,40 |
| 78,00 | 33,56 | 82,18 | 272,40 | 0,31 |
| 77,61 | 35,00 | 82,78 | 340,00 | 0,35 |
| 76,01 | 79,84 | 83,38 | 250,00 | 0,36 |
| 75,62 | 50,86 | 80,79 | 297,52 | 0,35 |
| 77,81 | 42,44 | 82,78 | 179,54 | 0,34 |
| 77,00 | 40,00 | 81,70 | 377,81 | 0,33 |
| 77,40 | 27,75 | 84,17 | 296,41 | 0,40 |
| 78,00 | 29,05 | 82,50 | 408,07 | 0,32 |
| 76,61 | 54,97 | 81,98 | 186,94 | 0,35 |
| 76,41 | 66,12 | 88,75 | 121,37 | 0,51 |
| 76,81 | 31,00 | 81,78 | 324,00 | 0,34 |
| 78,60 | 26,17 | 83,97 | 418,89 | 0,35 |
| 77,50 | 48,58 | 83,26 | 279,35 | 0,36 Média |
| 01,04 | 22,97 | 01,92 | 90,19 | 0,04 Desvio Padrão |

Fonte: O autor (2017)

As impedâncias mínima e máxima das cerâmicas piezelétricas estão relacionadas com as frequências de ressonância e antirressonância, de forma que nas frequências de ressonância a impedância é mínima e na frequência de antirressonância a impedância é máxima. Enquanto que o coeficiente de acoplamento eletromecânico relaciona-se com a taxa de conversão de energia mecânica em elétrica ou o contrário, esta taxa varia frequentemente de 0,25 a 0,75, 25 % a 75 % de eficiência, respectivamente. Como mencionado na seção 3.1 os resultados se tornam mais vantajosos quando a impedância é mínima favorecendo assim o deslocamento de cargas, logo a geração de energia. Por este motivo o teste da obtenção de impedância através da excitação da cerâmica foi primordial para a conclusão dos arranjos piezelétricos. Os componentes piezelétricos para as montagens dos testes foram escolhidos a partir da semelhança de suas

impedâncias. Ou seja, os grupos de 4, 6 e 8 materiais piezelétricos foram montados com cerâmicas piezelétricas que mais se assemelhavam entre si com suas características para assim obterem a melhor geração de energia provável.

4.2.2 Coeficiente piezelétrico

Para caracterização do d_{33} foi utilizado o mesmo sistema descrito em 3.1. Por se tratar de um componente altamente sensível foi empregada uma compressão mecânica de 1 kg. Visando a obtenção da caracterização do d_{33} da cerâmica do tipo *buzzer* foi montado o arranjo utilizando o circuito armazenador de cargas e conversor Coulomb/Volt apresentado na figura 15. Foi utilizado um *buzzer* encostado em duas placas de latão, estas placas exercem a função de eletrodos no componente. Esse procedimento se faz necessário dado à fina camada de material piezelétrico que compõe o *buzzer* não possibilitando a solda de um terminal no próprio componente sem acarretar inconvenientes no contato do componente. Dois cilindros de alumínio foram colocados em cima e abaixo do *buzzer* de forma a ser formada uma base para serem posicionados o peso padrão de 1 kg. A tensão gerada pelo arranjo piezelétrico é então transferida para o circuito armazenador de cargas, ao final do circuito situa-se o capacitor armazenador de cargas, a capacitância deste capacitor é de 1,5 μF e esta medida é utilizada na fórmula para obtenção da carga elétrica Q gerada.

A diferença de potencial armazenada no capacitor, que é a tensão gerada pelos *buzzers* quando a compressão mecânica é de 1 kg, foi de 1,60 V. Assim, pela Equação 25, determinamos $d_{33} = 8,98 \text{ nC/N}$.

Os fabricantes de *buzzers* (Sinocera Piezotronic, INC, 2017) indicam que o material usado na sua construção são derivados do PZT5, porém sem especificá-los. Os PZT5s apresentam elevados valores de d_{33} , superiores as 500 pC/N, mas também se encontram valores ultra-altos de d_{33} , como o PZT-554, superiores a 810 pC/N. Esta característica revela que tais materiais possuem elevada capacidade de conversão. O resultado obtido neste trabalho é, aproximadamente, 11 vezes maior que o esperado para o PZT-554. Essa discrepância deve-se provavelmente a metodologia usada no ensaio realizado. A metodologia descrita por ARNOLD, 1995, ARNOLD, MÜHLEN, 2001, empregou uma máquina de ensaio de compressão para aplicação da tensão mecânica sobre as cerâmicas piezelétricas. Neste

trabalho, devido a dificuldades operacionais que comprometeram o isolamento elétrico do *buzzer*, a máquina de ensaio não foi utilizada. Optou-se pela colocação manual de peso sobre o *buzzer*, o qual deve ter gerado durante o contato forças superiores ao do peso utilizado para realização da pressão. Como o circuito eletrônico opera na detecção de picos de tensão elétrica, é possível que a força realizada seja superior àquela usada nos cálculos. Conclui-se, corroborado pelo resultado experimental e informações encontradas nas tabelas de fornecedores, que os *buzzers* comerciais são dispositivos apropriados para uso na geração de energia por efeito piezelétrico direto devido ao elevado valor de d_{33} .

4.3 Tempo de carregamento

De acordo com a metodologia citada no capítulo 3, foi realizada a montagem dos materiais piezelétricos na máquina de ensaio eletroeletrônica mecânica, ajustados os valores de pressão e frequências e conectada a saída da placa de circuito eletrônico explicada na seção 3.4. Os tempos obtidos são em relação ao necessário para que a saída produzisse 5 V. As Figuras 21 e 22 mostram os resultados.

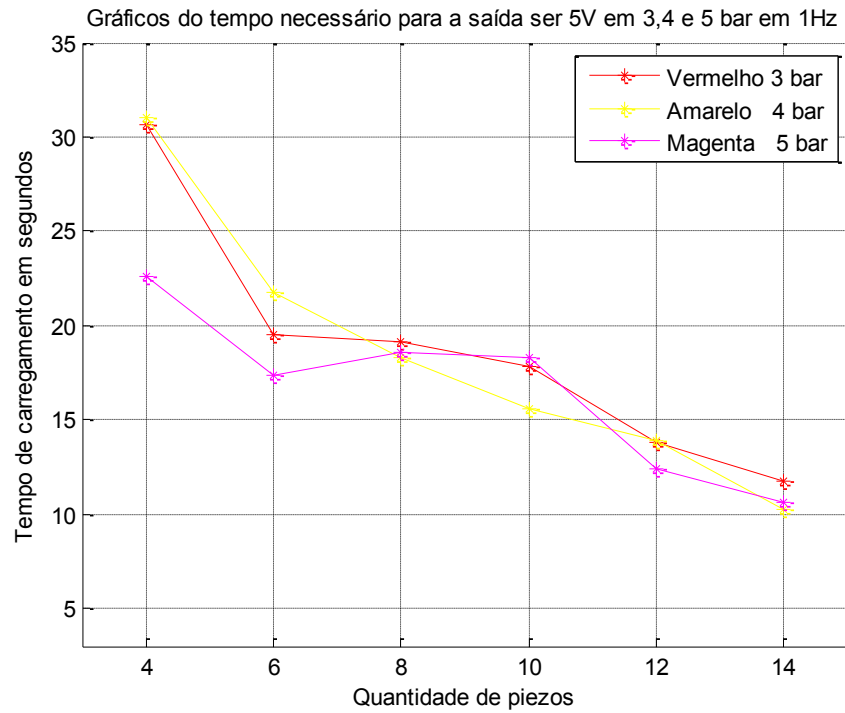
Na Tabela 3 são mostrados os valores das médias do tempo necessário, em segundos, a média é obtida por meio dos valores de cinco testes realizados, para a saída do circuito retificador e regulador de tensão fornecer 5 V. Também se encontram os valores numéricos de desvio padrão para cada média. As Figuras 21 a 28 mostram os tempos de carregamento em função da quantidade de *buzzers* utilizada.

Tabela 3 – Média do tempo necessário para geração de 5 V na saída para cada arranjo piezelétrico e desvio padrão.

| Quantidade de piezos | | Tempo (s) | |
|----------------------|----------------------|----------------------|-----|
| | | 1Hz | 2Hz |
| 4 Piezos | | | |
| 3 bar | (30,43 \pm 0,95) s | (12,43 \pm 0,38) s | |
| 4 bar | (31,00 \pm 0,73) s | (12,37 \pm 0,31) s | |
| 5 bar | (22,59 \pm 0,36) s | (13,06 \pm 0,50) s | |
| 6 Piezos | | | |
| 3 bar | (19,56 \pm 0,46) s | (9,51 \pm 0,74) s | |
| 4 bar | (19,71 \pm 0,60) s | (9,59 \pm 0,24) s | |
| 5 bar | (17,33 \pm 0,75) s | (10,08 \pm 0,43) s | |
| 8 Piezos | | | |
| 3 bar | (19,14 \pm 0,95) s | (7,11 \pm 0,45) s | |
| 4 bar | (18,32 \pm 1,34) s | (8,29 \pm 0,42) s | |
| 5 bar | (18,62 \pm 1,19) s | (9,41 \pm 0,11) s | |
| 10 Piezos | | | |
| 3 bar | (17,82 \pm 0,58) s | (6,39 \pm 0,26) s | |
| 4 bar | (15,56 \pm 1,15) s | (5,74 \pm 0,14) s | |
| 5 bar | (18,28 \pm 0,74) s | (6,03 \pm 0,18) s | |
| 12 Piezos | | | |
| 3 bar | (13,84 \pm 0,28) s | (6,39 \pm 0,74) s | |
| 4 bar | (13,93 \pm 0,88) s | (6,03 \pm 0,16) s | |
| 5 bar | (12,44 \pm 0,47) s | (8,85 \pm 0,60) s | |
| 14 Piezos | | | |
| 3 bar | (11,76 \pm 0,36) s | (4,84 \pm 0,24) s | |
| 4 bar | (10,25 \pm 0,64) s | (5,64 \pm 0,14) s | |
| 5 bar | (10,62 \pm 0,50) s | (6,34 \pm 0,24) s | |

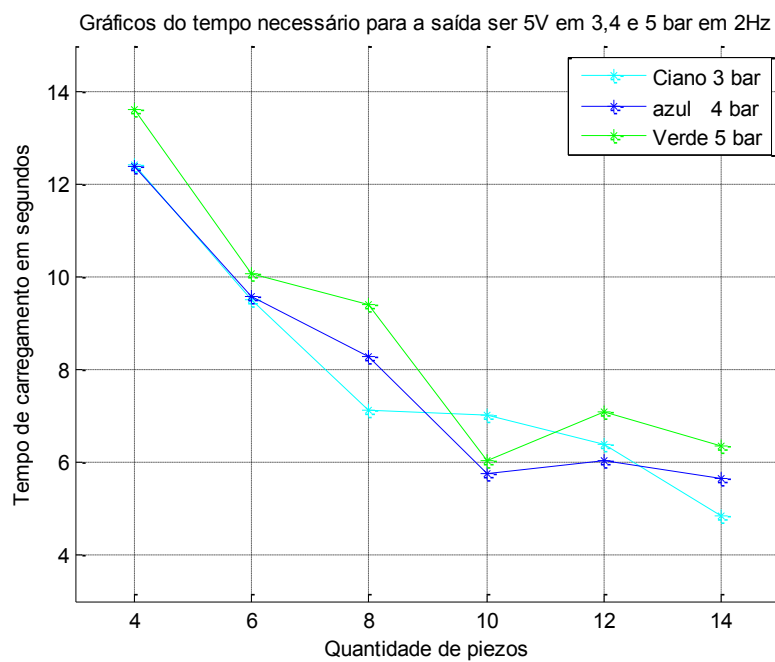
Fonte: O autor (2017)

Figura 21 – Tempo necessário para a saída ser 5 V em função da quantidade de piezos, pressão e 1 Hz



Fonte: O autor (2017)

Figura 22 - Tempo necessário para a saída ser 5 V em função da quantidade de piezos, pressão e 2 Hz



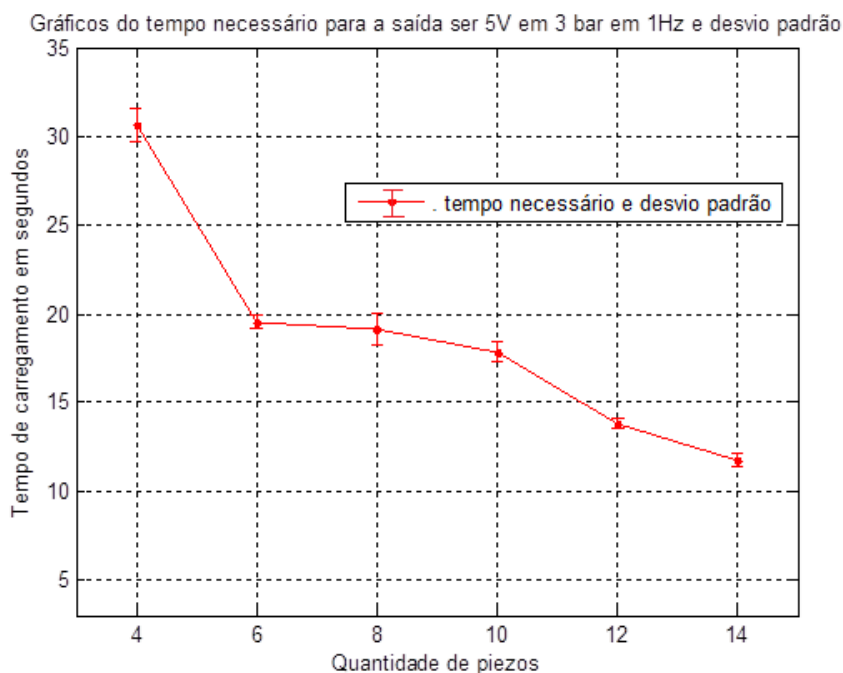
Fonte: O autor (2017)

Nas Figuras 21 e 22 são apresentados todos juntos os resultados das variações de quantidade de buzzers, pressão e frequência, desta forma é possível analisar de forma comparativa o que nas Figuras 23 a 28 são apresentados individualmente com o desvio padrão dos respectivos resultados.

Pode-se notar pelas Figuras 21 e 22 que a diminuição do tempo necessário para carregamento do capacitor ocasionando a geração de 5 V na saída é constante e inversamente proporcional à quantidade de cerâmicas piezelétricas utilizadas, ou seja, quanto mais piezos forem utilizados mais rápido ocorre o carregamento do capacitor e mais brevemente a saída atingirá os 5 V esperados. Isso ocorre porque quanto mais materiais piezelétricos forem adicionados maior a corrente elétrica gerada pelos mesmos, enquanto que a tensão é mantida constante uma vez que as cerâmicas piezelétricas são montadas eletricamente em paralelo.

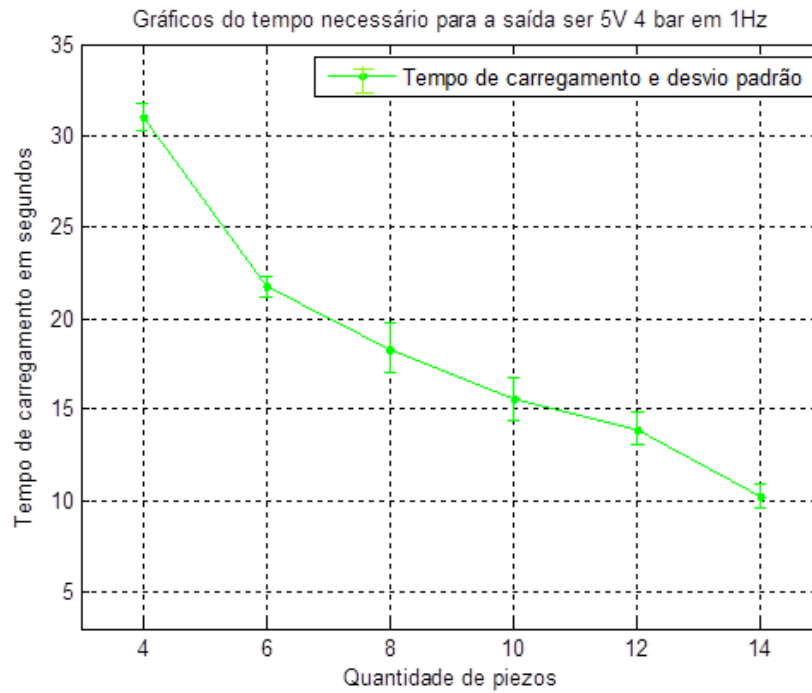
O maior decrescimento de tempo de carregamento ocorre entre os arranjos de 4 a 8 *buzzers*, não tendo tanta variação nos seguintes arranjos de 10, 12 e 14 *buzzers*. Nas Figuras 23 a 28 mostram os valores das medições com os arranjos de 4 a 14 piezelétricos, variando a pressão de 3 a 5 bar e a frequência variando de 1 Hz a 2 Hz. Nos gráficos também foram plotados os desvios padrão de cada média de testes realizados.

Figura 23 – Tempo para geração de 5 V, 3 bar e 1 Hz e desvio padrão



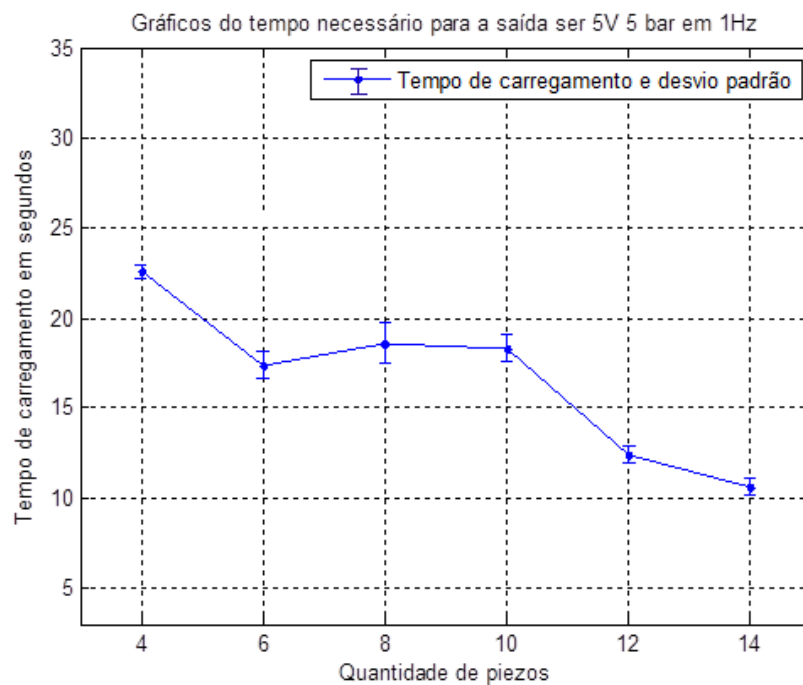
Fonte: O autor (2017)

Figura 24 – Tempo para geração de 5 V, 4 bar e 1 Hz e desvio padrão



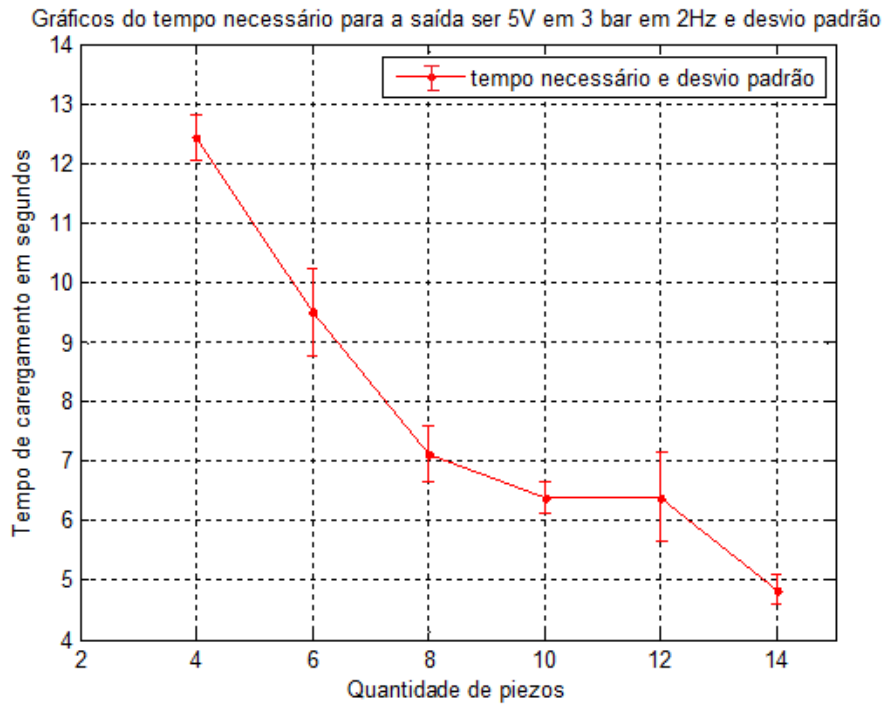
Fonte: O autor (2017)

Figura 25 – Tempo para geração de 5 V, 5 bar e 1 Hz e desvio padrão



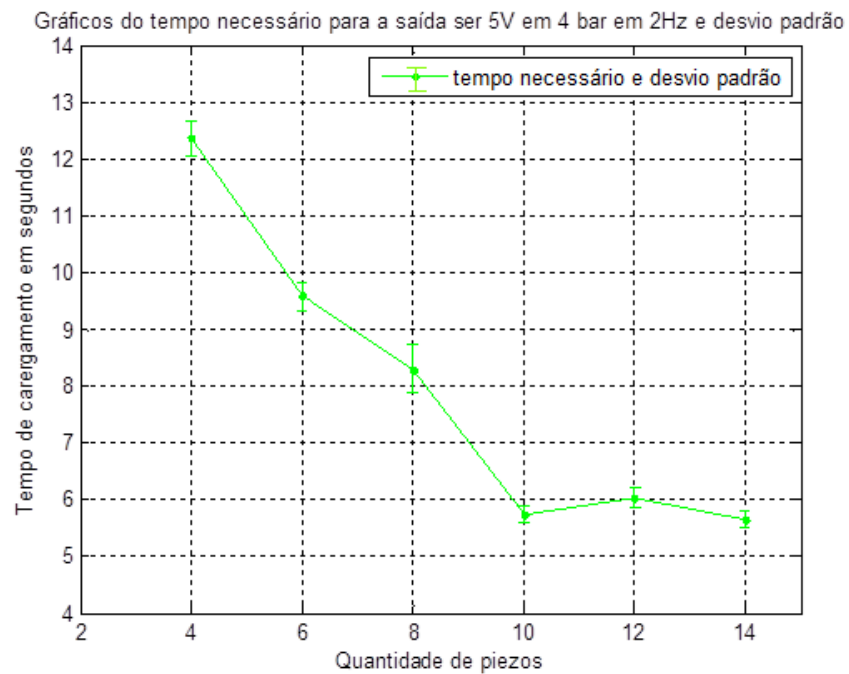
Fonte: O autor (2017)

Figura 26 – Tempo para geração de 5 V, 3 bar e 2 Hz e desvio padrão



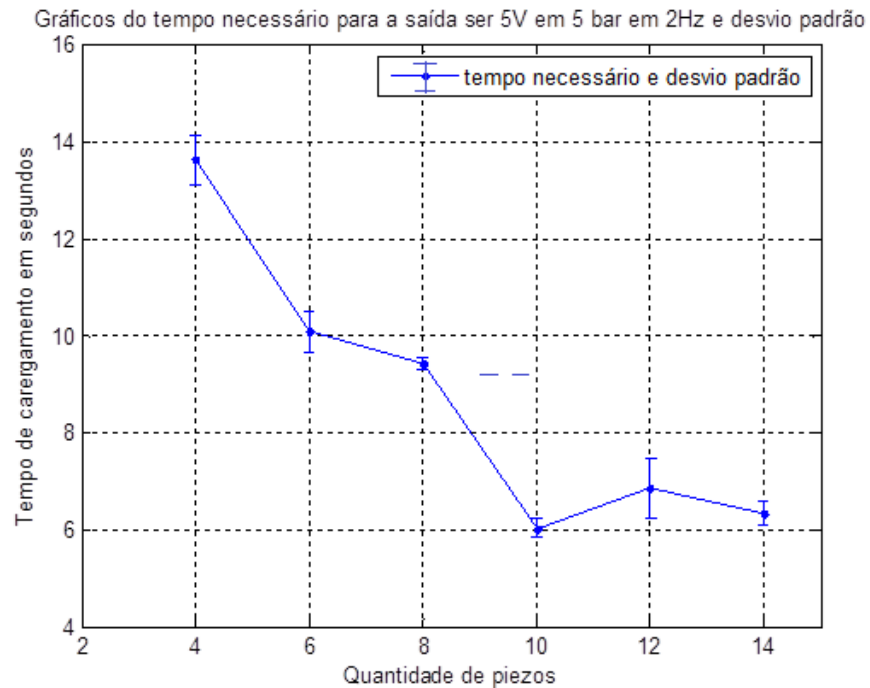
Fonte: O autor (2017)

Figura 27 – Tempo para geração de 5 V, 4 bar e 2 Hz e desvio padrão



Fonte: O autor (2017)

Figura 28 – Tempo para geração de 5 V, 5 bar e 2 Hz e desvio padrão



Fonte: O autor (2017)

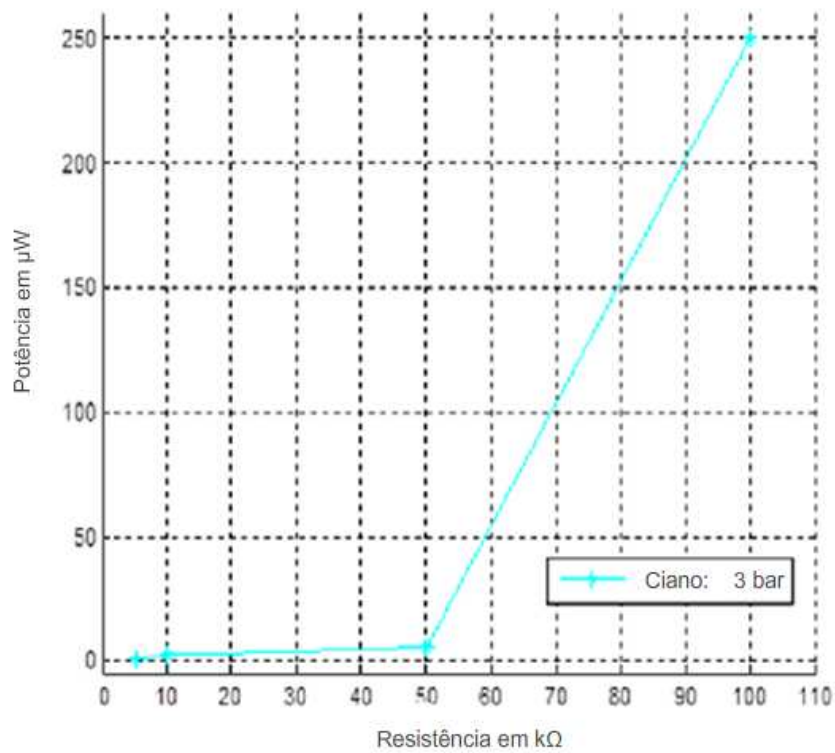
O teste que segue foi realizado somente variando as pressões, visto que em relação à quantidade de materiais piezelétricos utilizados nos arranjos e a frequência utilizada para emulação os valores estavam dentro do esperado, quanto à pressão somente com uma pequena variação na Figura 23 onde constata-se que a melhor resposta foi com pressão em 3 bar.

4.4 Potência fornecida na carga

Analisando por meio das Figuras 25 a 28 que a resposta mais satisfatória de geração de energia ocorre com o arranjo de 14 cerâmicas piezelétricas ligadas eletricamente em paralelo nas frequências de 2 Hz. Por conseguinte o teste de obtenção de potência na saída do circuito eletrônico concentra-se na geração de energia com arranjos de 14 cerâmicas, variando a pressão de 3,4 e 5 bar como estipulado anteriormente.

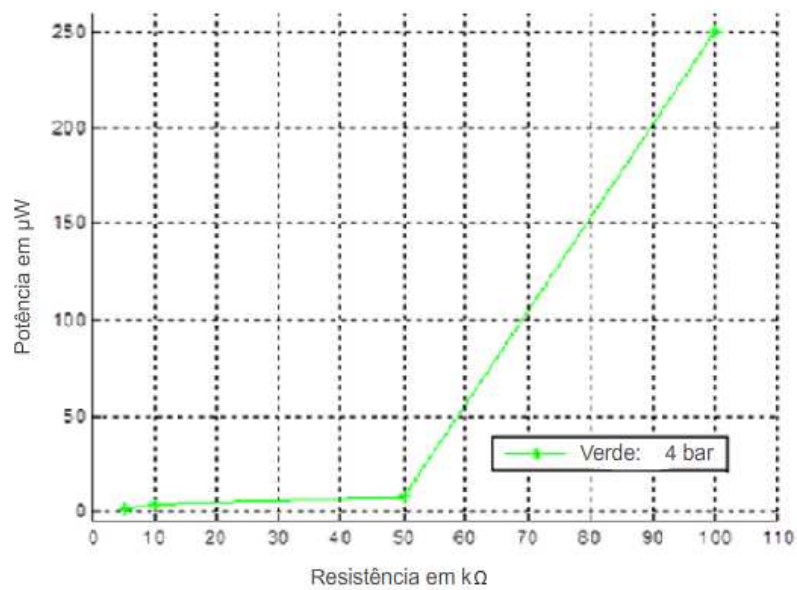
As Figuras 29, 30 e 31 apresentam as curvas das potências obtidas de acordo com medições na saída do circuito eletrônico. Os valores de potência são fornecidos no gráfico em μW e as cargas em $\text{k}\Omega$.

Figura 29 – Curva de potências geradas nas condições de 14 cerâmicas piezelétricas, 3 bar e 2 Hz.



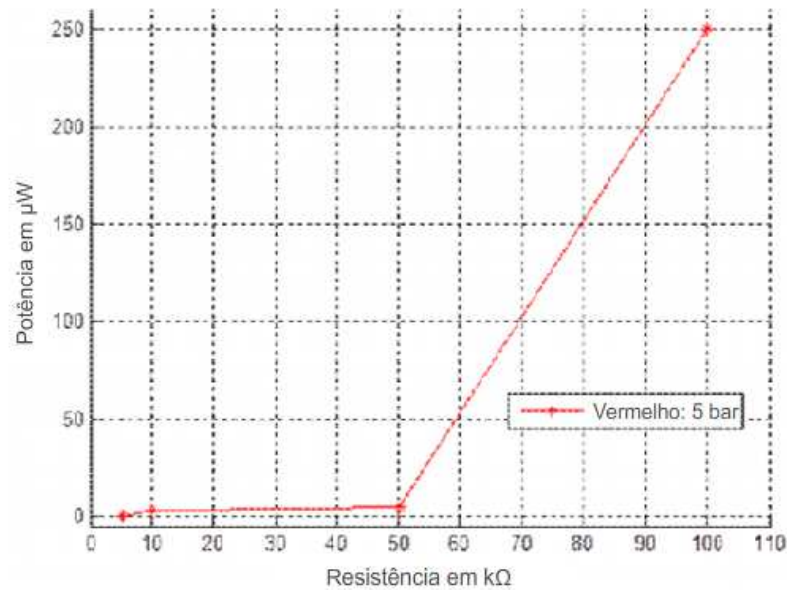
Fonte: O autor (2017)

Figura 30 – Curva de potências geradas nas condições de 14 cerâmicas piezelétricas, 4 bar e 2 Hz.



Fonte: O autor (2017)

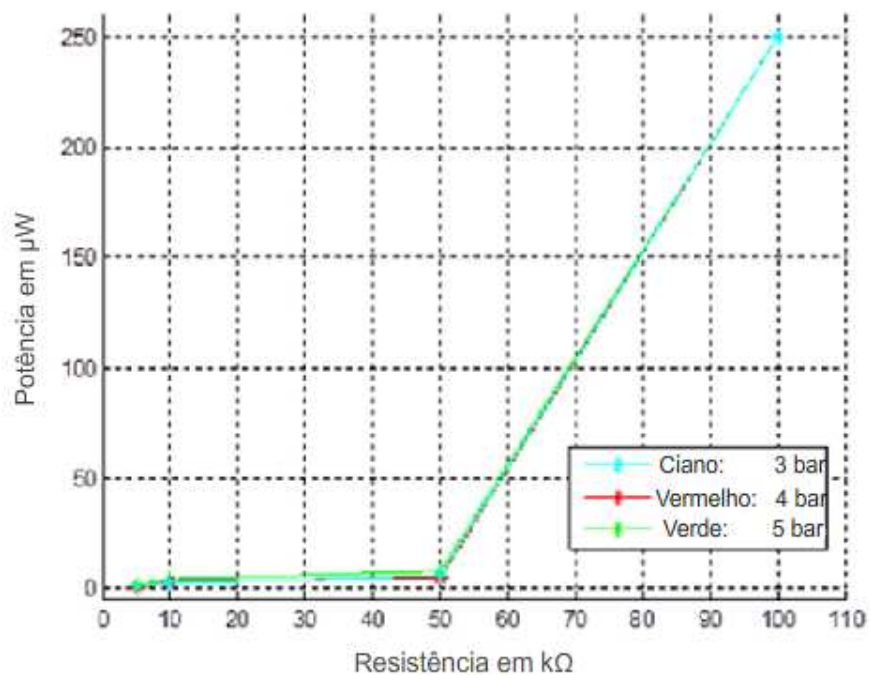
Figura 31 – Curva de potências geradas nas condições de 14 cerâmicas piezelétricas, 5 bar e 2 Hz



Fonte: O autor (2017)

Como forma comparativa e no intuito de clarificar as medições a Figura 32 esboça um comparativo entre as potências obtidas nas condições de 14 cerâmicas piezelétricas, 3, 4 e 5 e 2 Hz.

Figura 32 – Comparativo das potências geradas com cargas na saída variando de 5,1 $\text{k}\Omega$ a 100 $\text{k}\Omega$.



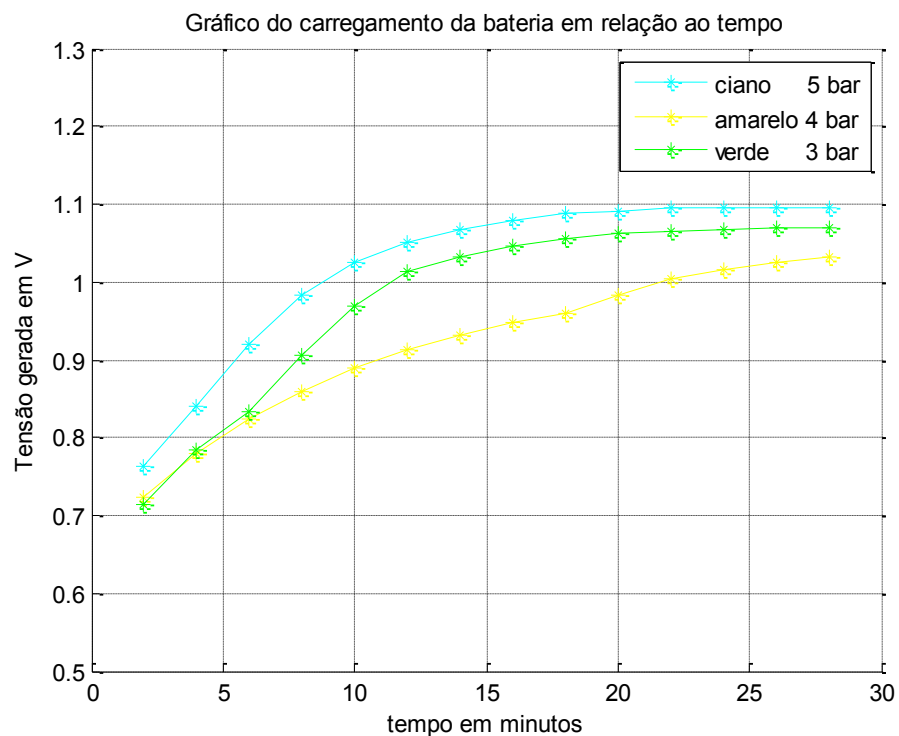
Fonte: O autor (2017)

A máxima geração de potência encontra-se com a carga de 100 k Ω , para ambas pressões realizadas nesta carga foi obtida a tensão máxima de saída, de 5 V, gerando assim potências de 250 μ W. Isso ocorre porque a carga de 100 k Ω se assemelha a um circuito aberto de forma que a tensão se mantenha toda sobre a resistência aplicada.

4.5 Carregamento de bateria

A Figura 33 exibe as curvas obtidas em relação ao tempo de carregamento (em minutos) versus a quantidade de tensão armazenada na bateria (em V). O carregamento começou quando a bateria estava carregada em 0,6 V, e foi mantido seu carregamento até aproximadamente 1,1 V para todos os três casos de variação de pressão.

Figura 33 - Carregamento da bateria de NiMh



Fonte: O autor (2016)

Na Figura 33, pode ser visualizado que principalmente a partir 1,05 V a armazenagem de energia vai se tornando mais lenta até cessar seu carregamento em aproximadamente 1,1 V. Três fatores podem ter influenciado no não carregamento total da bateria:

- Para a ocorrência do carregamento da bateria de forma manual não é utilizada nenhuma programação para monitoramento do fluxo de carga que será disponibilizada pelo arranjo piezelétrico ou ainda ser composto por fases de atuação de carregamento, como no caso de carregadores inteligentes. Após o maior carregamento da bateria ocorre uma lentidão no carregamento devido ao aumento da resistência interna da bateria e a diminuição do fornecimento da corrente, isto força que o carregamento não ocorra mais com a mesma intensidade do início do carregamento, ou seja, o carregamento se torna muito mais lento até alcançar a tensão normal da bateria 1,2 V.

- O não carregamento total da bateria por conta de sua vida útil, a bateria vai se degradando com as recargas até não chegar ao seu valor máximo de carregamento. Embora baterias NiMH possam carregar até aproximadamente 1000 ciclos é desconhecida a vida útil das baterias utilizadas em teste.

- Tempo de carregamento não foi suficiente para obter seu total carregamento. Segundo ZHAN et al (1999) baterias NiMH completam, em média, 60 % da capacidade de carregamento em aproximadamente 15 min e 100 % da sua capacidade em 1 hora.

CAPÍTULO 5

Conclusões

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões dos estudos realizados e perspectivas para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões e discussões finais

A caracterização, geração de energia, retificação, medição da potência e armazenamento de energia elétrica na bateria NiMH por meio de pressão realizada a *buzzers* piezelétricos foi investigada neste trabalho.

A caracterização das cerâmicas piezelétricas por meio da obtenção de suas frequências de ressonância, antirressonância e respectivas impedâncias permitiram que os arranjos piezelétricos estudados fossem montados com as cerâmicas mais semelhantes entre si. Os *buzzers* comerciais apresentam elevados valores de d_{33} , portanto são dispositivos que podem ser utilizados satisfatoriamente em dispositivos para geração de energia.

O dispositivo de coleta de energia que engloba a máquina de testes, o arranjo piezelétrico, o circuito eletrônico e a bateria se mostraram efetivos para a realização da coleta de energia provando a possibilidade de geração e armazenamento de energia por meio da utilização de *buzzers* piezelétricos como fonte geradora de energia (OGAWA et al. 2013; SANCHES, 2015)

Diferentes arranjos, com quantidade de materiais piezelétricos (*buzzers*) alteráveis, frequências e pressões variadas, foram elaborados para a realização das emulações. Observa-se nos resultados experimentais a notável melhora de resposta para maiores quantidades de materiais piezelétricos, bem como para pressões maiores e para a máxima frequência utilizada no teste. Conclui-se que para uma quantidade maior de materiais piezelétricos ocorre um decrescimento do tempo necessário para geração de energia e a saída prover 5 V bem como para o carregamento da bateria. Esta constatação de que para maiores quantidades de materiais piezelétricos, maior frequência de excitação e maior pressão também a resposta de saída é mais eficaz e o carregamento mais veloz também foi visualizada em SANCHES, 2015.

Para a análise do tempo necessário para geração de tensão na saída em

5 V, vemos que são necessários 7 segundos de pressão realizada no arranjo composto por 14 piezelétricos em uma frequência de 2 Hz e pressão de 5 bar. Enquanto que a potência máxima gerada nessas mesmas condições foi de 250 μ W em uma carga de saída de 100 k Ω .

As análises dos resultados experimentais para carregamento da bateria, o tempo necessário para carregamento de uma bateria, NiMH de 1,2 V e 750 mAh, de 0,6 V a 1,1 V é de aproximadamente 28 minutos, a uma frequência de 2 Hz, 5 bar e 14 piezelétricos. O tempo de carregamento verificado neste estudo ratifica e indica um melhor aproveitamento daquele qual atestado por Sodano et al. 2005, onde foi constatado a necessidade de algumas horas de frequências randômicas (0 - 1000 Hz) para o carregamento de uma bateria NiMH 1,2 V e 40 mAh.

Portanto de acordo com os testes realizados, e embasados pela literatura, existe o indicativo de que a utilização de cerâmicas piezelétricas em ambientes com agitações mecânicas, acoplados ao corpo humano ou até mesmo em calçados possa ser eficaz para geração de energia a equipamentos de baixo consumo, o que torna possível a utilização dos mesmos materiais e do circuito utilizado para carregamento de equipamentos eletrônicos de baixa alimentação mesmo quando excitados com baixas frequências (STARNER, 1996; SHENCK, 1999; ROCHA et al. 2010; OGAWA et al. 2013; SANCHES, 2015; KUANG et al. 2017).

5.2 Perspectivas para trabalhos futuros

Podem ser sugeridos futuros trabalhos para aperfeiçoamento deste e alocação para os arranjos piezelétricos estudados:

- Testes com quantidades maiores de cerâmicas piezelétricas com o intuito de diminuir o tempo de carregamento de baterias por meio de maior geração de corrente elétrica, otimizando a geração de energia fornecida pelos componentes piezelétricos;
- Adequação das cerâmicas piezelétricas no meio ambiente e análise de seu comportamento ao sofrer as interferências causadas;
- Alocação dos arranjos das cerâmicas piezelétricas do tipo *buzzer* no corpo humano, como por exemplo, em calçados objetivando um teste comparativo entre os resultados obtidos com a máquina de teste e em situações práticas.

Referências Bibliográficas

- ARNAU, A. *Piezoelectric Transducers and Applications* 2nd Edition, Springer, 2008. 319 p.
- ARNOLD, F. *O pré tensionamento mecânico em transdutores piezoelétricos*. 1995. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Unicamp Departamento de engenharia biomédica - Campinas, 1995.
- ARNOLD, F. J; MÜHLEN, S. S. (2001); The resonance frequencies on mechanical pre-stressed ultrasonic piezotransducer, *Ultrasonics (Guildford)*, v. 39, p. 7-11, 2001.
- BERLIN COURT, D.A; CURRAN, D.R; JAFFE, H. *Physical Acoustics*, v. 1, Part A, Ch. 3., W.P. Mason. Academic Press, New York, 1964.
- Face ® internacional Corporation – Thunder ® White Paper. Disponível em: <<http://www.thunderandlightningpiezos.com/docs/whtpaper.pdf>> Acesso em: 25 Setembro, 2015.
- IEEE Standard on Piezoelectricity. Standards Committee of the IEEE Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control Society. NY, USA. 74 p. 1988.
- KATZIR, S. The Discovery of the Piezoelectric Effect. *Archive for History of Exact Sciences*. v. 57,p.61-91. Jan, 2003.
- KIMURA MITSUTERU, Ricoh Seiki Company, Ltd. Mitsuteru Kimura. Piezo-electricity generation device. US5801475 A. US 08/812,070, 6 MAR. 1997, 1 set. 1998.
- KINSLER, L. E; FREY, A. R; COPPENS, A. B; SANDERS, J. V. *Fundamentals of Acoustics*. 4th Edition. New York. John Wiley & Sons, 568 p. 2000.
- KUANG, Y; RUAN, T; CHEW, Z. J; ZHU, M. Energy harvesting during human walking to power a wireless sensor node. *Sensors and Actuators A: Physical*. Elsevier. v. 254. p. 69-77. Fev. 2017.
- KYMISSIS, J; KENDALL, C; PARADISO, J; GERSHENFELD, N. Parasitic Power Harvesting in Shoes. In: *Digest of Papers. Second International Symposium on Wearable Computers*. Pittsburgh, PA, USA. 1998

LEO, D. J. *Engineering analysis of Smart material systems*. 1st Edition :John Wiley & Sons, 576 p. 2007.

MORAWETZ, H. *Polymers: The Origins and Growth of a Science*. John Wiley & Sons, 306 p. 1995.

MURATA. Piezoelectric sound components. Murata Manufacturing, 2012. Disponível em:

<<http://www.murata.com/~media/webrenewal/support/library/catalog/products/sound/p37e.ashx>> Acesso em: 21 Outubro de 2016.

OGAWA, T; SUGISAWA, R; SAKURADA, Y; AOSHIMA, H; MASAHIITO, H; AKAISHI, H. Energy Harvesting Devices Utilizing Resonance Vibration of Piezoelectric Buzzer. *Japanese Journal of Applied Physics*. v. 52 article id. 09KD14 2013.

RAMADAN, Khaled, S; SAMEOTO, D; EVOY, S. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers. *IOP Science*. Smart Materials and Structures 23. 26 p. 2014.

ROCHA, J; GONÇALVES, L; ROCHA, P; SILVA, M; LANCEROS, S. Energy Harvesting from Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 57, n° 3. p. 813 – 819. Mar 2010.

SAAD, F. O que são polímeros eletroativos. *Manutenção & Suprimentos*, 2012. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/6342-o-que-sao-polimeros-eletroativos/>> Acesso em: 04, Julho de 2017.

SADIKU, M. N. O. *Elementos de Eletromagnetismo*. 5ª Edição, Bookman. 2012. Parte 2, cap 5. 716 p. 2012.

SANCHES, F. M. *Sistema de geração e armazenamento de energia elétrica utilizando transdutor piezelétrico na forma pulsada*, 2015. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia elétrica) – Unesp, Ilha Solteira, 2015.

SAFARI, A; AKDOGAN, K. *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*. NY, USA Springer. 2008. 482 p.

SINOCERA PIEZOTRONIC, INC – Piezoelectric Ceramics. Disponível em: <http://en.china-yec.com/products_detail2/productId=79.html> Acesso em: 27 Julho, 2017.

SHENCK, N. *A Demonstration of Useful Electric Energy Generation from Piezoceramic in a Shoe*, 1999. 137 f. Dissertação (Requirements for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering). United States Naval Academy, MIT. May, 1999.

STARNER, T. Human-powered wearable computing. *IBM Systems Journal*, v.35, NOS 3&4, 12 p. 1996.

SODANO, H; INMAN, D; PARK, G. A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials. *The Shock and Vibration Digest*, 2004. v. 36. N°3. 197-205 p. May, 2004.

SODANO, H; INMAN, D; PARK, G. Generation and Storage of Electricity from Power Harvesting Devices. *Journal of intelligent material systems and structures*. v. 16, issue 1. Jan, 2005

SODANO, H; INMAN, D; PARK, G. Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries.. *Center for Intelligent Material Systems and Structures*. v. 16, issue 10. Oct, 2005.

UMEDA, M; NAKAMURA, K; UEHA, S. Energy Storage Characteristics of a Piezo-Generator using Impact Induced Vibration. *Japanese Journal of Applied Physics*. v. 36. Part. 1. Number. 5B, 1997.

VIJAYA, M. S. *Piezoelectric Material and Devices: Applications in Engineering and Medical Sciences*. Boca Raton, FL: CRC. 186 p. 2013.

WERK-SCHOTT Pneumática – Cilindros Pneumáticos. Catálogo 0102-16BR – Maio 2015.

YANG, J; ZHOU, H; HU, Y; JIANG, Q. Performance of a piezoelectric harvester in thickness-stretch mode of a plate. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and frequency control*. v. 52. Issue 10. p. 1872 - 1876 Oct, 2005.

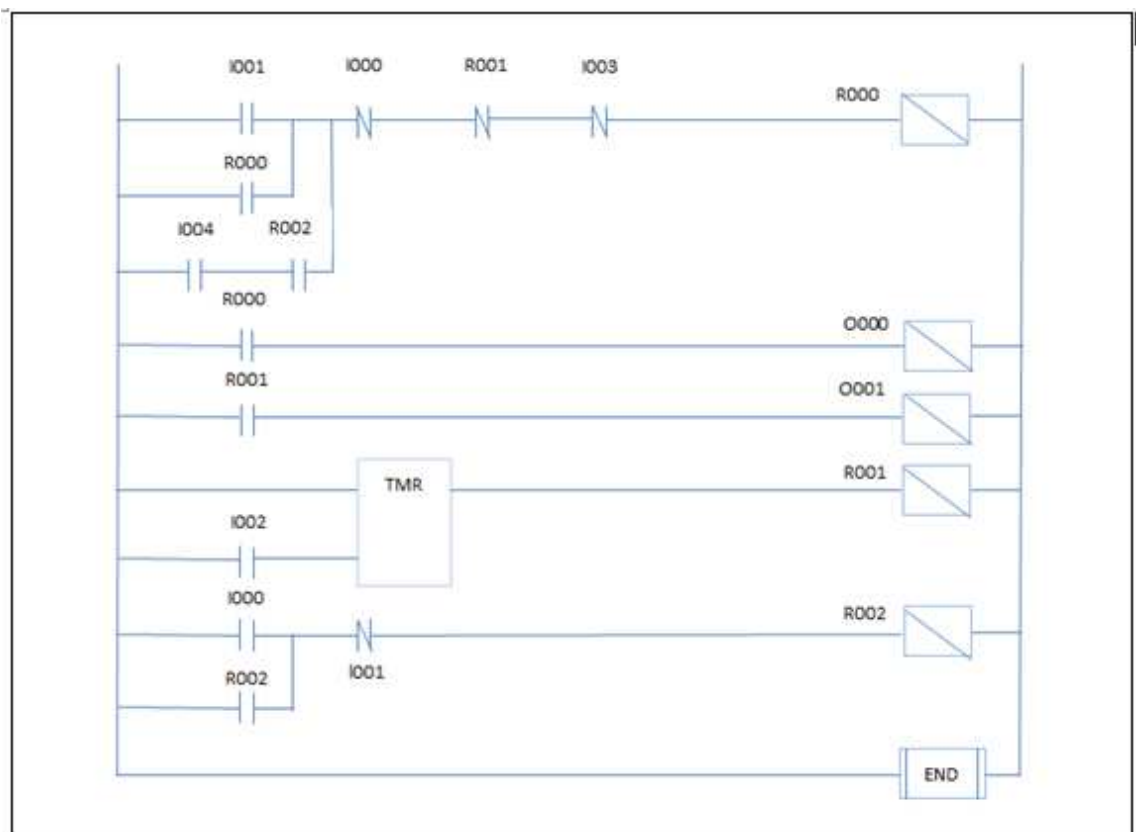
ZHAN, F; JIANG, L.J; WU, B.R; XIA, X. Y; WEI, G.R; Q. Characteristics of Ni/MH power batteries and its application to electric vehicles. *Journal of Alloys and Compounds*. v. 293 – 295. p. 804-808. 20 Dec, 1999.

Apêndice A - Programação Ladder

A linguagem Ladder é uma linguagem desenvolvida para CLPs (controladores lógicos programáveis) que em suma emprega linhas e bobinas com o intuito de compor circuitos lógicos. A lógica da linguagem consiste em seguir uma espécie de escada, ao qual a cada passo ou lógica de controle é dado o nome de degrau, sendo que essas lógicas de controle são escritas em linhas e colunas na vertical, compondo assim a escada lógica da linguagem. A representação dos componentes e interface da área da linguagem varia de acordo com a fabricação do CLP, mas de forma geral a leitura da programação deve ser realizada da esquerda para a direita (da linha energizada para o neutro), e de cima para baixo, start do programa até o end.

O código do programa é visualizado na Figura 34 e uma breve explicação do programa é realizada a seguir para maior entendimento do funcionamento do pistão orientado pelo CLP.

Figura 34 – Código do programa em linguagem Ladder e sua explicação



I001: Botão start que energiza o sistema;

R000: Funciona como um contato selo mantendo a saída R000 funcionando. A saída R000 é entendida como o painel pneumático como um todo, sendo mantido ligado quando todas as chaves se encontram fechadas permitindo acesso da energia até R000;

I004: Sensor do pistão retornado, quando o pistão retorna à posição inicial; é por meio desta linha de código que o circuito continua o ciclo, de forma que o sistema só pare quando R002 é pressionado.

R002: Responsável por fazer o sistema parar quando está rodando automático;

I000: Atuador stop manual do circuito quando regime contínuo;

R000: Quando energizado alimenta o pistão no movimento de descida que é nomeado como O000;

R001: Só retorna ao sensor para a posição inicial depois de ter passado pelo Timer que é previamente setado no tempo escolhido;

Timer (TMR): Se encontra alimentado pelo sensor I002 que é o sensor de avanço, quando o sensor avança o timer é alimentado e ligado;

I003: São os sensores da porta de segurança, quando as portas estão devidamente fechadas I003 funciona como um circuito fechado permitindo a energização do circuito;

Fonte: O autor (2016)