

FABRICIO MARQUI SANCHES

**SISTEMA DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
ELÉTRICA UTILIZANDO TRANSDUTOR PIEZELÉTRICO NA
FORMA PULSADA**

FABRICIO MARQUI SANCHES

**SISTEMA DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
ELÉTRICA UTILIZANDO TRANSDUTOR PIEZELÉTRICO NA
FORMA PULSADA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP - Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação.

Orientador: Prof. Dr. Nobuo Oki

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S211s Sanches, Fabricio Marqui.
Sistema de geração e armazenamento de energia elétrica utilizando
transdutor piezelétrico na forma pulsada / Fabricio Marqui Sanches. -- Ilha
Solteira: [s.n.], 2015
75 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2015

Orientador: Nobuo Oki
Inclui bibliografia

1. Power Harvesting. 2. Materiais piezelétricos. 3. Buzzer piezelétrico na
forma pulsada. 4. Conversor Boost.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Sistema de Geração e Armazenamento de Energia usando Transdutor Piezelétrico na Forma Pulsada

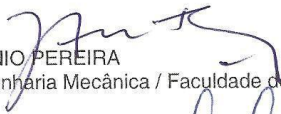
AUTOR: FABRÍCIO MARQUI SANCHES

ORIENTADOR: Prof. Dr. NOBUO OKI

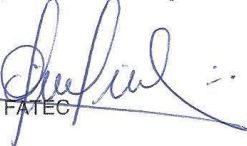
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. NOBUO OKI

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JOAO ANTONIO PEREIRA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. GIULIANO PIERRE ESTEVAM

Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, FATEC

Data da realização: 11 de dezembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela graça de poder concluir este trabalho, finalizando mais uma importante etapa em minha vida. Confortando-me nos momentos difíceis que pensei em desistir por inúmeros motivos.

Ao meu orientador, Professor Dr. Nobuo Oki pela orientação prestada.

A meu irmão Fabio e minha mãe Simonete, por sempre me darem força e serem o motivo principal pelo qual finalizei este trabalho.

Agradeço aos técnicos do Departamento de Engenharia Elétrica da FEIS, Adércio, Chaves, Everaldo e Massa pela grande ajuda prestada.

Agradeço ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia – Campus de Presidente Epitácio – SP em nome do diretor geral Italo Montório Júnior pela possibilidade em utilizar os laboratórios e equipamentos para realização dos testes.

Aos colegas Fernando de Souza Cruz, Ronaldo dos Santos Pereira, Andryos da Silva Lemes (vulgo Ursão) pelos momentos que passamos e que ficaram marcados para sempre em minha memória. E aos que aqui não se encontram citados e que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

RESUMO

Neste trabalho é investigada a viabilidade energética do emprego de *buzzers* piezelétricos, circuito retificador de onda completa e conversor DC-DC elevador em um sistemas de *power harvesting* submetido a esforços mecânicos causados pelo tráfego de veículos e/ou caminhar de pedestres, demonstrando a possibilidade de reutilização dessa energia no carregamento de baterias para alimentação de circuitos autônomos de monitoramento, indicação, iluminação, etc., em locais remotos, eliminando ou estendendo os intervalos necessário entre as recargas desses dispositivos. O gerador piezelétrico é analisado mediante a excitação realizada por um cilindro pneumático simulador de impactos controlado eletronicamente com frequência de 0,5 Hz e 1 Hz, contendo diferentes quantidades de PZTs (2, 4 e 8) e configuração de ligação (série ou paralelo). Os resultados extraídos são referentes à tensão elétrica, corrente, potência e energia armazenada em função do tempo, sendo ainda feitas relações dessas grandezas com diferentes números de PZTs, área que ocupam, força e pressão aplicada sobre os mesmos. Ao final pode-se concluir a viabilidade da utilização de dispositivos simples em sistemas de *power harvesting* para geração de energia através de excitações na forma pulsada e em baixas frequências, sendo os maiores valores na saída do circuito em termos de potência e corrente para tensão de 5 volts, 108 μW e 21,5 μA (0,53 Kg e 0,83 N/cm^2), bem como 118,8 μW e 23,6 μA para (2,13 Kg e 3,33 N/cm^2), obtidos com 8 PZTs, conectados em paralelo e excitados a 1 Hz.

Palavras-chaves: *Power Harvesting*. Materiais piezelétricos. *Buzzer* piezelétrico na forma pulsada. Conversor *boost*.

ABSTRACT

This paper investigated the energy viability of the use of piezoelectric buzzers, rectifier circuit full-wave and DC-DC-converter in a power harvesting systems subjected to mechanical stress caused by the traffic of vehicles and / or walk for pedestrians, demonstrating the possibility of re-use of energy in charging batteries to power autonomous monitoring circuits, display, illumination, etc., in remote locations, eliminating or extending the intervals needed between charges these devices. The piezoelectric generator is analyzed through excitation carried out by a pneumatic cylinder simulator electronically controlled impacts with a frequency of 0.5 Hz and 1 Hz, containing different amounts of PZTs (2, 4, 8) and connection configuration (parallel or serial) . The extracted results are related to the voltage, current, power and energy stored in function of time, still being made relations of these quantities for the number of PZTs, area they occupy, force and pressure applied on them. At the end we can conclude the feasibility of using simple devices in power harvesting systems to generate energy through excitations in pulsed manner and at low frequencies, with higher values in the circuit output in terms of power and current to voltage 5 volts, 108 μW and 21,5 μA (0,53 Kg and 0,83 N/cm^2), just like 118,8 μW and 23,6 μA to (2,13 Kg e 3,33 N/cm^2), obtained with 8 PZTs, connected in parallel and excited to 1 Hz.

Key-words: Power Harvesting. Piezoelectric materials. Piezoelectric buzzer in pulsed operation. Boost converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de blocos simplificado de um sistema de <i>power harvesting</i>	16
Figura 2 - Representação visual do acoplamento entre os domínios físicos	25
Figura 3 - Estrutura Perovskita. a) Material centrossimétrico, b) Material não centrossimétrico.....	26
Figura 4 - Dipolos elétricos que conduzem o acoplamento eletromecânico em materiais piezelétricos.....	27
Figura 5 - Forma de polarização do elemento piezelétrico	27
Figura 6 - Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezelétrico	28
Figura 7 - Representação tensão/deformação para um material elástico.....	28
Figura 8 - Efeito piezelétrico direto e relação entre tensão e deslocamento elétrico com um material piezelétrico	29
Figura 9 - (a) Efeito piezelétrico indireto; (b) Relação entre campo elétrico aplicado e deslocamento elétrico em um material piezelétrico	30
Figura 10 - (a) Rotação dos dipolos; (b) Relação entre campo elétrico e deformação em um material piezelétrico	31
Figura 11 - Cubo piezelétrico indicando os eixos coordenados da análise tridimensional	32
Figura 12 - Modos de operação do elemento piezelétrico: (a) 33; (b) 31	36
Figura 13 - Curva de histerese de um ponto de vista cristalográfico (estrutura cristalina perovskita).....	37
Figura 14 - Subdivisões dos materiais piezelétricos “duros” e “macios” de acordo com a norma americana DOD-STD-1376A (SH).....	38
Figura 15 - Diagrama de um gerador piezelétrico	43
Figura 16 - Estrutura do diafragma piezelétrico	44
Figura 17 - Base do dispositivo eletropneumático com PZTs colados sobre superfície de borracha	45
Figura 18 - Circuito de aquisição da intensidade de força aplicada sobre os PZTs	46
Figura 19 - Esquemático do circuito de aquisição da carga aplicada sobre os PZTs.....	47
Figura 20 - Layout completo dos equipamentos, circuitos e dispositivo utilizados.....	48
Figura 21 - Esquemático do circuito temporizador de controle	49
Figura 22 - Resposta do circuito de controle da eletroválvula para 0,5 Hz.....	49
Figura 23 - Resposta do circuito de controle da eletroválvula para 1 Hz.....	50
Figura 24 – Representação básica de um conversor DC-DC elevador (<i>boost</i>)	50

Figura 25 - Representação do gerador piezelétrico conectado ao retificador e conversor DC-DC.....	51
Figura 26 - Representação do gerador piezelétrico conectado ao retificador de onda completa	53
Figura 27 - Sinal adquirido com o circuito de aquisição de dados para 0,53 Kg (5,22 Newtons)	53
Figura 28 - Respostas de 2 PZTs em série excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	54
Figura 29 - Respostas de 2 PZTs em série excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	54
Figura 30 - Respostas de 2 PZTs em paralelo excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	55
Figura 31 - Respostas de 2 PZTs em paralelo excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	55
Figura 32 - Respostas de 4 PZTs em série excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	56
Figura 33 - Respostas de 4 PZTs em série excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	56
Figura 34 - Respostas de 4 PZTs em paralelo excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	56
Figura 35 - Respostas de 4 PZTs em paralelo excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	57
Figura 36 - Respostas de 8 PZTs em série excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	57
Figura 37 - Respostas de 8 PZTs em série excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	57
Figura 38 - Respostas de 8 PZTs em paralelo excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	58
Figura 39 - Respostas de 8 PZTs em paralelo excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador	58
Figura 40 – Gráfico dos valores máximos de tensão para mesma carga em função do numero de PZTs.....	59
Figura 41 – Gráfico dos valores máximos de corrente para mesma carga em função do numero de PZTs.....	59

Figura 42 – Gráfico dos valores máximos de potência para mesma carga em função do numero de PZTs	59
Figura 43 – Gráfico dos valores máximos de energia para mesma carga em função do numero de PZTs.....	60
Figura 44 – Gráfico da relação potência/nº PZTs carga para mesma carga em função do numero de PZTs	61
Figura 45 – Gráfico da relação potência/área para mesma carga em função do numero de PZTs	62
Figura 46 – Gráfico da relação potência/pressão para mesma carga em função do numero de PZTs	62
Figura 47 - Sinal adquirido com o circuito de aquisição de dados para 1,07 Kg (10,45 Newtons).....	64
Figura 48 - Sinal adquirido com o circuito de aquisição de dados para 2,13 Kg (20,98 Newtons).....	64
Figura 49 – Gráfico dos valores máximos de tensão para mesma pressão em função do numero de PZTs	65
Figura 50 – Gráfico dos valores máximos de corrente para mesma pressão em função do numero de PZTs	65
Figura 51 – Gráfico dos valores máximos de potência para mesma pressão em função do numero de PZTs	66
Figura 52 – Gráfico dos valores máximos de energia para mesma pressão em função do numero de PZTs	66
Figura 53 – Gráfico da relação potência/nº PZTs para mesma pressão em função do numero de PZTs.....	67
Figura 54 – Gráfico da relação potência/área para mesma pressão em função do numero de PZTs	68
Figura 55 – Gráfico da relação potência/carga para mesma pressão em função do numero de PZTs	68
Figura 56 - Circuito completo de extração da energia elétrica.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de domínios físicos e variáveis de estado associadas.....	24
Tabela 2 - Equivalência baseada na norma americana DOD-STD-1376A (SH)	40
Tabela 3 - Limites de tração para alguns materiais piezelétricos	41
Tabela 4 - Principais materiais piezelétricos e seus respectivos valores constantes	42
Tabela 5 - Principais características do buzzer piezelétrico PZT-5A.....	45
Tabela 6 - Valores máximos de tensão, carga, potência e energia acumulada no capacitor para um tempo de carga igual a 5 minutos	60
Tabela 7 - Valores máximos de tensão, corrente e potência em função da área e da pressão..	61
Tabela 8 - Valores máximos de tensão, carga, potência e energia acumulada no capacitor para um tempo de carga igual a 5 minutos	66
Tabela 9 - Valores máximos de tensão, potência e energia acumulada em função da área e pressão.	67
Tabela 10 - Valores máximos encontrados no circuito de extração de energia elétrica.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC/DC	Corrente alternada/Corrente continua
BJT	Transistor de junção bipolar
<i>Boost</i>	Elevador
CA	Corrente alternada
CC	Corrente continua
DC	Tensão continua
DC-DC	Tensão continua - tensão continua
FEIS	Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada.
MOSFET	Transistor de efeito de campo metal - óxido - semiconductor
off	Nível lógico “desligado”
on	Nível lógico “Ligado”
PFC	Compostos piezocerâmicos de fibra (<i>Macro Fiber Composite</i>)
Pot	Potenciômetro
PSI	Unidade de pressão “libra-força/polegada ao quadrado”
PVDF	Fluoreto de polivinilideno (<i>Poly-Vinilidene Fluoride</i>)
PZT	Titanato-zirconato de chumbo (<i>Lead Titanate Zirconate</i>)
Rv	Resistor variável
RMS	Valor quadrático médio (<i>root mean square</i>) ou Valor eficaz
SHM	Monitoramento da integridade estrutural (<i>Structural Health Monitoring</i>)
SMD	Tecnologia de montagem superficial

LISTA DE SÍMBOLOS

L	Indutância do indutor
V_o	Tensão de saída
T	Tensão mecânica aplicada (N/m^2)
S	Deformação mecânica (m/m)
Y	Módulo de elasticidade do material (ou módulo de Young) (N/m^2)
s	Complância mecânica do material (m^2/N)
D	Deslocamento elétrico (C/m^2)
d	Coeficiente de proporcionalidade (C/N)
E	Campo elétrico (V/m)
ϵ	Permissividade dielétrica (F/m)
d	Coeficiente de deformação piezoeletrico (m/V)
$\mathbf{S}$	Vetor 6x1 de deformação
$\mathbf{T}$	Vetor 6x1 de tensão mecânica
$\mathbf{D}$	Vetor 3x1 de deslocamento elétrico
$\mathbf{E}$	Vetor 3x1 de e campo elétrico
$\mathbf{s}$	Matriz 6x6 das compliança mecânica
ϵ	Matriz 3x3 das constantes dielétricas do material piezoeletrico permissividade dielétrica)
$\mathbf{d}$	Matriz 3x6 dos coeficientes de deformação piezoeletrico
$()^E$	Valores medidos para um campo elétrico constante
$()^T$	Valores medidos para tensão constante
$()'$	Transposto
$Y_i^E \ i=1,2 \text{ e } 3$	Módulo extensional (longitudinal) na direção i (módulo de Young)
G^E	Módulo de cisalhamento
ν_{ij}	Coeficiente de Poisson (transversal na direção j com tensão axial na direção i)
K	Coeficiente de acoplamento eletromecânico
$t_g(\delta)$	Fator de dissipação dielétrica (perdas dielétricas do material)
Q	Fator de qualidade
TC	Temperatura de Curie
N	Constantes de frequência
N_m	Constantes de frequência (modo planar)

N_t	Constantes de frequência (modo espessura)
g	Constante de tensão piezelétrica (Vmm/N)
V_{co}	Tensão máxima em circuito aberto
I_{cc}	Corrente de curto circuito
ρ	Densidade (Kg/m ³)
$K_3^T - \epsilon_{33}^s / \epsilon_0$	Constante dielétrica relativa (Vmm/N)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Revisão bibliográfica	17
1.2 Objetivos.....	22
1.3 Organização do trabalho	22
2 CONCEITOS DE PIEZELETRICIDADE PARA <i>ENERGY HARVESTING</i>	24
2.1 Efeito Piezelétrico.....	24
2.1.1 Efeito piezelétrico direto	28
2.1.2 Efeito piezelétrico indireto	30
2.2 Equações Constitutivas para um Material Piezelétrico Linear	31
2.3 Modos de operação do dispositivo piezelétrico.....	35
2.3.1 Modo de operação "33" de um dispositivo piezelétrico	36
2.4 Classificação dos principais materiais piezelétricos comerciais	37
2.4.1 Algumas limitações dos materiais piezelétricos	40
2.5 Desempenho do gerador	42
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	44
3.1 Gerador piezelétrico	44
3.2 Esforço mecânico aplicado	46
3.3 Dispositivo eletropneumático	47
3.4 Circuito de extração.....	50
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	52
4.1 Circuito retificador de onda completa	52
4.1.1 Resultados com mesma intensidade de carga (0,53 Kg)	53
4.1.2 Resultados com pressão constante (3,33 N/cm ²).....	63
4.2 Circuito retificador de onda completa e conversor DC-DC	69
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
5.1 Conclusões.....	71
5.2 Trabalhos futuros.....	72
REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento no cenário atual pelo interesse em sustentabilidade energética a busca por fontes alternativas de energia vêm ganhando importância. Vários estudos vêm sendo desenvolvidos na atualidade na área de conversão de energia oriunda do meio ambiente (solar, térmica, eólica, cinética, vibração, eletromagnética, etc) em energia elétrica, contudo ainda são utilizadas em pequenas quantidades. Essa técnica de coleta e armazenamento desses tipos de energias são conhecidas na literatura como *energy harvesting* ou *power harvesting* (ANTON et al., 2007). Sendo os equipamentos destinados a esse fim chamados de “*harvesters*” ou “colhedores”, caracterizados por converter, armazenar e/ou redirecionar a energia coletada para outras aplicações.

Dentre as várias áreas de pesquisa dos sistemas de geração e armazenamento de energia elétrica a partir de fontes renováveis alternativas, a energia proveniente de deformações estruturais em diferentes áreas como construção civil, sistemas mecânicos, eletromecânicos dentre outras, vem ganhando cada vez mais espaço. Tendo assumido um importante papel, principalmente devido à utilização dos materiais piezelétricos por possuírem a grande capacidade de gerar eletricidade ao serem deformados (ANTON; SODANO, 2007).

O drástico aumento nos últimos anos em sistemas de *power harvesting* para reaproveitamento da energia proveniente de deformações utilizando materiais piezelétricos se justificam pelo desenvolvimento de circuitos eletrônicos cada vez menores, implicando na diminuição do consumo de energia e consequentemente do dispositivo de alimentação (principalmente baterias), já que os materiais piezelétricos não fornecem grandes quantidade de energia, sendo imprescindível o aproveitamento do máximo da energia convertida (DUTOIT, 2005). As pesquisas nesta área são feitas utilizando circuitos eletrônicos sempre com o objetivo de extrair a maior potência possível dos geradores piezelétricos (estrutura com piezelétrico acoplado).

Seguindo este ideal, o estudo de *power harvesting* para deformações mecânicas apresentam algumas vertentes estudadas pelos pesquisadores e que possuem relações diretas com essa pesquisa. Uma delas está relacionada com os geradores piezelétricos, onde são desenvolvidos modelos matemáticos, técnicas de extração e armazenamento de energia e testes experimentais utilizados para validar esses modelos. Sendo também utilizados diferentes tipos de materiais piezelétricos para a geração de energia entre eles o PZT (titanato zirconato de chumbo), PVDF (fluoreto de polivinilideno) e PFC (compostos piezocerâmicos

de fibras), dentre outros. Outra vertente está relacionada com o circuito de extração de potência e dispositivo de armazenamento de energia, propondo circuitos eletrônicos que minimizem as perdas da energia extraída, utilizando principalmente conversores AC/DC, circuitos não lineares com diodos, transistores, chaves sincronizadas, etc.

A figura 1 representa por meio de diagrama de blocos os elementos básicos de um sistema de *power harvesting*, o qual é tomado como base para esse trabalho. Nesse sistema o gerador piezelétrico é composto pelo piezelétrico acoplado (colado) na estrutura mecânica submetida a deformações, *harvesting* ou circuito de extração de potência (conversor AC/DC) destinado a retificar/converter o sinal alternado oriundo do piezelétrico e por fim o dispositivo de armazenamento (baterias, capacitores, etc), responsável por armazenar a energia gerada que posteriormente será utilizada na alimentação de circuitos eletroeletrônicos.

Figura 1 - Diagrama de blocos simplificado de um sistema de *power harvesting*



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Há também estudos sendo realizados na busca pelo desenvolvimento de sistemas autônomos, os quais monitoram determinado tipo de grandeza física podendo enviar informações adquiridas para uma unidade fixa ou móvel de monitoramento. Esses sistemas tem por tendência a busca pela autonomia energética, ou seja, a alimentação do circuito de medição/transmissão ser dada exclusivamente pelo gerador piezelétrico mediante as deformações mecânicas existentes, eliminando ou estendendo os intervalos entre as recargas das baterias em situações onde não é possível ou viável a utilização da energia proveniente da rede elétrica.

Esse trabalho tem como objetivo principal investigar a viabilidade do emprego de circuitos eletrônicos e transdutores piezelétricos de baixo custo e já conhecidos na literatura (e *buzzer* piezelétrico, retificador de onda completa e conversor DC-DC elevador) em um sistema de *power harvesting* para reaproveitando da energia mecânica proveniente de esforços mecânicos na forma pulsada (deformações mecânicas de curta duração), causados pelo tráfego de veículos e/ou caminhar de pedestres tanto em ruas quanto rodovias no carregamento de baterias, podendo ser destinados na alimentação de circuitos autônomos de monitoramento, indicação, iluminação, etc. em locais remotos, eliminando ou estendendo o tempo entre recargas desses dispositivos.

Com o objetivo de simular as deformações de curta duração causadas pela passagem de veículos ou caminhar de pedestre fora construído um dispositivo eletropneumático controlado eletronicamente, onde a energia gerada pelos piezelétricos submetidos a impactos alimenta o circuito eletrônico, sendo possível quantificar os valores para tensão, corrente e potência na entrada e saída do circuito de extração mediante a uma carga ótima.

As grandezas são analisadas para os piezelétricos submetidos a duas frequências de impacto (0,5 Hz e 1 Hz), sendo estas frequências condizentes com essa aplicação, conectados ao retificador e dispositivo de armazenamento (capacitor) e por fim conectado ao retificador e conversor DC-DC.

São testadas ainda três quantidades de geradores piezelétricos (2, 4 e 8) conectados em serie e paralelo, verificando qual configuração é mais eficiente e também realizados testes variando a pressão mecânica e intensidade de força sobre os PZTs, de modo a verificar se os valores obtidos variam de maneira proporcional e por fim mediante aos dados obtidos é realizada relações de tensão, corrente, potência e energia acumulada em função da área dos PZTs, pressão e carga aplicada.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico é apresentada uma revisão bibliográfica na qual é descrito os principais trabalhos presentes na literatura na área *Power Harvesting* para vibrações mecânicas relevantes na elaboração deste trabalho. É destacado que há um considerável aumento nos últimos anos nas pesquisas envolvendo a conversão de energia mecânica proveniente das vibrações em energia elétrica e também na aplicação desta energia para alimentação de sensores sem fio. Esta revisão também apresenta estudos sobre os tipos de modelagem mais comuns das piezo estruturas, que foram necessários para as topologias de circuitos eletrônicos utilizadas na extração/conversão de energia do elemento piezelétrico. Adicionalmente, outros importantes estudos envolvendo a aplicação da energia produzida e armazenada na alimentação de sistemas de sensores são destacados a seguir.

A pesquisa de Ottman et al. (2002, 2003) envolveu a melhoria da eficiência através da implementação de um conversor DC-DC *buck*. Esta pesquisa investigou os efeitos da otimização da razão cíclica para o conversor atuando em uma frequência de excitação. A eficiência do conversor foi calculada entre 0 a 70% dependendo da frequência de excitação.

Cardoso (2006) apresenta o desenvolvimento de um sistema conversor de energia mecânica de vibrações em energia elétrica, realizada através de um transdutor de baixo custo

(*buzzer* piezelético), de modo a carregar ou estender o tempo entre recarga de baterias de até 2 Volts. Com este sistema, utilizando um microgerador (transdutor piezelétrico de baixo custo com uma esfera de aço colada no centro) submetido a vibrações mecânicas e um circuito integrado responsável pela carga da bateria, obteve-se um rendimento de aproximadamente 55% comparado com resultados obtidos por outros pesquisadores.

Anton et al. (2007) apresentam uma ampla revisão de *power harvesting* utilizando materiais piezelétrico (2003-2006) e abordam os seguintes tópicos: melhoramento da eficiência e a geração de energia através de configurações do material piezelétrico, de circuitos e do método de armazenamento de energia; aplicação de *power harvesting* em atividades do ser humano; coleta de energia do fluxo de fluidos provenientes do ambiente; *power harvesting* em sistemas microeletromecânicos (MEMS); sensores auto alimentados e análise do desempenho de materiais piezelétrico em relação a outros materiais.

Ajitsaria et al. (2007) realizaram uma aproximação analítica baseados na teoria de viga de Euler-Bernoulli e equações de viga Timoshenko para tensão de saída e geração de energia que é então comparado com dois modelos descritos anteriormente na literatura: circuito equivalente elétrico e método da energia. Os modelos são implementados no matlab/simulink/simpower anteriormente simulado com um circuito conversor de energia AC/DC. Na comparação verificou-se que os modelos baseados na teoria de viga de Euler-Bernoulli e equações da viga de Timoshenko foram os que melhor se aproximaram do resultado experimental.

Lefeuvre et al. (2007) desenvolveram um circuito em que a extração da carga elétrica é sincronizada com a vibração do sistema, a fim de melhorar a eficiência do processo de transferência de energia. O circuito proposto contém o retificador e conversor DC-DC *buck-boost*. Os critérios utilizados para aperfeiçoar a eficiência são simples e sem a necessidade de utilizar sensores. Os resultados experimentalmente mostram que o conversor tem uma eficiência de 88%.

Ferrari et al. (2007) desenvolveram e testaram um arranjo de conversores piezelétricos de multifrequências (MFCA), composto por múltiplos bimorfes engastados cujas tensões de saída retificadas alimentavam um único capacitor armazenador. Os autores enfatizam a possibilidade de fabricar um sistema em miniatura constituído por um conjunto de conversores engastados capazes de trabalhar em diferentes faixas de frequência. O estudo mostrou que, para um único conversor seguido de um retificador dobrador de tensões, sob regime senoidal, quando as perdas são desprezadas, o ângulo de carregamento do capacitor armazenador só era dependente do período e independente da frequência e amplitude de

excitação. Já com o MFCA com conversores diferentes, observou-se qualitativamente que o conversor carregou o capacitor com um nível mais alto de saída instantânea, dependendo da frequência de excitação.

Ramadass et al. (2010) realizam uma comparação entre as topologias de circuitos de extração mais utilizadas em sistemas de extração e armazenamento de energia (retificador de onda completa em ponte e dobrador de tensão) avaliando a potência elétrica extraída por cada um deles, sendo que a potência extraída por eles, quando o piezo-gerador é excitado em sua ressonância, é de 12,5% considerando-se os diodos empregados como sendo ideais. Adicionalmente, apresentam uma topologia de circuito que é capaz de extrair maior potência do elemento piezelétrico conhecida como *bias-flip* com indutor compartilhado podendo extrair até quatro vezes mais potência do que os outros circuitos extratores supracitados.

Tabesh (2010) projetou um circuito adaptativo com baixo consumo que consiste em extrair a máxima potência através da tensão da carga fixa. O circuito é constituído pelo dobrador de tensão e conversor *boost*, controlado pela realimentação da tensão de saída. O circuito proposto é independente da carga e dos parâmetros do piezelétrico. A eficiência obtida foi de 60% com potência acima de 0,5 mW.

Lagoin (2011) realizou um estudo sobre a utilização de materiais piezelétricos como conversores de energia vibratória em energia elétrica apresentando simulações realizadas no programa ANSYS© sendo validado com testes experimentais, apresentando resultado satisfatório, podendo ser possível prever o potencial elétrico produzido por uma piezoestrutura do tipo viga engastada-livre sendo excitada por uma força constante de 1N. Também realizou um estudo paramétrico sobre a interferência das variáveis (largura, espessura e comprimento da viga e do PZT) no potencial elétrico produzido. O potencial elétrico produzido foi então extraído através de um circuito retificador de onda completa e armazenado em um supercapacitor.

Souza (2011) apresenta uma comparação entre diversas topologias de circuitos eletrônicos de extração de energia para armazenamento em um supercapacitor verificando qual dos circuitos extrai maior potência do elemento piezelétrico. Constatando ao final que a melhor configuração é o retificador *bias-flip* com conversor *buck-boost* para casamento de impedância, entre a carga e o PZT. Adicionalmente, aplicou a energia armazenada no supercapacitor na alimentação de um microcontrolador que armazena os dados de um sensor de temperatura de baixo consumo mostrando que é possível alimentar o sistema com a energia produzida por uma piezo viga e ainda armazenar mais energia no supercapacitor.

Camara (2012) apresenta um estudo sobre uma configuração com piezoestrutura multifrequência capaz de produzir um alto nível de energia mesmo que a frequência de excitação apresente variações, sendo esta modelada por elementos finitos (ANSYS©) e posteriormente comparada com resultados experimentais. A tensão produzida foi extraída através dos circuitos retificador de onda completa em ponte e do dobrador de tensão onde foi avaliado o desempenho de ambos na extração da energia produzida para armazenamento em um supercapacitor. Foram analisadas diferentes configurações geométricas (comprimentos, larguras e espessuras) da viga hospedeira a fim de verificar qual dos parâmetros apresenta maior influência na largura de banda de frequências. E ainda realizou-se um estudo e simulações sobre a influência do comprimento do elemento piezelétrico na tensão e potência produzida para cada piezo-viga. Finalmente, a energia armazenada no supercapacitor foi utilizada para alimentar um sistema de monitoramento da temperatura de um ambiente de modo que o sistema passe a operar como um sistema autônomo.

Gao et al. (2012) apresentou um circuito integrado (CI) de condicionamento de energia de vibração piezelétrica para aplicações em sensores de energia autônomos. No qual é composto por um retificador, conversor *buck-boost* não inversor trabalhando no modo de condução descontínua (DCM) e um gerador de clock de comutação (oscilador em anel). O circuito elaborado é capaz de aproveitar a energia de vibração tanto na forma de regime senoidal permanente quanto de pulsos de curta duração e auto iniciando-se com tensão de entrada acima de 0.9V, o qual é implementado em um padrão CMOS de 0,18 μm com 0,05 mm de área ativa com eficiência de conversão de 54%.

Renaud et al. (2012) Propôs um projeto alternativo de geração de energia com base no impacto de uma massa sobre uma estrutura piezelétrica ocasionando sua deflexão. Um modelo de sistema é apresentado e analisado a fim de determinar os parâmetros que influenciam o desempenho do dispositivo em termos de captação de energia. Um protótipo do harvesting de impacto é caracterizado experimentalmente: por um gerador que ocupa cerca de 25 cm^3 e pesando 60 g, uma potência de 47 mW de saída foi medida através de uma carga resistiva quando o dispositivo foi sofreu rotação de 180° por segundo. 600 mW foram obtidos para uma frequência de 10 Hz e 10 cm de amplitude de movimento linear. Além disso, a otimização do transdutor piezoelétrico é possível, permitindo um grande aumento nestes valores, elevando a densidade de potência para os dois casos, respectivamente, para 10 e 120 μW .

Peigney e Siegert (2013) Este artigo centra-se na captação de energia a partir de vibrações induzidas pelo tráfego de veículos em pontes. Usando uma ponte como um estudo

de caso, em medições de vibração são apresentados e analisados. A partir destes resultados, um protótipo de uma viga em balanço foi desenvolvido, testado e modelado. Mesmo que as vibrações sejam considerada por pequena amplitude e uma frequência baixa (ou seja, abaixo de 15 Hz), mostra-se que a potência média da ordem de 0,03 mW pode ser produzida, com uma tensão controlada entre 1,8 V e 3,6 V. Uma simples modelo é proposto para a previsão teórica da potência fornecida em termos de intensidade de tráfego. Este modelo mostra boa concordância com os resultados experimentais e leva a uma regra de design simples, mas eficaz para colheitadeiras piezoelétricos para ser usado em pontes.

Ogawa et al (2013) Investigou a utilização de um *buzzer* piezelétrico para captação de energia. A força foi exercida sobre uma estrutura unimorfo com o *buzzer* piezelétrico (titanato zirconato de chumbo). O diâmetro do disco da cerâmica, espessura, e capacitância foram, respectivamente, 14 mm, 0,2 mm e, de 10 nF, operando na frequência de ressonância. Como resultado, observaram-se tensões alternadas de cerca de 30 V em uma frequência de 5 kHz. As tensões geradas foram aplicadas em um LED, foram desenvolvidos novos dispositivos, como um "calçado luminoso" e um "gerador piezo por caminhar". Concluiu-se que o "piezo buzzer" para captação de energia na vibração de ressonância é uma ferramenta eficaz para a obtenção de energia limpa.

Carvalho (2014) otimizou um sistema extrator de energia através de vibrações utilizando material piezelétrico, maximizando a potência extraída e melhorando o rendimento do sistema, analisando condições de linearidade e não linearidade no sistema e os circuitos conversores *SECE* (*extração por Carga Elétrica Síncrona*), *SSHI* (*Extração por Comutação Sincronizada no Indutor em Paralelo*) e conversor DC-DC *Buck-Boost*. Onda a melhor configuração fora utilizada para alimentar um sistema autônomo. Ao final a fim de se chegar o mais próximo da frequência obtida no meio ambiente e levando-se em consideração volume e viabilidade, a estrutura de viga fina em paralelo com conversor SSHI em paralelo foi a melhor opção. No caso da utilização de cargas que variem a impedância em função do tempo, a utilização do conversor SECE é a melhor opção. A utilização do sistema biestável com o intuito de introduzir não linearidades se mostrou satisfatória, uma vez que todos os resultados (tensão, corrente e largura de banda), foram superiores ao sistema convencional linear.

Wang, Lee e Inman (2014) Investigaram o desempenho na extração de energia de um atuador piezelétrico em formato de pilha submetido a um impacto. Para o primeiro caso, uma carga de impulso de 20.8 N foi aplicada sobre a pilha de PZT SCMAP09-H100 e a energia colhida a partir do impacto foi de 0,2899 uJ, enquanto que a análise SDOF e FEM previu 0,3012u e 0,2943 uJ, com um erro 3,90% e 1,52%. Para o segundo caso, uma carga de

impulso de 1.70 N foi aplicada à pilha de PZT NAC2013-H26 e a energia colhida foi de 5,861 nJ, enquanto que a análise SDOF e FEM previu 6.052 nJ e 5.944 nJ, que resultaram em erros por cento de 3,26% e 1,42%, respectivamente. Em ambos os casos, o FEM era ligeiramente mais preciso, mas a análise ainda SDOF teve erros relativamente baixos, o que demonstra a necessidade de o fator de correção. Este estudo apresentou métodos analíticos que caracterizam a geração de energia a pilha do atuador PZT sob um evento de choque e exibido com precisão os casos de teste experimentais.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivos principais:

- Investigar a viabilidade em se obter energia proveniente de esforços mecânicos de curta duração utilizando transdutores piezelétricos e componentes eletrônicos de baixo custo e fácil aquisição;
- Constatar, mediante a utilização de um circuito simples de poucos componentes se é possível gerar energia que sege suficiente para o carregamento de uma bateria, podendo ser utilizada principalmente em circuitos autônomos.
- Avaliar o circuito de extração de energia elétrica em termos de tensões, correntes, potências, energia armazenada e rendimento estando os piezelétricos conectados em série/paralelo, com 2, 4 e 8 PZTs e também excitados com duas frequências de impacto (0,5Hz e 1 Hz).

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo eles.

- Capítulo 1: É feita uma introdução sobre geração de energia renovável alternativa com foco em materiais piezelétricos submetidos a deformações mecânicas, revisão bibliográfica de trabalhos existentes na literatura, objetivo do trabalho e por fim uma breve descrição do que será abordado nos capítulos posteriores;
- Capítulo 2: Apresentada conceitos e equacionamento linear básico dos materiais piezelétricos, modos de operação acoplada em estruturas mecânicas e por fim é realizada uma breve classificação dos principais materiais piezelétricos comerciais de acordo com suas propriedades e aplicações.

- Capítulo 3: São descritos os equipamentos, dispositivos, circuitos eletrônicos e métodos utilizados para realização dos testes experimentais com circuito eletrônico e gerador piezelétrico excitados por impacto.
- Capítulo 4: Compreende os resultados ilustrados graficamente e por tabelas, obtidos através das análises do circuito retificador de onda completa e retificador com conversor DC-DC elevador mediante as variações de configurações elétricas e parâmetros mecânicos aos quais os PZTs são submetidos.
- Capítulo 5: Apresenta as considerações finais do trabalho, abordando a conclusão e aspectos importantes relativos ao seu desenvolvimento, bem como sugestões e propostas para trabalhos futuros;

2 CONCEITOS DE PIEZELETRICIDADE PARA *ENERGY HARVESTING*

Neste capítulo é descrito os principais conceitos sobre piezeletricidade bem como sua estrutura interna e modos de utilização. Posteriormente será abordado o equacionamento linear básico para materiais piezelétricos levando em conta considerações de simplificação, descrevendo ainda um equacionamento simplificado para o modo de operação em superfícies. Por fim são apresentadas as características do desempenho dos geradores piezelétricos (piezelétrico com estrutura) quando operando em sua frequência de ressonância, com o intuito de se obter a maior potência extraída.

2.1 EFEITO PIEZELÉTRICO

Alguns materiais possuem a capacidade de alterar suas características mediante um estímulo externo, ou seja, alteram seu volume quando sujeitos a um potencial elétrico, produzem sinais elétricos quando dobrados ou esticados, outros encolhem, expandem, movimentam quando aquecidos ou resfriados. Esses materiais, chamados de "materiais inteligentes", são materiais que possuem acoplamento entre múltiplos domínios físicos (LEO, 2007).

Leo (2007) define um domínio físico como qualquer quantidade física que pode ser descrita por um conjunto de duas variáveis de estado, sendo estas variáveis um meio de definição de tamanho ou localização dentro de um domínio físico. Pode ser citado como domínio físico o domínio elétrico, cujas variáveis de estado são o campo elétrico e o deslocamento elétrico do material. Outros exemplos de domínios físicos são o mecânico, térmico, magnético e químico. Na tabela 1 são listados alguns domínios físicos e as suas respectivas variáveis.

Tabela 1 - Exemplos de domínios físicos e variáveis de estado associadas

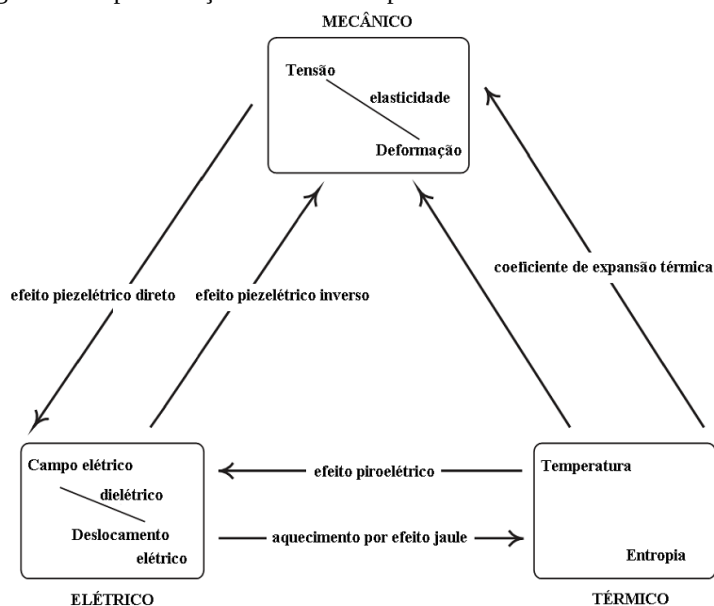
Mecânico	Elétrico	Térmico	Magnético	Químico
Tensão Deformação	Campo elétrico Deslocamento elétrico	Temperatura Entropia	Campo magnético Fluxo magnético	Concentração Fluxo volumétrico

Fonte: Adaptado de Leo (2007).

O acoplamento entre domínios físicos ocorre quando uma mudança na variável de estado em um domínio físico causa uma mudança na variável de estado num outro domínio físico separado, ou seja, a mudança na temperatura de um material que é uma variável de estado do domínio térmico causa uma mudança na deformação que é uma variável de estado do domínio mecânico. Esta relação chamada de acoplamento termomecânico trata-se do acoplamento entre o domínio físico térmico e mecânico.

Na figura 2 é representado o conceito de domínios físicos e do acoplamento entre eles. Cada retângulo representa um domínio físico, neste caso, mecânico, elétrico e térmico. Onde as variáveis de estado associadas estão listadas nos retângulos e a ponte dentro dos mesmos é a propriedade física que se relaciona com as variáveis de estado. As propriedades elásticas de um material relacionam seus estados de tensão e deformação, já as propriedades dielétricas relacionam as variáveis de estado do domínio elétrico. Os acoplamentos entre os domínios físicos são representados pelas setas que conectam os retângulos (efeito direto e inverso). Por exemplo, a saída elétrica produzida por um estímulo térmico é chamado de efeito piroelétrico. Da mesma forma, a variação de tensão mecânica devido a um potencial elétrico é chamada de efeito piezelétrico inverso (LEO, 2007).

Figura 2 - Representação visual do acoplamento entre os domínios físicos

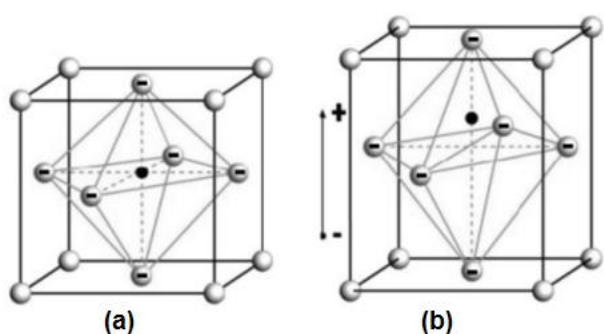


Fonte: Adaptado de Leo (2007).

O efeito piezelétrico (do grego piezen, pressionar), demonstrado pela primeira vez em 1880, por Jacques e Pierre Curie, pode ser definido como a capacidade de alguns materiais gerarem energia elétrica quando submetidos a esforços mecânicos, bem como a capacidade de se deformarem quando impostos a uma diferença de potencial (CROSS; HEYWANG, 2008).

De todos os materiais cristalinos existentes somente os não centrossimétricos podem apresentar o fenômeno da piezeletricidade, ou seja, ao nível da célula unitária o centro de cargas negativas não pode coincidir com o centro de cargas positivas. A figura 3 ilustra dois materiais, um centrossimétrico e outro não centrossimétrico, no material não centrossimétrico o íon positivo é deslocado do centro de cargas negativas, resultando na existência de um momento de dipolo elétrico em cada célula unitária.

Figura 3 - Estrutura Perovskita. a) Material centrossimétrico, b) Material não centrossimétrico.



Fonte: Adaptado de Pereira (2010).

O fato de um material não ser centrossimétrico não é suficiente para que ele seja piezelétrico, Já que os dipolos ao nível da célula unitária não estão todos orientados na mesma direção podendo cancelar-se entre si, resultando em um valor nulo. É necessário para tal que o material também seja piroelétrico, o qual apresenta polarização na ausência de um campo elétrico externo (polarização espontânea).

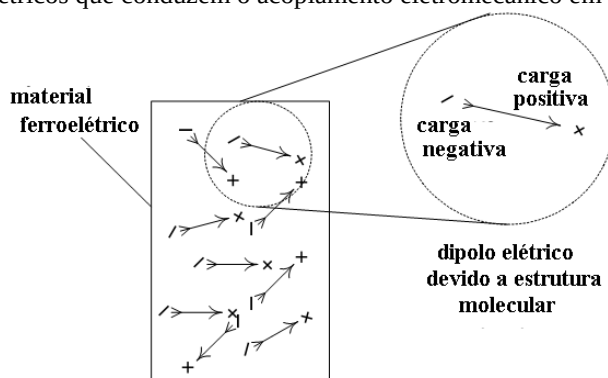
Segundo Rosana (2007), dos minerais que possuem esta propriedade, o quartzo é o mais expressivo, pois ao se aplicar pequenas pressões paralelamente a um de seus eixos, produzirá uma corrente elétrica capaz de ser detectada.

Alguns dos materiais piroelétricos são também ferroelétricos por terem a habilidade de mudar a direção da polarização espontânea na direção de um campo elétrico externo, que quando retirado o material apresentará polarizado nessa direção (polarização remanescente). Essa característica é a responsável por possibilitar a utilização de cerâmicas e polímeros por exemplo como materiais piezelétricos.

Os sólidos cristalinos classificam-se de acordo a sua simetria em 32 classes ou grupos de simetria diferentes. Dessas 32 classes 12 são centrossimétricas e por tanto não apresentam piroeletricidade, as 20 classes restantes (não centrossimétricas) podem apresentar o fenômeno da piezeletricidade, mas somente 10 classes podem possuir propriedades piroelétricas. (GASPAROTTO, 2002)

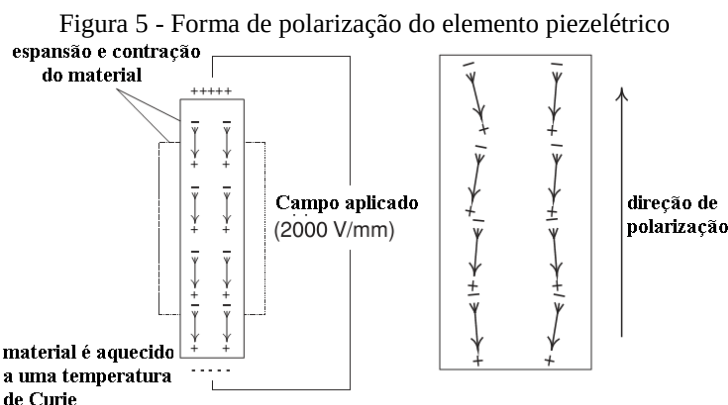
Os materiais piezelétricos sintéticos pertencentes à classe de materiais ferroelétricos, possuem uma estrutura molecular constituída de vários cristais (material dielétrico) com separação de cargas locais (dipolos elétricos) organizadas aleatoriamente (polarização espontânea igual a zero) e sem o efeito piezelétrico, como ilustrado na figura 4.

Figura 4 - Dipolos elétricos que conduzem o acoplamento eletromecânico em materiais piezelétricos



Fonte: Adaptado de Leo (2007).

Após a aplicação de um campo elétrico DC de alta intensidade (2000V/mm) e submetido a temperatura de Curie (PZT-5A e PZT-5H ~ 365°C e 190°C respectivamente (BERLIN COURT et al., 2004)), os cristais são polarizados e alinham a sua orientação, conforme figura 5. Retirando rapidamente o campo elétrico e resfriando o material, todos os cristais manterão sua orientação criando um dipolo elétrico comum na mesma direção, fazendo com que o material passe a exibir o efeito piezelétrico.

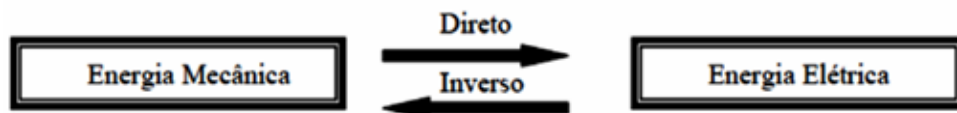


Fonte: Adaptado de Leo (2007).

Atualmente existem vários materiais piezelétricos, como o polímero PVDF (*Poly-Vinilidene Fluoride*), compósito MFC (*Macro Fiber Composite*), cerâmica PZT (*Lead Titanate Zirconate*). O uso mais comum é o das cerâmicas piezelétricas constituídos principalmente de óxido de chumbo, zircônio e titânio (PEDERSEN, 2011). Uma das vantagens do PZT reside no fato de apresentar grande rigidez, da ordem de 70 GPa, sendo idealmente indicado na confecção de atuadores. Já o PVDF, cujas propriedades piezelétricas foram descobertas por Kawai após 1960, é um polímero piezelétrico robusto e maleável, que pode ser produzido em geometrias complexas e extremamente delgadas (TSENG et al., 1989). Com todas essas propriedades o PVDF é altamente indicado para sensoriamento distribuído.

Os materiais piezelétricos por exibirem acoplamento do tipo eletromecânico podem ser utilizados para projetar dispositivos do tipo sensores ou atuadores. O acoplamento é caracterizado pelo fato de que o material piezelétrico produzir um deslocamento elétrico a partir de uma tensão mecânica aplicada (efeito direto) e pode produzir uma deformação mecânica quando um campo elétrico é aplicado (efeito inverso). Uma representação esquemática dos efeitos, piezelétrico direto e inverso é apresentada na figura 6.

Figura 6 - Representação esquemática da conversão de energia no efeito piezelétrico

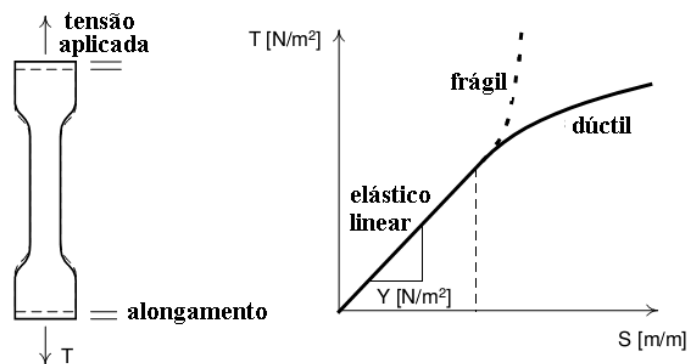


Fonte: (EIRAS, 2004).

2.1.1 Efeito piezelétrico direto

O efeito piezelétrico direto pode ser entendido quando se considera um material do tipo elástico que tem tensão mecânica aplicada T (N/m^2) a suas duas faces opostas e tem seu movimento restrito para se mover apenas na direção da tensão aplicada, como ilustra a figura 7.

Figura 7 - Representação tensão/deformação para um material elástico



Fonte: Adaptado de Leo (2007).

Com a aplicação de uma tensão no material o mesmo produzirá um alongamento na direção da carga aplicada, e sob a suposição que o material está em um estado de deformação uniaxial, a deformação S (m/m) é definida como o alongamento total dividido pelo comprimento original do corpo de prova. Para valores baixos de tensão aplicada, a resposta da deformação será linear até uma tensão crítica. Na região linear elástica a inclinação da curva tensão/deformação é constante a qual é definida como módulo de elasticidade do material (ou módulo de Young) Y (N/m^2). A relação tensão/deformação nesta região é dada pela equação 1.

$$S = \frac{1}{Y} \cdot T = s \cdot T \quad (1)$$

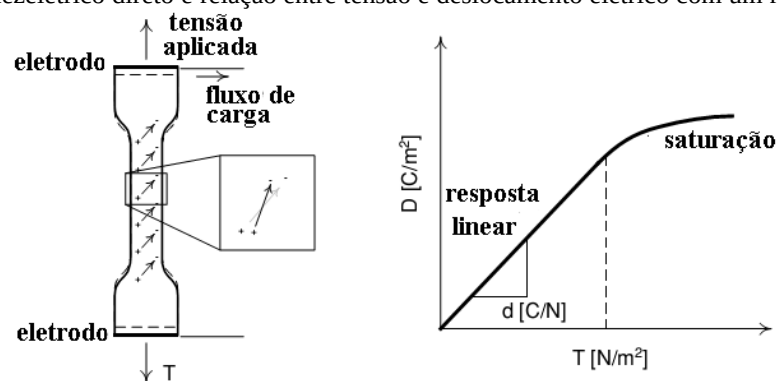
O termo s (m^2/N) é definido como a compliância mecânica do material.

Acima da tensão crítica a inclinação da curva tensão/deformação não é mais linear e muda em função do carregamento aplicado. Para materiais dúcteis “macios” ela exibirá uma diminuição da inclinação da curva conforme a tensão aumentar, por outro lado, para materiais frágeis “duros” ela exibirá um aumento da inclinação da curva conforme a tensão aumenta (LEO, 2007).

Considerando um material piezelétrico sujeito a uma carga aplicada, além do alongamento elástico o material piezelétrico irá produzir uma carga elétrica fluindo através dos eletrodos localizados nas extremidades do material. Essa carga fluindo no material é produzida pelo movimento dos dipolos elétricos do material.

A aplicação de tensão mecânica externa causa o movimento das partículas, criando um fluxo de carga aparente que pode ser medido nos dois eletrodos. A carga produzida dividida pela área dos eletrodos é definida como deslocamento elétrico D (C/m^2). Com um aumento no nível de tensão, será produzido um aumento da rotação dos dipolos elétricos e um aumento no deslocamento elétrico. Sobre um determinado intervalo de tensão mecânica aplicada existe uma relação linear entre a tensão mecânica e o deslocamento elétrico medido, como ilustrado na figura 8.

Figura 8 - Efeito piezelétrico direto e relação entre tensão e deslocamento elétrico com um material piezelétrico



Fonte: Adaptado de Leo (2007)

A equação 2 estabelece essa relação de proporcionalidade entre a tensão mecânica T e o deslocamento elétrico D .

$$D = d \cdot T \quad (2)$$

O coeficiente de proporcionalidade d (C/N) da equação 2 é definido como coeficiente piezelétrico de deformação. Para níveis suficientemente altos de tensão, a relação entre tensão

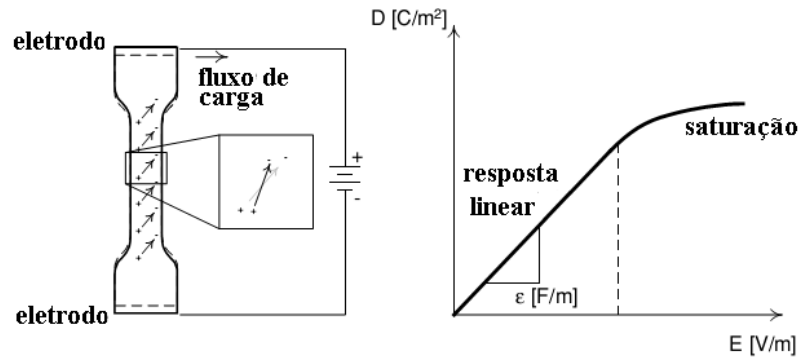
mecânica e deslocamento elétrico passa a ser não linear devido à saturação do movimento do dipolo elétrico (LEO, 2007).

2.1.2 Efeito piezelétrico indireto

O efeito piezelétrico indireto ocorre devido ao fato de que materiais piezelétricos exibem um efeito recíproco, quando um campo elétrico é aplicado ele produz uma resposta mecânica.

Considerando a aplicação de um potencial elétrico constante através dos eletrodos do material piezelétrico ilustrado na figura 9.

Figura 9 - (a) Efeito piezelétrico indireto; (b) Relação entre campo elétrico aplicado e deslocamento elétrico em um material piezelétrico



Fonte: Adaptado de Leo (2007)

Supondo o material piezelétrico um perfeito isolador, o potencial aplicado vai produzir um campo elétrico E (V/m) no material, sendo este igual ao potencial aplicado dividido pela distância entre seus eletrodos. A aplicação de um potencial elétrico no material produzirá atrações entre a carga aplicada e os dipolos elétricos. A rotação do dipolo ocorrerá e um deslocamento elétrico será medido nos eletrodos do material. Para valores abaixo de um dado limite a relação entre o campo elétrico E e deslocamento elétrico D será linear, cuja constante de proporcionalidade é chamada permissividade dielétrica ϵ (F/m).

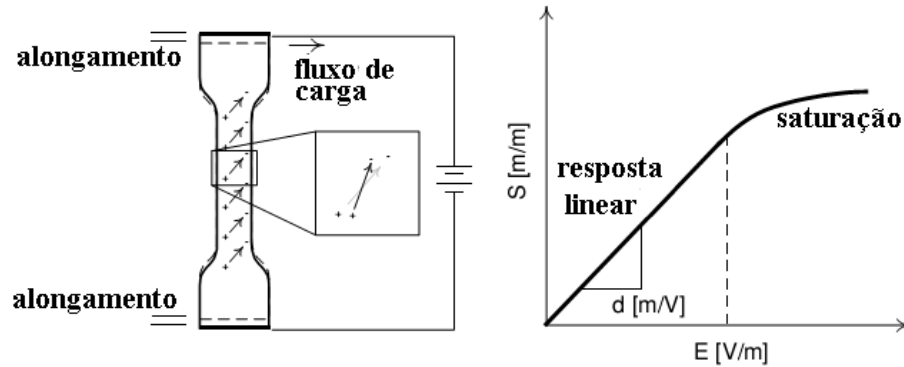
A relação entre campo e deslocamento elétrico no regime linear é definida pela equação 3.

$$D = \epsilon \cdot E \quad (3)$$

Como no caso da tensão aplicada, um aumento no campo elétrico acima de um dado valor irá resultar em saturação do movimento dos dipolos e assim a relação entre campo aplicado e deslocamento elétrico deixa de ser constante.

Para o efeito piezelétrico direto existe uma relação entre deformação e carga, ou seja, a aplicação de uma tensão mecânica produzirá uma rotação dos dipolos e um fluxo de carga aparente. Já no caso inverso, a rotação do dipolo irá ocorrer em consequência da aplicação de um campo elétrico, o qual produzirá uma deformação no material como ilustrado na figura 10.

Figura 10 - (a) Rotação dos dipolos; (b) Relação entre campo elétrico e deformação em um material piezelétrico



Fonte: Adaptado de Leo (2007)

Para valores de campo elétrico abaixo de um dado limite, tem-se uma relação linear entre o campo aplicado e a deformação mecânica. A figura 9 ilustra esta relação entre o campo elétrico e a deformação do material. A relação de inclinação da curva do campo elétrico E pela deformação mecânica S é igual ao coeficiente de deformação piezelétrico d (m/V), equação 4.

$$S = d \cdot E \quad (4)$$

Essa é a expressão do efeito inverso para materiais piezelétricos lineares.

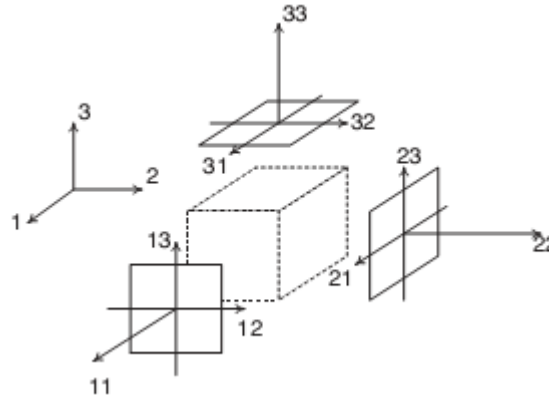
2.2 EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS PARA UM MATERIAL PIEZELÉTRICO LINEAR

O acoplamento eletromecânico é parametrizado por três variáveis: a compliância mecânica s , a permissividade dielétrica ϵ e o coeficiente piezelétrico de deformação d . Tanto o efeito piezelétrico direto quanto o inverso podem ser expressos como uma relação entre tensão mecânica, deformação, campo elétrico e deslocamento elétrico. A compliância mecânica e a permissividade dielétrica são apresentadas para serem funções de uma condição de contorno mecânica e elétrica respectivamente, sendo especificadas quando se escrevem esses parâmetros (LEO, 2007).

Considerando o cubo de material piezelétrico ilustrado na figura 11, onde não são feitas suposições a respeito da direção que o campo elétrico é aplicado ou as direções em que o material produz tensão ou deformação, pode-se definir um sistema de coordenadas

específico para representar o mesmo. As três direções são especificadas numericamente e usando a convenção comum, em que a direção 3 é alinhada com o eixo de polarização do material.

Figura 11 - Cubo piezelétrico indicando os eixos coordenados da análise tridimensional



Fonte: (LEO, 2007)

Para o caso tridimensional ilustrado na figura 10 é visto a existência de três direções em que se pode aplicar campo elétrico E . E três direções associadas com o campo elétrico e com o deslocamento elétrico D . Sendo as três direções (1, 2 e 3) associadas com as variáveis em forma de vetores 3×1 .

Para o estado geral de tensão e deformação, nove vetores são requeridos para uma completa especificação das equações, sendo três em cada face. As componentes de tensão e deformação normais às superfícies do cubo são denotadas por T_{11}, T_{22}, T_{33} e S_{11}, S_{22}, S_{33} respectivamente. Existem também seis componentes cruzadas (cisalhamento) para cada caso $T_{12}, T_{13}, T_{23}, T_{21}, T_{32}, T_{31}$, e $S_{12}, S_{13}, S_{23}, S_{21}, S_{32}, S_{31}$. (LEO, 2007)

Sendo que, nove estados de deformação S estão relacionados com cada um dos três campos elétricos E aplicados e três termos de deslocamento elétrico D são relacionados com cada termo da tensão mecânica T .

Considerando a simetria existente no estado de tensão e deformação mecânica do material, em vez de nove elementos independentes de deformação e tensão, restaram apenas seis elementos independentes. Assim, pode-se definir o seguinte conjunto de novos componentes de tensão e deformação.

$$S_1 = S_{11} \quad T_1 = T_{11} \quad (5)$$

$$S_2 = S_{22} \quad T_2 = T_{22} \quad (6)$$

$$S_3 = S_{33} \quad T_3 = T_{33} \quad (7)$$

$$S_4 = S_{23} + S_{32} \quad T_4 = T_{23} = T_{32} \quad (8)$$

$$S_5 = S_{31} + S_{13} \quad T_5 = T_{31} = T_{13} \quad (9)$$

$$S_6 = S_{12} + S_{21} \quad T_6 = T_{12} = T_{21} \quad (10)$$

As equações resultantes destacam há presença de 36 constantes independentes elásticas, 18 coeficientes de deformação piezelétricos e 9 valores de permissividade dielétrica que caracterizam um material piezelétrico. Equações (11 e 12).

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \\ \mathbf{S}_3 \\ \mathbf{S}_4 \\ \mathbf{S}_5 \\ \mathbf{S}_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_{11} & \mathbf{s}_{12} & \mathbf{s}_{13} & \mathbf{s}_{14} & \mathbf{s}_{15} & \mathbf{s}_{16} \\ \mathbf{s}_{21} & \mathbf{s}_{22} & \mathbf{s}_{23} & \mathbf{s}_{24} & \mathbf{s}_{25} & \mathbf{s}_{26} \\ \mathbf{s}_{31} & \mathbf{s}_{32} & \mathbf{s}_{33} & \mathbf{s}_{34} & \mathbf{s}_{35} & \mathbf{s}_{36} \\ \mathbf{s}_{41} & \mathbf{s}_{42} & \mathbf{s}_{43} & \mathbf{s}_{44} & \mathbf{s}_{45} & \mathbf{s}_{46} \\ \mathbf{s}_{51} & \mathbf{s}_{52} & \mathbf{s}_{53} & \mathbf{s}_{54} & \mathbf{s}_{55} & \mathbf{s}_{56} \\ \mathbf{s}_{61} & \mathbf{s}_{62} & \mathbf{s}_{63} & \mathbf{s}_{64} & \mathbf{s}_{65} & \mathbf{s}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{T}_2 \\ \mathbf{T}_3 \\ \mathbf{T}_4 \\ \mathbf{T}_5 \\ \mathbf{T}_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{11} & \mathbf{d}_{12} & \mathbf{d}_{13} \\ \mathbf{d}_{21} & \mathbf{d}_{22} & \mathbf{d}_{23} \\ \mathbf{d}_{31} & \mathbf{d}_{32} & \mathbf{d}_{33} \\ \mathbf{d}_{41} & \mathbf{d}_{42} & \mathbf{d}_{43} \\ \mathbf{d}_{51} & \mathbf{d}_{52} & \mathbf{d}_{53} \\ \mathbf{d}_{61} & \mathbf{d}_{62} & \mathbf{d}_{63} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{E}_3 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Equação do sensor: Efeito direto

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{D}_1 \\ \mathbf{D}_2 \\ \mathbf{D}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_{11} & \mathbf{d}_{12} & \mathbf{d}_{13} & \mathbf{d}_{14} & \mathbf{d}_{15} & \mathbf{d}_{16} \\ \mathbf{d}_{21} & \mathbf{d}_{22} & \mathbf{d}_{23} & \mathbf{d}_{24} & \mathbf{d}_{25} & \mathbf{d}_{26} \\ \mathbf{d}_{31} & \mathbf{d}_{32} & \mathbf{d}_{33} & \mathbf{d}_{34} & \mathbf{d}_{35} & \mathbf{d}_{36} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{T}_2 \\ \mathbf{T}_3 \\ \mathbf{T}_4 \\ \mathbf{T}_5 \\ \mathbf{T}_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{11} & \boldsymbol{\varepsilon}_{12} & \boldsymbol{\varepsilon}_{13} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{21} & \boldsymbol{\varepsilon}_{22} & \boldsymbol{\varepsilon}_{23} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{31} & \boldsymbol{\varepsilon}_{32} & \boldsymbol{\varepsilon}_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{E}_3 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

Equação do atuador: Efeito inverso

As Equações podem ser escritas em notação matricial compacta, dadas pelas equações 13 e 14.

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d}' \mathbf{E} \quad (13)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} \quad (14)$$

Onde:

- $\mathbf{S}, \mathbf{T}$ são vetores 6x1 de deformação e tensão mecânicas
- $\mathbf{D}, \mathbf{E}$ são vetores 3x1 de deslocamento elétrico e campo elétrico
- $\mathbf{s}$ é uma matriz 6x6 das compliância mecânica
- $\boldsymbol{\varepsilon}$ é uma matriz 3x3 das constantes dielétricas do material piezelétrico permissividade dielétrica)
- $\mathbf{d}$ matriz 3x6 dos coeficientes de deformação piezelétrico
- $(\)^E$ Valores medidos para um campo elétrico constante
- $(\)^T$ Valores medidos para tensão constante
- $(\)'$ Transposto

O número de variáveis necessárias para especificar as propriedades constitutivas dos materiais piezoelétricos são reduzidas significativamente considerando a simetria associada

com as propriedades elásticas, elétricas e eletromecânicas e o fato dos materiais piezelétricos serem ortotrópicos, ou seja, suas propriedades térmicas são únicas e independentes nas três direções mutuamente ortogonais. Exemplos de materiais ortotrópicos é a madeira, vários cristais e metais laminados.

A matriz reduzida de compliância é mostrada na equação 15, sem o acoplamento de cisalhamento longitudinal (extensional) (LEO, 2007).

$$\mathbf{s}^E = \begin{bmatrix} \frac{1}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{12}}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{13}}{Y_1^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{Y_1^E} & \frac{1}{Y_1^E} & -\frac{\nu_{23}}{Y_1^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{Y_3^E} & -\frac{\nu_{32}}{Y_3^E} & \frac{1}{Y_3^E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}^E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}^E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}^E} \end{bmatrix} \quad (15)$$

onde:

- Y_i^E $i=1,2$ e 3 módulo extensional (longitudinal) na direção i (módulo de Young)
- G^E módulo de cisalhamento
- ν_{ij} coeficiente de Poisson (transversal na direção j com tensão axial na direção i quando forçado na direção i)

A maioria dos materiais dielétricos não apresenta acoplamento cruzado nas relações entre campo elétrico e deslocamento elétrico. Ou seja, os campos elétricos aplicados numa direção em particular não produzem deslocamentos elétricos em direções ortogonais. A matriz dielétrica é reduzida a uma matriz diagonal vista na equação 16.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (16)$$

A simetria dentro da estrutura do cristal da maioria dos materiais piezoelétricos limita o acoplamento para um subconjunto de direções, como mostrado na equação 17.

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Após reduzir todos os parâmetros possíveis acham-se os mais simples modelos constituintes, mostrados nas equações 18 e 19.

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{S}_1 \\ \mathbf{S}_2 \\ \mathbf{S}_3 \\ \mathbf{S}_4 \\ \mathbf{S}_5 \\ \mathbf{S}_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Y_1^E} & -\frac{v_{12}}{Y_1^E} & -\frac{v_{13}}{Y_1^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{21}}{Y_1^E} & \frac{1}{Y_1^E} & -\frac{v_{23}}{Y_1^E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{31}}{Y_3^E} & -\frac{v_{32}}{Y_3^E} & \frac{1}{Y_3^E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}^E} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}^E} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}^E} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{T}_2 \\ \mathbf{T}_3 \\ \mathbf{T}_4 \\ \mathbf{T}_5 \\ \mathbf{T}_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{13} \\ 0 & 0 & d_{23} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{E}_3 \end{Bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{D}_1 \\ \mathbf{D}_2 \\ \mathbf{D}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{T}_2 \\ \mathbf{T}_3 \\ \mathbf{T}_4 \\ \mathbf{T}_5 \\ \mathbf{T}_6 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{E}_1 \\ \mathbf{E}_2 \\ \mathbf{E}_3 \end{Bmatrix} \quad (19)$$

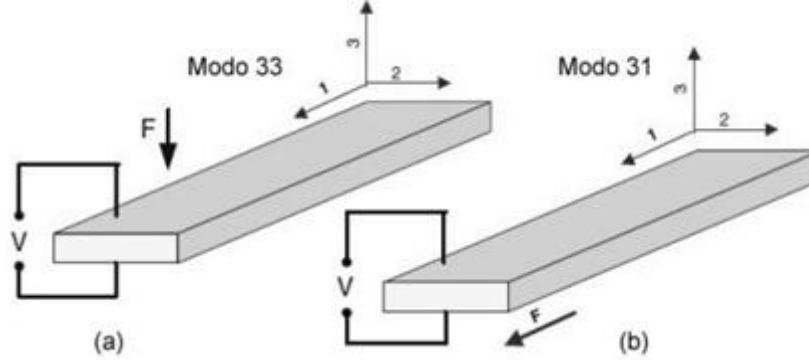
2.3 MODOS DE OPERAÇÃO DO DISPOSITIVO PIEZELÉTRICO

Na análise de sistemas com materiais piezelétricos, é aconselhável começar com o conjunto completo das relações constitutivas em qualquer notação seja esta por índice ou matricial compacta. Em muitas aplicações, no entanto, pode-se reduzir o total das relações constitutivas para um pequeno conjunto de relações, devido às condições de contorno associadas com o problema em questão. Para cada problema primeiramente as relações constitutivas completas são simplificadas em um conjunto de expressões que permite determinar as relações envolvidas entre força, deslocamento, carga elétrica e tensão (LEO, 2007).

Em aplicações de extração e armazenamento de energia o modo de operação do elemento piezelétrico é definido através do coeficiente piezelétrico, utilizando-se comumente d_{33} ou d_{31} . O primeiro índice indica a direção onde o campo elétrico é obtido e o segundo a direção onde as forças são aplicadas. Neste trabalho será utilizado o modo de operação d_{31} destacado a seguir.

Na figura 12 são apresentados os dois modos mais utilizados em extração e armazenamento de energia.

Figura 12 - Modos de operação do elemento piezelétrico: (a) 33; (b) 31



Fonte: Adaptado de Priya (2009).

2.3.1 Modo de operação "33" de um dispositivo piezelétrico

No modo de operação "33", quando o dispositivo é submetido a uma deformação na direção "3", gerando um campo elétrico também na direção "3". A aplicação desse modo assume a existência de algumas condições de contorno específicas.

$$\begin{aligned} E_1 &= T_1 = 0 \\ T_2 &= E_2 = 0 \\ T_4 &= 0 \\ T_5 &= 0 \\ T_6 &= 0 \end{aligned}$$

Sob tais condições de contorno, as equações constitutivas (18 e 19) são reduzidas para:

$$S_1 = -\frac{\nu_{13}}{Y_1^E} T_3 + d_{13} E_3 \quad (20)$$

$$S_2 = -\frac{\nu_{23}}{Y_1^E} T_3 + d_{23} E_3 \quad (21)$$

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

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

As equações constitutivas reduzidas para um transdutor com modo de operação "33" têm duas variáveis independentes e três variáveis dependentes. Em geral, foca-se a análise nas equações da deformação mecânica e do deslocamento elétrico, equações 22 e 23 respectivamente.

$$\begin{aligned} S_3 &= \frac{1}{Y_3^E} T_3 + d_{33} E_3 \\ D_3 &= d_{33} T_3 + \varepsilon_{33}^T E_3 \end{aligned}$$

O coeficiente de acoplamento eletromecânico K indica a habilidade do material piezelétrico converter energia mecânica em energia elétrica ou vice-versa. Para um transdutor com um modo de operação "33" o coeficiente de acoplamento é dado por:

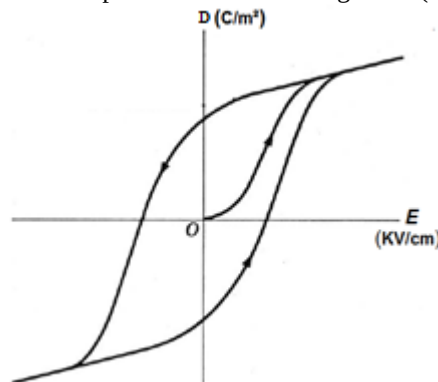
$$K_{33} = \frac{d_{33}\sqrt{Y_3^E}}{\sqrt{\epsilon_{33}^T}} = \frac{d_{33}}{\sqrt{s_{33}^E \epsilon_{33}^T}} \quad (24)$$

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS MATERIAIS PIEZELÉTRICOS COMERCIAIS

São inúmeras as aplicações dos elementos piezelétricos na atualidade, podendo estes ser classificados em um dos seguintes grupos: cristais de quartzo, cristais hidrossolúveis, monocristais piezelétricos, semicondutores piezelétricos, cerâmicas piezelétricas, polímeros piezelétricos e compósitos piezelétricos. Destes grupos, as cerâmicas piezelétricas são as que apresentam a maior flexibilidade de formato e de propriedades, sendo largamente utilizadas.

Como dito anteriormente os materiais piezelétricos sintéticos quando submetidos a um campo elétrico alternado e medido a polarização induzida em função deste campo é observado o fenômeno da histerese ferroelétrica, conforme ilustrado na figura 13, permanecendo polarizado nessa direção (polarização remanescente) mesmo após a retirada deste campo elétrico. A área interna desta curva corresponde à energia dissipada na forma de calor, devido às perdas mecânicas e dielétricas, em que a reversibilidade da polarização e o acoplamento entre os efeitos mecânicos e elétricos são importantes para a ampla utilização tecnológica das piezo cerâmicas.

Figura 13 - Curva de histerese de um ponto de vista cristalográfico (estrutura cristalina perovskita)



Fonte: Adaptado de Piezo Company (2011)

A principal classificação dos materiais piezelétricos é baseada na área desta curva, sendo denominados como materiais *Hard* “duros” os quais apresentam uma curva de histerese “fechada”, com área pequena e como materiais *Soft* “macios” cuja curva de histerese é “aberta”, com área expressiva, sendo a diferença entre as curvas dos materiais ditos “duros”

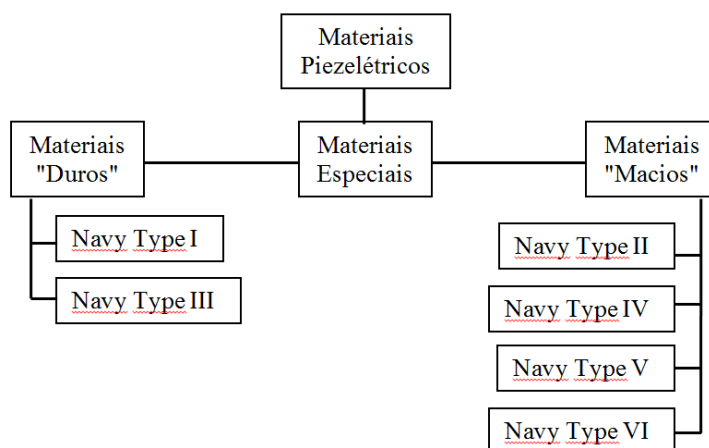
dos “macios” é expressiva não havendo margem para equívocos. Os materiais “duros” são também denominados de alta potência e os “macios” de alta sensibilidade.

Existem também os materiais comerciais especiais, sendo estes cerâmicas piezelétricas e mono cristais utilizados em aplicações particulares, tais como filtros, ressonadores de alta precisão e elementos ativos de acelerômetros uniaxiais.

A norma da marinha americana (*Ad Hoc Subcommittee Report on Piezoceramics – Revision of DOD-STD-1376A (SH)*, Naval Research Laboratory, 1986) subdivide os materiais “duros” e “macios” em subgrupos, através de intervalos de propriedades e de acordo com as principais aplicações.

Baseado na norma Pereira (2010) descreve as características dos subgrupos, conforme ilustrado na figura 14. Todos os subgrupos são constituídos de PZT’s modificados (Titanato Zirconato de Chumbo), exceto o *Navy Type IV*, constituído de BT’s (Titanato de Bário) modificado.

Figura 14 - Subdivisões dos materiais piezelétricos “duros” e “macios” de acordo com a norma americana DOD-STD-1376A (SH)



Fonte: Adaptado de Pereira (2004).

- *Navy Type I* (“Duro”): Recomendado para aplicações de média e alta potência em condições de uso contínuo e repetitivo. É capaz de gerar altas amplitudes de vibração mantendo baixas as perdas mecânicas e dielétricas.

Principais aplicações: Sistemas de limpeza por ultra som e sonares.

Conhecido comercialmente como PZT-4.

- *Navy Type II* (“Macio”): Alta sensibilidade, ideal para dispositivos de transmissão e recepção de baixa potência. Apresenta perdas dielétricas e mecânicas que inviabilizam a excitação continua com alta intensidade.

Principais aplicações: Dispositivos para NDT (*Non Destructive Testing*) "ensaios não destrutivos", hidrofones e acelerômetros.

Conhecido comercialmente como: PZT-5A.

- *Navy Type III* (“Duro”): Similar, mas menos sensível que o *Navy Type I*; é capaz de converter o dobro de potência mantendo baixas as perdas mecânicas e dielétricas. Recomendado para aplicações de alta potência.

Principais aplicações: sistemas de solda por ultra-som e processamento de materiais.

Conhecido comercialmente como PZT-8.

- *Navy Type IV* (“Macio”): Adequado para aplicações de média potência. Tornou-se obsoleto com o advento dos PZT’s, sendo substituído principalmente pelo *Navy Type I* (o sub grupo *Navy Type IV* é constituído por BT’s e não por PZT’s).

Principais aplicações: manutenção de equipamentos antigos.

Conhecido comercialmente como: Titanato de Bário.

- *Navy Type V* (“Macio”): Adequado para aplicações que requerem altas energias e diferença de potencial.

Principais aplicações: detonadores de impacto e magic clicks.

Conhecido comercialmente como: PZT-5J.

- *Navy Type VI* (“Macio”): Adequado para aplicações que requerem grandes deformações mecânicas (Δl).

Principais aplicações: posicionadores e atuadores.

Conhecido comercialmente como PZT-5H.

No grupo de materiais comerciais especiais encontram-se materiais diferentes dos PZT’s e BT’s que constituem os grupos “duros” e “macios”. Sendo essencialmente os seguintes:

- *Monocristais de Quartzo*

Os monos cristais de quartzo são insubstituíveis em aplicações que exigem altos fatores de qualidade (é possível obter cristais com Q de até 100.000), tais como em osciladores de precisão utilizados em equipamentos eletrônicos. Estes cristais são encontrados na natureza e lapidados de acordo como as constantes piezelétricas desejadas.

- *Titanato de Chumbo*

O titanato de chumbo é um material com constantes piezelétricas mais modestas

do que os PZT's, mas que apresenta uma particularidade muito útil na construção de acelerômetros e dispositivos hidrostáticos: possui constantes com índice $ij=31$ que apresentam valores mínimos, em outras palavras, não ocorre a conversão de energia cruzada entre eixos neste material, permitindo, por exemplo, a construção de acelerômetros perfeitamente unidirecionais.

Principais aplicações: acelerômetros e sensores uniaxiais/unidirecionais.

Conhecido comercialmente como: PT.

Esta norma costuma ser utilizada como referência por pesquisadores e projetistas, para estabelecer tabelas de equivalência entre os diversos fabricantes de cerâmicas piezelétricas e facilitar a escolha de materiais e a troca de fornecedores, como o exemplo mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Equivalência baseada na norma americana DOD-STD-1376A (SH)

	ATCP do BRASIL	FERROPERM	EDO	PKI	MORGAN	CHANNEL
Navy Type I	SP-4	Pz-26	EC-64	PKI-402	PZT-4	5400
Navy Type II	SP-5A	Pz-27	EC-65	PKI-502	PZT-5A	5500
Navy Type III	SP-8	Pz-28	EC-69	PKI-802	PZT-8	5804

Fonte: Pereira (2004)

2.4.1 Algumas limitações dos materiais piezelétricos

Os materiais cerâmicos apresentam um limite operacional em particular para a temperatura, deformação e tensão mecânica. A composição química particular do material determina os limites, que quando ultrapassados podem causar despolarização parcial ou total do material.

As principais limitações dos materiais piezelétricos estão relacionadas ao envelhecimento natural (e acelerado pelas condições de uso), instabilidade das propriedades em função de variações de temperatura e limites de excitação elétricos e mecânicos. As cerâmicas piezelétricas são materiais frágeis, pouco resistentes à tração, sendo importante observar os limites de cada material para evitar quebras.

Quando ocorre um aumento da temperatura de operação o desempenho do material piezelétrico diminui até que a despolarização completa e permanente ocorra, devido à temperatura de Curie do material, devendo esta ser menor que a do ponto de Curie. A limitação da temperatura do material diminui com a operação contínua e em temperaturas

elevadas o processo de envelhecimento acelera, diminuindo o desempenho piezelétrico e o nível de tensão máxima é reduzido. Além dos limites de tração como descrito na tabela 3, existem os limites de conversão de potência, que ficam entre 4 e 10 W/cm³, para os materiais tipo “duro”.

Tabela 3 - Limites de tração para alguns materiais piezelétricos

(psi)	Navy Type I	Navy Type II	Navy Type V	Navy Type VI
Dinâmico	6000	4000	4000	4000
Estático	11000	11000	10000	10000

Fonte: (PEREIRA, 2004)

O limite para a intensidade do campo é dependente do tipo de material, da duração da aplicação e da temperatura de funcionamento. O limite operacional típico é entre 500V/mm e 1000V/mm para aplicação contínua. A alta tensão mecânica pode despolarizar uma cerâmica piezelétrica. O limite para a tensão mecânica aplicada é dependente do tipo de material cerâmico e da duração da tensão aplicada.

Para aplicações de impacto, o material comporta-se estaticamente com durações de impulso de alguns milésimos de segundo ou mais. Quando a duração do impulso se aproxima de um micro segundo, o efeito piezelétrico torna-se linear, devido ao curto tempo de aplicação em comparação com o tempo de relaxamento dos domínios.

Os principais materiais piezelétricos comerciais e as respectivas propriedades são listados na tabela 4. O PZT-4 utilizado normalmente em sistemas de limpeza por ultrassom e fisioterapia, PZT-8 em sistema de solda por ultrassom, PZT-5A em sensores e transdutores para ensaios não destrutivos e o PZT-5J e 5H para geradores de faísca por impacto (detonadores e *magic clicks*) e posicionadores respectivamente.

Tabela 4 - Principais materiais piezelétricos e seus respectivos valores constantes

Material	PZT-4	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H
Acoplamento mecânico K_p	0,6	0,5	0,61	0,6	0,63
Acoplamento mecânico K_{33}	0,68	0,63	0,7	0,71	0,73
Constante de carga piezelétrica d_{33} (10^{-12} C/N)	300	215	400	460	550
Constante de carga piezelétrica d_{33} (10^{-12} C/N)	-11,5	-9,5	-170	-210	-265
Constante de tensão piezelétrica g_{33} (Vmm/N)	26	25	25	22	19
Constante de tensão piezelétrica g_{31} (Vmm/N)	-11	-11	-11	-9	-9
Constante dielétrica relativa - K_3^T - $\epsilon_{33}^S/\epsilon_0$	1250	1000	1750	2450	3100
Fator de dissipação $\tan(\delta)$ (baixo campo)	0,004	0,004	0,02	0,02	0,02
Densidade ρ (Kg/m^3)	7600	7600	7650	7500	7500
Temperatura de Curie ($^{\circ}C$)	325	330	360	260	190
Fator de qualidade Q	500	1000	75	70	65
Complância mecânica s_{11}^E ($\times 10^{-12}$ m ² /N)	12	11	19	23	21
Complância mecânica s_{33}^E ($\times 10^{-12}$ m ² /N)	16	14	16	16	15
N_m (Hz - m) (modo planar)	2200	2270	1250	2000	1950
N_t (Hz - m) (modo espessura)	1905	2032	1800	1950	2000

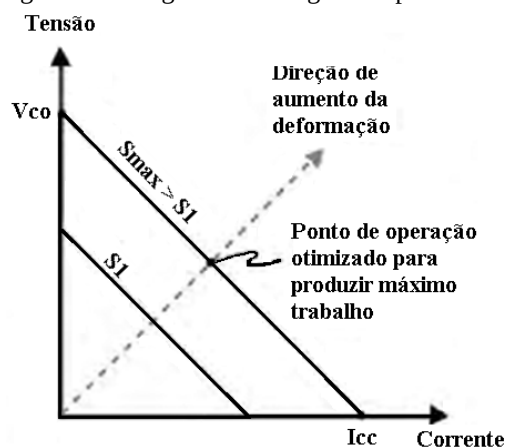
Fonte: Adaptado de Pereira (2010)

2.5 DESEMPENHO DO GERADOR

O gerador piezelétrico pode ser especificado em termos de sua corrente de curto-circuito e de sua tensão de circuito-aberto, como ilustrado na figura 15. A corrente de curto-circuito I_{cc} refere-se à corrente máxima e a tensão de circuito-aberto V_{co} refere-se à tensão máxima gerada. Para baixos valores de impedância elétrica a tensão é muito pequena, similar a um curto circuito, o que ocasiona uma elevada corrente. Em valores altos de impedância a tensão é muito alta, como se fosse um circuito em aberto, sendo a corrente neste caso muito baixa.

Este fato demonstra que existe um valor de impedância elétrica ótima, que proporciona uma maior quantidade de potência gerada pelo piezelétrico. A máxima extração de energia conforme conferido na teoria de circuitos (reta de carga) ocorre quando o gerador entrega a tensão requerida com a metade da corrente de curto-circuito (BOYLESTAD, 2004).

Figura 15 - Diagrama de um gerador piezelétrico



Fonte: Adaptado de *Piezo Company* (2011)

Em aplicações de extração e armazenamento de energia onde se tem um circuito de extração/retificação antes do armazenamento, é de suma importância que o gerador piezelétrico gere a máxima potência possível, de modo a obter uma maior eficiência do sistema.

Considerando o modelo elétrico do gerador piezelétrico em sua frequência de ressonância, o mesmo deverá obedecer ao teorema da máxima transferência de potência para que possa gerar a maior quantidade de energia possível. Ou seja, o valor da impedância da carga deve ser igual ao valor da impedância interna da fonte geradora (BOYLESTAD, 2004). A carga descrita pelo teorema será o circuito enxergado pela fonte, que neste caso é o circuito de extração de energia.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os equipamentos, dispositivos, circuitos eletrônicos e métodos utilizados para realização dos testes experimentais do sistema de geração, extração e armazenamento da energia elétrica proveniente de geradores piezelétricos (*buzzers* piezelétricos) excitados por deformações mecânicas ocasionadas por impactos.

No sistema de *power harvesting* proposto o gerador piezelétrico é constituído de PZTs colados sobre uma camada de borracha presa a uma estrutura de alumínio, que por sua vez sofrerá esforços mecânicos causado pelo atuador pneumático controlado eletronicamente por um circuito temporizador. Para o circuito de extração de energia elétrica (*harvesting*) será utilizado um CI retificador de onda completa e conversor DC-DC elevador (*boost*). É utilizado também um capacitor de capacitância razoável junto ao CI retificador como elemento de armazenamento da energia elétrica gerada pelos PZTs, sendo utilizados por possuírem menor tempo de carga que as baterias.

3.1 GERADOR PIEZELÉTRICO

O elemento piezelétrico utilizado (*buzzer* piezelétrico) presente principalmente em dispositivos de áudio (campainhas, alertas e transdutores) fora escolhido principalmente por ser de fácil aquisição e baixo custo, comercialmente vendido para empresas de componente e equipamentos eletrônicos. Além disso, constitui-se um atuador já pronto para uso, isto é, a cerâmica piezelétrica já está colada sobre um substrato de metal formando um conjunto atuador-membrana. (MURATTA, 2012)

Este piezelétrico (figura 16) possui uma estrutura fina em forma de disco, constituído por um disco cerâmico piezelétrico (PZT-5A) que dispõe de elétrodos adesivos (membrana de solução em gel) em ambos os lados, aplicados em uma chapa de metal (latão ou aço inoxidável, etc.). (MURATTA, 2012)

Figura 16 - Estrutura do diafragma piezelétrico



Fonte: Adaptado de Murata (2012)

As características mecânicas da cerâmica piezelétrica (PZT-5A) e da membrana metálica são apresentadas na tabela 5.

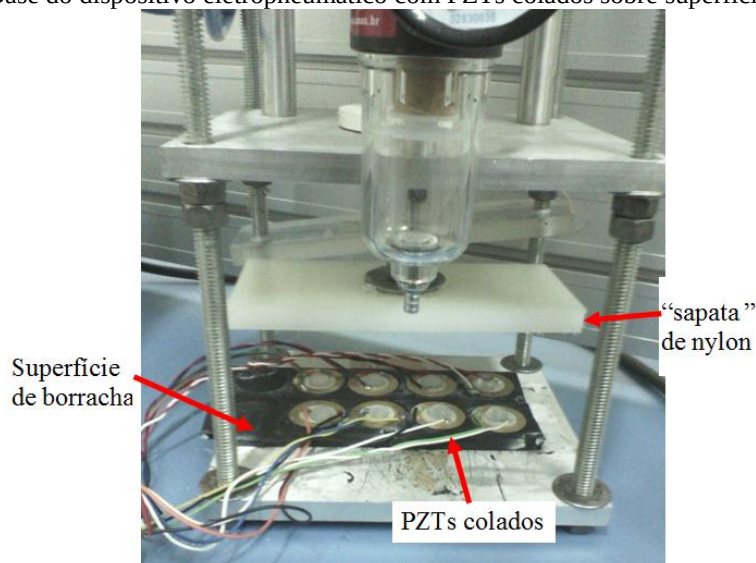
Tabela 5 - Principais características do buzzer piezelétrico PZT-5A

Material	Parâmetro	Valor	Simbologia
Latão	Coeficiente de Poisson	0,34	ν
	Módulo de elasticidade (GPa)	100 - 91	Y
	Densidade (Kg/m^3)	8600 - 8400	ρ
	Diâmetro (mm)	27	d
	Espessura (mm)	0,2	e
Material Piezelétrico	Constante dielétrica relativa K_3^T (Vmm/N)	830	$\epsilon_{33}^s/\epsilon_0$
	Constantes elásticas (módulo de elasticidade) 10^{10} (N/m^2)	12,10	c
		11,10	c_{33}^E
	Constante Piezelétrica (C/m^2)	15,8	e_{33}
	Acoplamento eletromecânico	0,6	K_p
	Densidade (Kg/m^3)	7650 - 7700	ρ
	Módulo de elasticidade (GPa)	65	Y
	Diâmetro (mm)	23	d
Membrana (Epoxy)	Espessura (mm)	0,2	e
	Coeficiente de Poisson	0,3	ν
	Módulo de elasticidade GPa	62,75	Y

Fonte: Adaptado de Murata (2012)

Os PZTs foram colados em uma superfície de borracha presa na base que sustenta o dispositivo eletropneumático simulador de impactos (figura 17). Essa técnica foi adotada pelo fato dos PZTs apresentarem respostas mais satisfatórias em termos de largura do sinal gerado do que se colados diretamente na base de alumínio ao serem submetidos ao impacto do pistão pneumático, resultando assim em uma maior geração de energia.

Figura 17 - Base do dispositivo eletropneumático com PZTs colados sobre superfície de borracha



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.2 ESFORÇO MECÂNICO APLICADO

Com o intuito de quantificar a intensidade do esforço mecânico aplicado e pressão aos quais os PZTs são submetidos foi construído um circuito de aquisição da intensidade de carga aplicada (figura 18), composto de uma célula de carga com viga em balanço e CI amplificador de instrumentação (Ina122p). O circuito é alimentado por uma fonte simétrica de 12 Vcc e apresenta saída em tensão variando de 0 Volts a 3 Vcc, proporcional a deformação da célula de carga. Mediante os testes realizados o circuito foi calibrado para uma carga máxima de 10 Kg, possuindo uma sensibilidade de 0,3 V/Kg.

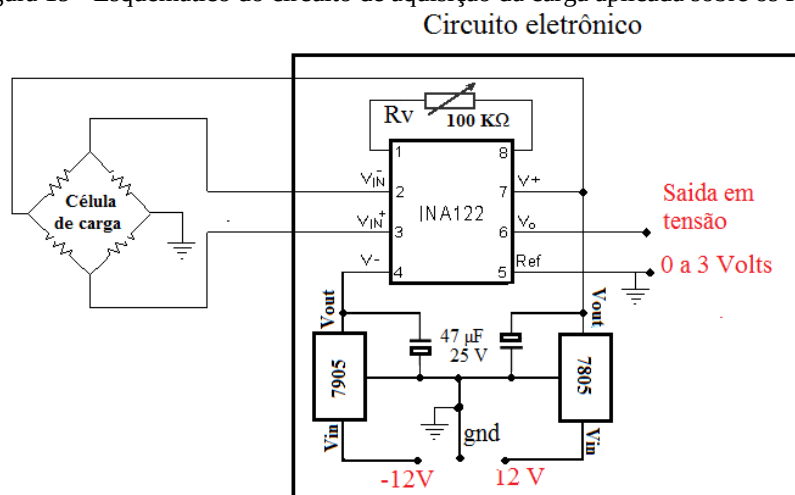
Figura 18 - Circuito de aquisição da intensidade de força aplicada sobre os PZTs



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A figura 19 ilustra os componentes empregados na confecção do circuito para medição de carga. O circuito é alimentado pelos reguladores de tensão 5 Vcc e -5 Vcc e mediante a deformação da célula de carga é enviado um sinal de tensão ao amplificador de instrumentação (Ina122p), o qual é amplificado e disponibilizado na saída com valor mínimo de tensão 0 Vcc para 0 Kg e valor máximo de 3 Vcc para 10 Kg. O circuito possui ainda um resistor variável (Rv) o qual possibilita o ajuste de ganho do amplificador, aumentando ou diminuindo sua sensibilidade em relação a entrada.

Figura 19 - Esquemático do circuito de aquisição da carga aplicada sobre os PZTs

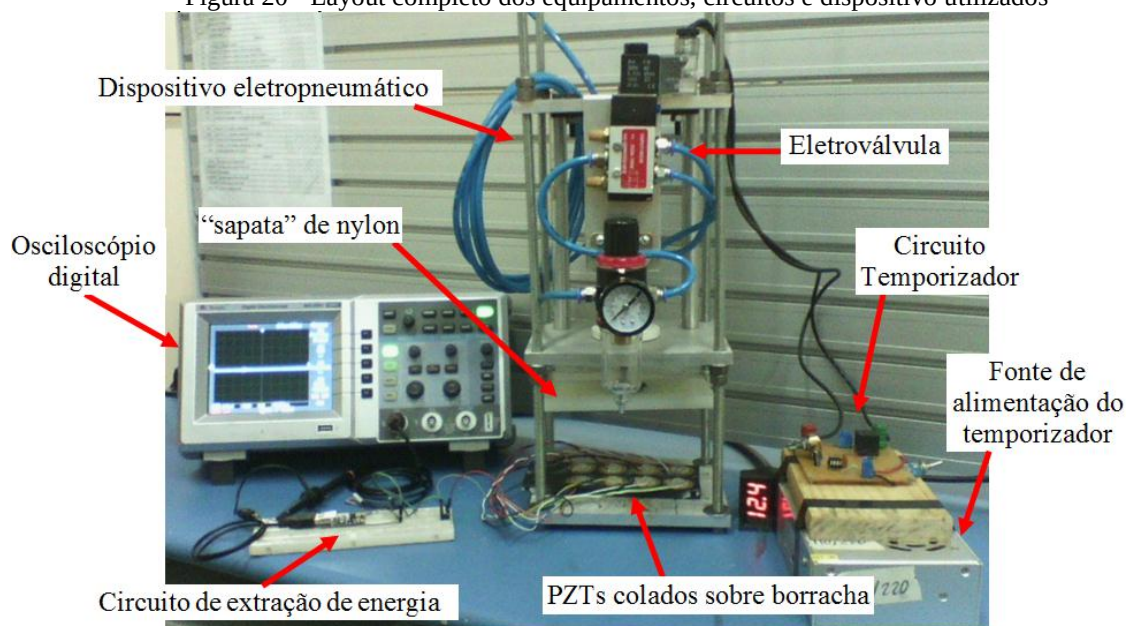


Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.3 DISPOSITIVO ELETROPNEUMÁTICO

Os circuitos eletrônicos de extração e dispositivos de armazenamento são alimentados eletricamente pelos piezelétricos dispostos sobre uma superfície de borracha, submetidos a impactos mecânicos por um atuador pneumático dotado de uma “sapata” de nylon retangular de 7 cm por 15 cm (figura 20) na ponta da haste, este atuador pneumático é controlado por um circuito temporizador confeccionado para esta finalidade e possui uma frequência de acionamento entre 0,5 Hz e 1 Hz. Esse dispositivo fora construído com objetivo de simular os impactos mecânicos causados pelo caminhar de pedestres e/ou tráfego de veículos, aos quais os PZTs serão submetidos, sendo 0,5 Hz e 1 Hz frequências razoáveis para esse tipo de aplicação.

Figura 20 - Layout completo dos equipamentos, circuitos e dispositivo utilizados



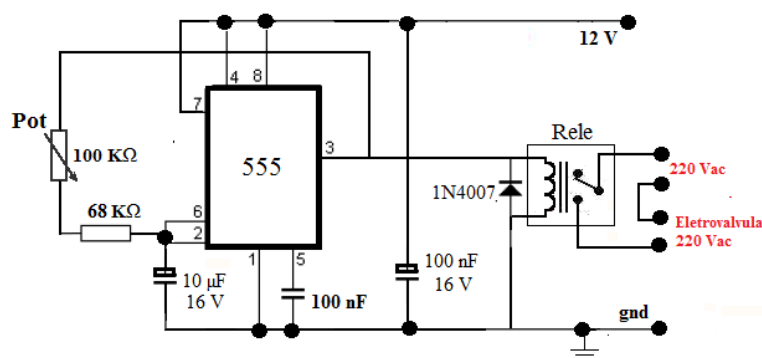
Fonte: Elaboração do próprio autor.

O dispositivo eletropneumático simulador de impacto construído é composto por um cilindro pneumático linear de dupla ação com diâmetro de 25 mm e curso igual a 100 mm, uma válvula solenoide 5/2 vias de recuo por mola alimentada a 220 Vac/25 mA e ainda uma unidade de conservação com filtro, regulador de pressão e manômetro, deve ser ressaltado que o sistema pneumático trabalha com pressão máxima de 100 PSI, sendo esta especificada pelo fabricante para que não ocorra danos aos elementos do mesmo.

Para o controle da frequência de acionamento do pistão pneumático fora elaborado um circuito temporizador de frequência variável, este circuito alimentado eletricamente por uma fonte 12 Vcc chaveia o circuito de alimentação da eletroválvula por meio de um rele, essa frequência de chaveamento é alterada pela manipulação do potenciômetro, podendo ser alterada entre 0,5 Hz e 1 Hz.

A figura 21 ilustra a representação do circuito temporizador utilizado para controle do pistão pneumático mediante ao acionamento elétrico da eletroválvula, podendo ser destacado o rele de chaveamento e potenciômetro (Pot) para ajuste da frequência de chaveamento.

Figura 21 - Esquemático do circuito temporizador de controle

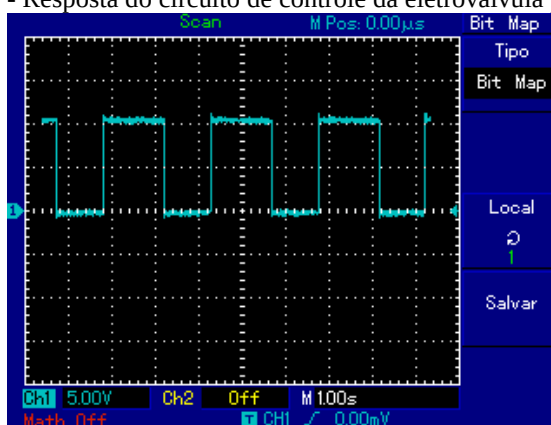


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas figuras 22 e 23 são ilustradas as respostas do circuito eletrônico utilizado no controle da eletroválvula, sendo para frequência mínima de 0,5 Hz e máxima de 1 Hz respectivamente.

Para a frequência mínima de aproximadamente 0,5 Hz tem-se um período de 2,4 segundos, sendo tempo em “off” igual a 1 segundo (41,66%) e tempo em “on” igual a 1,4 segundos (58,33%).

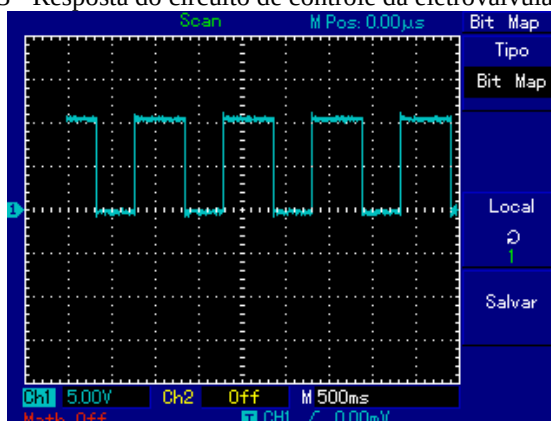
Figura 22 - Resposta do circuito de controle da eletroválvula para 0,5 Hz



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para a frequência máxima de aproximadamente 1 Hz tem-se um período de 1 segundos, sendo tempo em “off” igual a 0,45 segundo (45%) e tempo em “on” igual a 0,55 segundos (55%).

Figura 23 - Resposta do circuito de controle da eletroválvula para 1 Hz



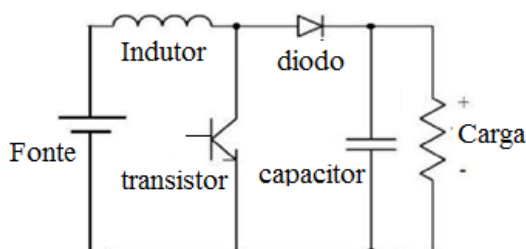
Fonte: Elaboração do próprio autor.

3.4 CIRCUITO DE EXTRAÇÃO

O circuito de extração proposto (figura 25) fora construído visando à utilização de componentes de baixo custo e consumo de energia elétrica, partindo deste princípio optou-se pelo CI retificador de onda completa (Db101) e conversor DC-DC (elevador/regulador 5V/600 mA), sendo este um dispositivo comercial de fácil aquisição montado em tecnologia SMD cuja finalidade é elevar/estabilizar a tensão na saída em 5 Volts).

Conversores DC-DC elevadores (*boost*) são circuitos eletrônicos utilizados em corrente contínua para elevação e estabilização da tensão em relação à amplitude de tensão da entrada, sendo muito utilizados em fontes chaveadas. Basicamente é constituído de diodo, indutor e semicondutor para chaveamento (transistor MOSFET, IGBT, BJT, etc), podendo ainda utilizar capacitor de saída como filtro (figura 24). Basicamente a elevação de tensão é conseguida com a frequência de chaveamento do indutor realizado pelo transistor, que armazena energia em forma de campo magnético liberando-a para a carga quando o transistor está em aberto. (BARBIE, 2006)

Figura 24 – Representação básica de um conversor DC-DC elevador (*boost*)



Fonte: Adaptado de Barbi (2006)

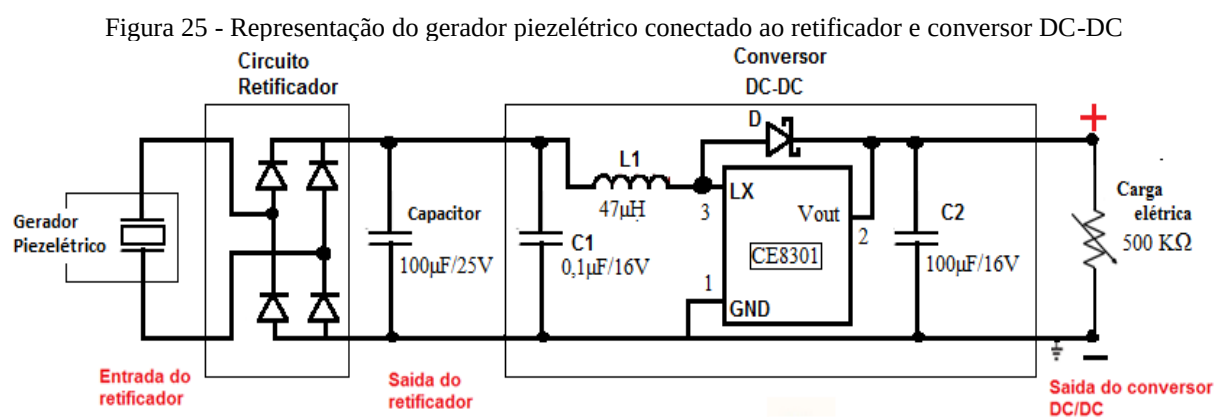
Neste projeto o conversor é utilizado para elevação e regulação de tensão na saída em 5 Volts mediante a possíveis variações na entrada, podendo este estar entre 0,6 Volts/300 uA e 5,5 Volts/10uA. Isso se justifica pelo fato de muitos circuitos microcontrolados e sensores

de baixo consumo operar com essa tensão, sendo este capaz de carregar baterias para essa finalidade.

Para que sejam quantificadas as grandezas em termos de potência, tensão, corrente e eficiência energética com o circuito completo utilizou-se como carga um resistor variável de 500 K Ω (*trimpot*).

Com esta configuração é possível realizar a extração de energia proveniente dos piezelétricos na forma pulsada, retificar esse sinal com o retificador (Db 101) e envia-lo para o circuito elevador/conversor DC-DC que estabiliza a tensão na saída em 5 Volts.

A figura 25 ilustra o esquemático do circuito de extração de energia elétrica utilizado, donde é destacado o circuito integrado CE8301 do conversor DC-DC, sendo o componente responsável pela regulação e elevação da tensão de saída mediante ao chaveamento do indutor.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os testes experimentais apresentados no capítulo 4 são realizados primeiramente com o circuito retificador de onda completa (Db 101) e capacitor de armazenamento (100µF/25V), quantificando em qual situação os PZTs mediante a variação de parâmetros mecânicos e elétricos apresentam resultados mais significativos. Em um segundo momento será analisado o circuito completo donde serão quantificadas grandezas elétricas (potência, tensão e corrente) e eficiência máxima do sistema mediante a uma carga elétrica aplicada.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo serão apresentados por meio de gráficos e tabelas os resultados obtidos através das análises do circuito retificador de onda completa (Db101) e retificador com conversor DC-DC *boost* (elevador), mediante as variações de configurações elétricas e parâmetros mecânicos aos quais os PZTs são submetidos por meio do aparato experimental descrito no capítulo 3.

Os dados são obtidos com osciloscópio digital (MO 2061 - Minipa) para as formas de onda da tensão nos piezelétricos, saída do retificador, tensão no capacitor em função do tempo e corrente na saída mediante as variações de duas frequências de acionamento do pistão pneumático (0,5 Hz e 1 Hz). Foram testadas ainda três quantidades de geradores piezelétricos (2, 4 e 8) sendo conectados em série e paralelo, com o intuito de verificar qual configuração é mais eficiente. Por fim é feita uma estimativa da energia gerada mediante as configurações, frequências de excitação e quantidades de PZTs testados, bem como quantificadas as grandezas elétricas do circuito completo referentes à potência, tensão e corrente e eficiência do sistema completo.

A energia extraída é armazenada no primeiro momento em um capacitor na configuração com retificador de onda completa de modo que seja possível de se obter os valores de tensão, corrente, energia e potência elétrica, possibilitando posteriormente efetuar relações dessas grandezas com a quantidade, área que os PZTs ocupam e pressão exercida sobre os mesmos.

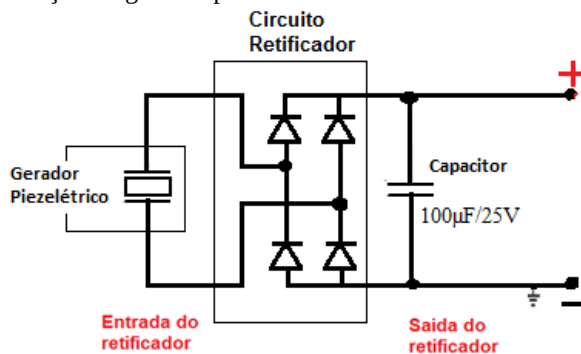
4.1 CIRCUITO RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

Os testes realizados com o circuito retificador de onda completa são divididos em duas etapas, no primeiro momento mantendo a mesma intensidade de força aplicada sobre os PZTs são analisados mediante a variação de quantidade (2, 4 e 8), ligação em série e paralelo, impacto com frequências de 0,5 Hz e 1 Hz, valores de tensão obtida na carga do capacitor ao longo do tempo e consequentemente os valores para corrente, potência e energia armazenada. No segundo momento serão repetidos os testes para a obtenção das grandezas mencionadas mediante as mesmas características já empregadas, sendo neste caso mantida a mesma pressão mecânica aplicada sobre os PZTs e utilizada somente a configuração de ligação em paralelo.

Essas análises têm com propósito principal quantificar para qual situação são obtidos resultados mais significativos.

A figura 26 ilustra a configuração do circuito montado com gerador piezelétrico conectado ao circuito retificador de onda completa (Db101) e ao capacitor de armazenamento, sendo ressaltado que os valores de tensão serão adquiridos por osciloscópio digital.

Figura 26 - Representação do gerador piezelétrico conectado ao retificador de onda completa



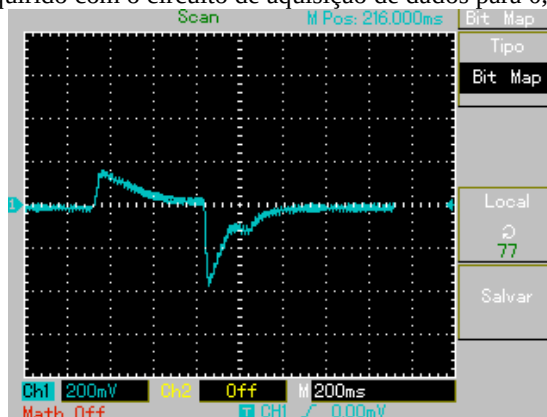
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.1.1 Resultados com mesma intensidade de carga (0,53 Kg)

Mantendo a mesma intensidade de carga (0,53 Kg) aplicada sobre os PZTs através da “sapata” de nylon do atuador pneumático foram obtidas as curvas de tensão com e sem retificador para duas faixas de acionamento do atuador pneumático (0,5 Hz e 1 Hz), configurações em série e paralelo e diferentes quantidades de PZTs utilizadas (2, 4 e 8).

Utilizando o circuito de aquisição com célula de carga descrito no capítulo 3 quantificou-se a intensidade da força aplicada sobre as respectivas quantidades de PZTs. Segundo a resposta de aproximadamente 0,16 Volts apresentada na figura 27 e tendo o circuito uma sensibilidade de 0,3 V/Kg, tem-se uma intensidade de carga de aproximadamente 0,53 Kg.

Figura 27 - Sinal adquirido com o circuito de aquisição de dados para 0,53 Kg (5,22 Newtons)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

De posse da intensidade de carga encontrada e área de contato dos PZTs com a “sapata” de nylon calculou-se as pressões aos quais os mesmo são submetidos.

1º caso: Para 2 PZTs, esforço máximo de 0,53 Kg, área de contato com 1,57 cm² se obteve uma pressão de aproximadamente 3,33 N/cm².

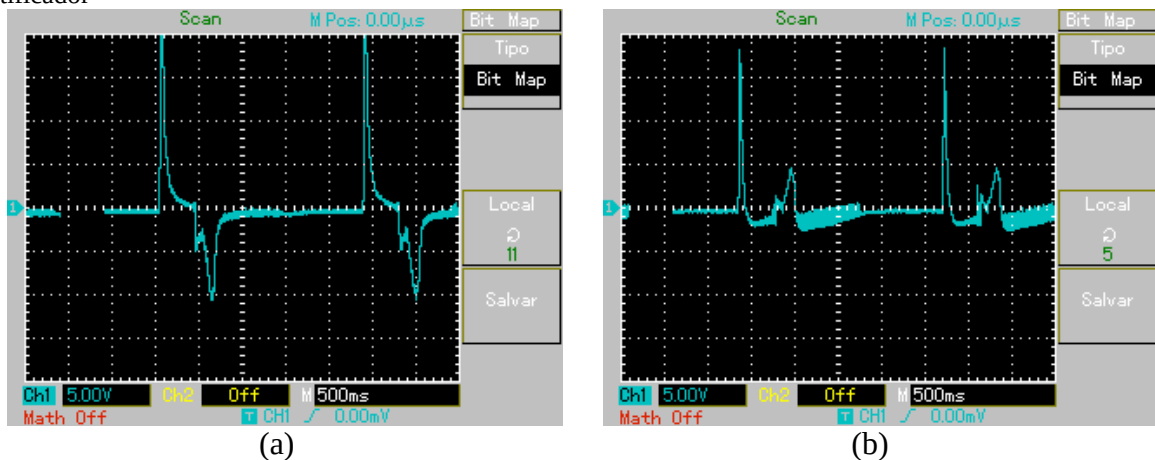
2º caso: Para 4 PZTs, esforço máximo de 0,53 Kg, área de contato com 3,14 cm² se obteve uma pressão de aproximadamente 1,66 N/cm².

3º caso: Para 8 PZTs, esforço máximo de 0,53 Kg, área de contato com 6,28 cm² se obteve uma pressão de aproximadamente 0,83 N/cm².

Nas figuras de 28 a 39 são ilustrados as respostas dos PZTs sem e com circuito retificador de onda completa, sendo estas para a situação onde se tem a mesma intensidade de carga aplicada (0,53 Kg).

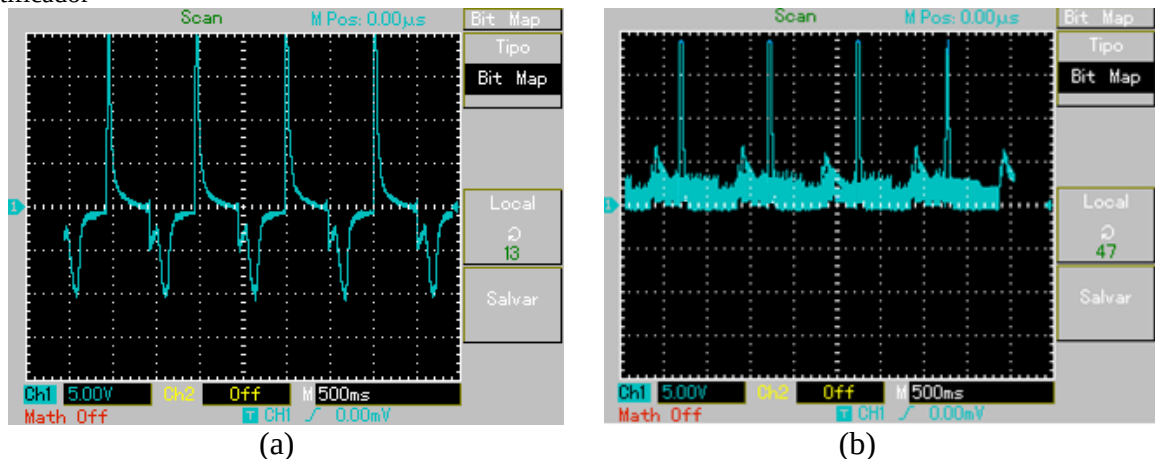
Nas figuras de 28 a 31 são ilustradas as respostas para 2 PZTs em aberto e com circuito retificador, configuração série e paralelo e com frequências de acionamento iguais a 0,5 Hz e 1 Hz, respectivamente.

Figura 28 - Respostas de 2 PZTs em série excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 29 - Respostas de 2 PZTs em série excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 30 - Respostas de 2 PZTs em paralelo excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador

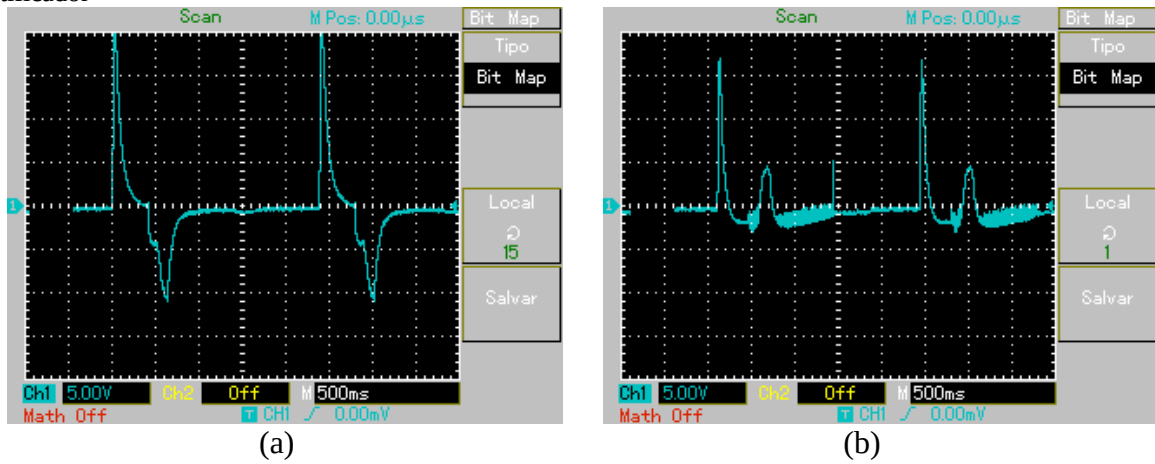
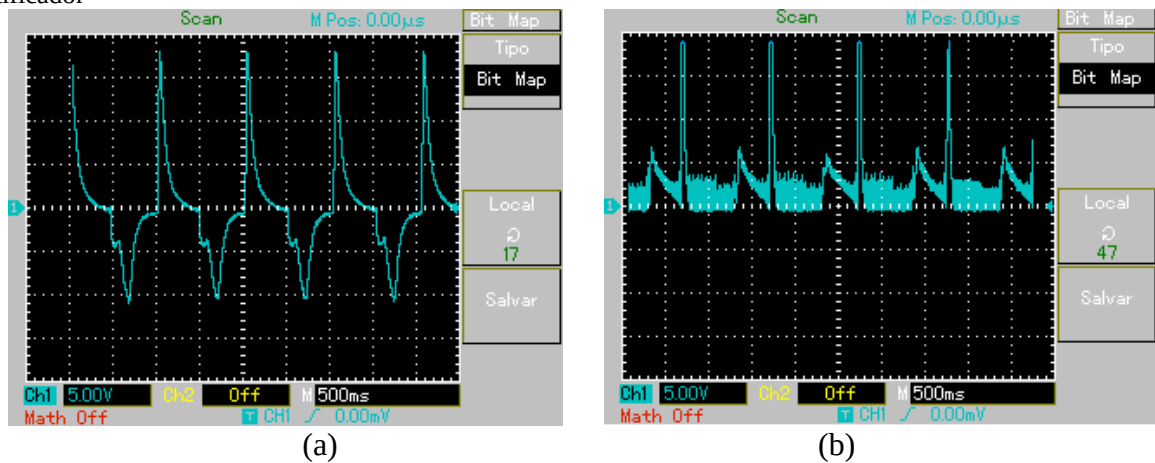
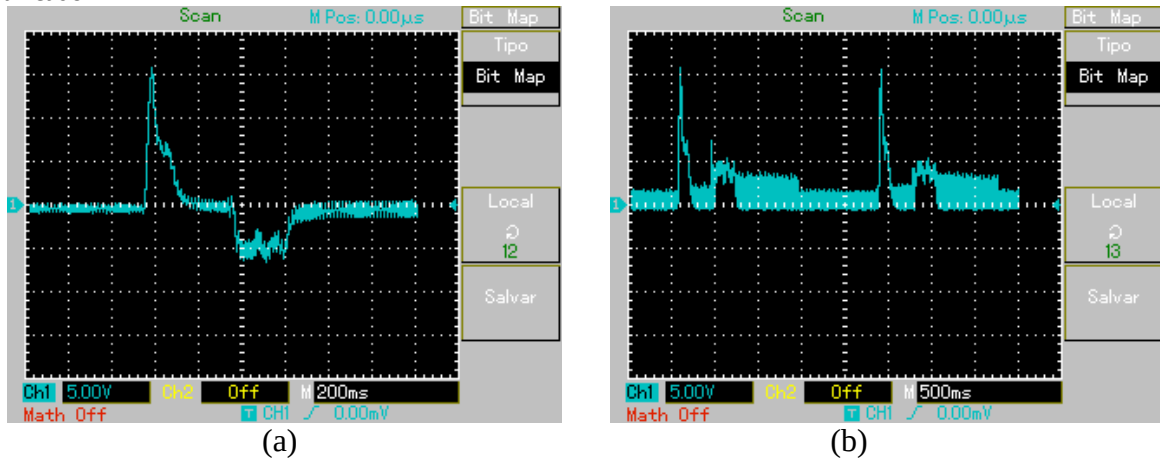


Figura 31 - Respostas de 2 PZTs em paralelo excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador



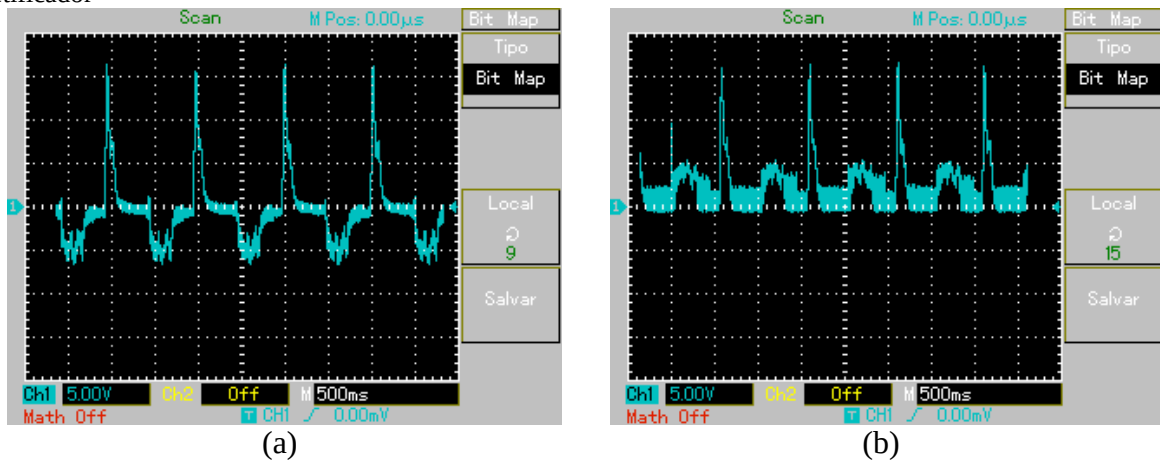
Nas figuras de 32 a 35 são ilustradas as respostas para 4 PZTs em aberto e com retificador, configuração série e paralelo com frequências de acionamento de 0,5 Hz e 1 Hz, respectivamente.

Figura 32 - Respostas de 4 PZTs em série excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador



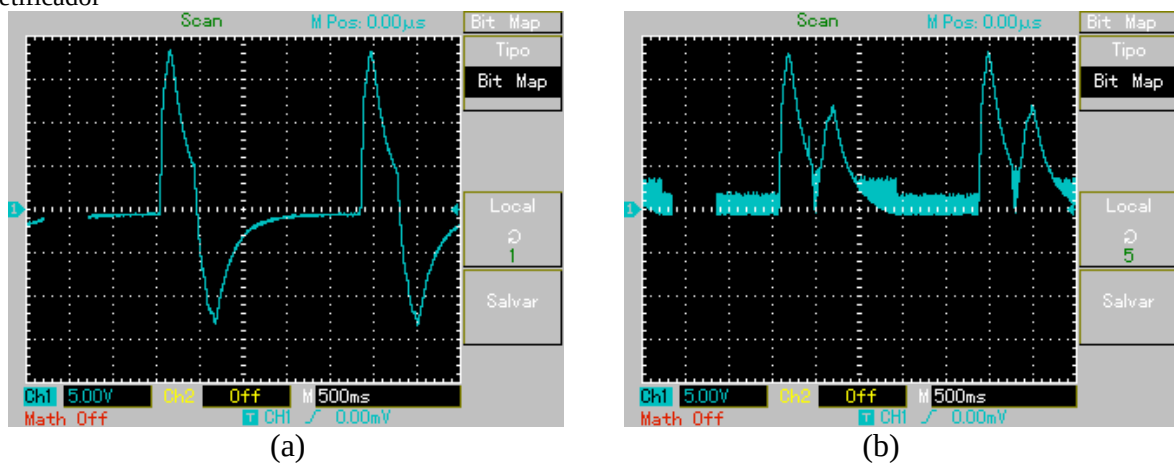
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 33 - Respostas de 4 PZTs em série excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador



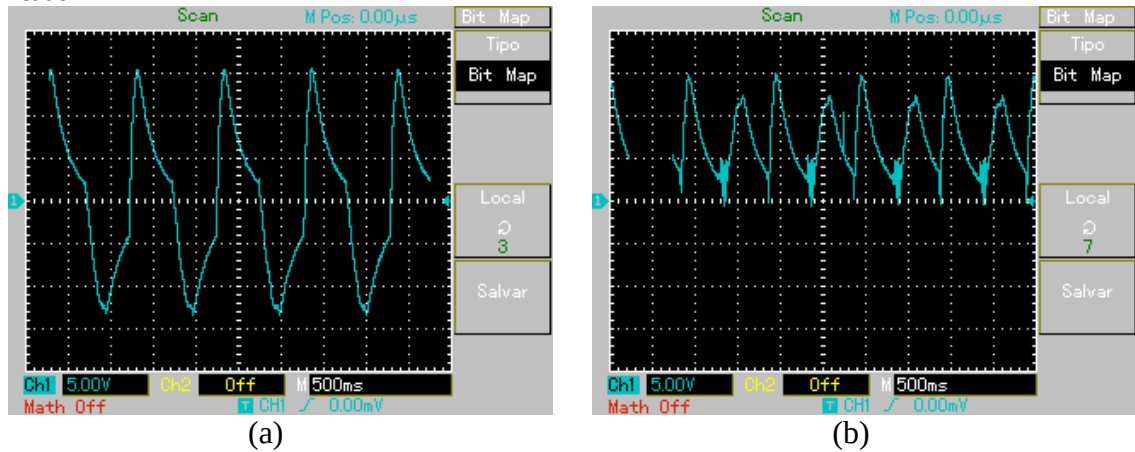
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 34 - Respostas de 4 PZTs em paralelo excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

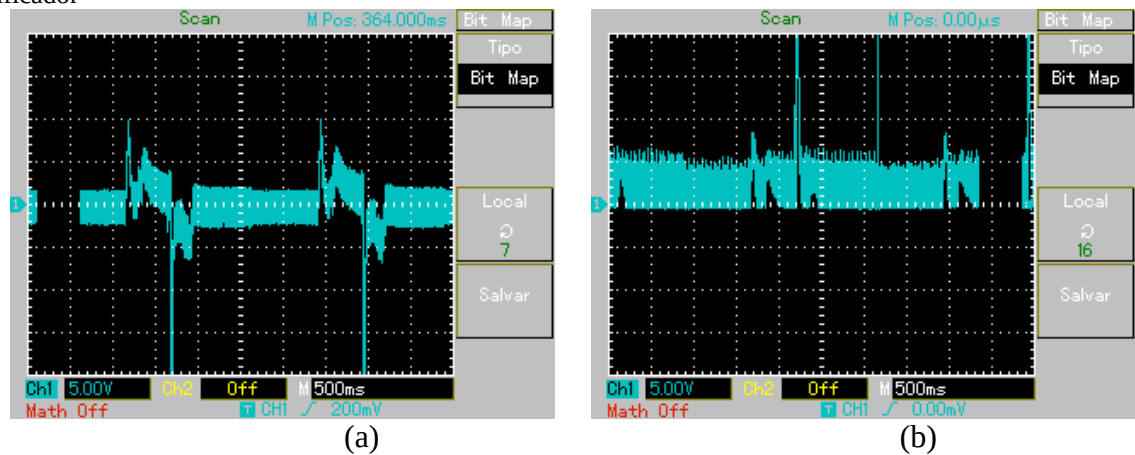
Figura 35 - Respostas de 4 PZTs em paralelo excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

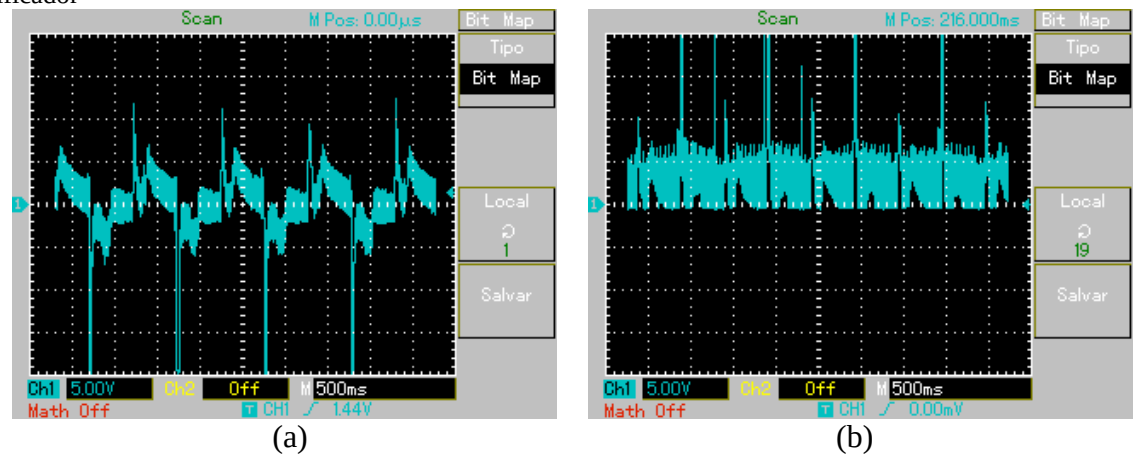
Nas figuras de 36 a 39 são ilustradas as respostas para 8 PZTs em aberto e com retificador, configuração série e paralelo com frequências de acionamento de 0,5 Hz e 1 Hz, respectivamente.

Figura 36 - Respostas de 8 PZTs em série excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador



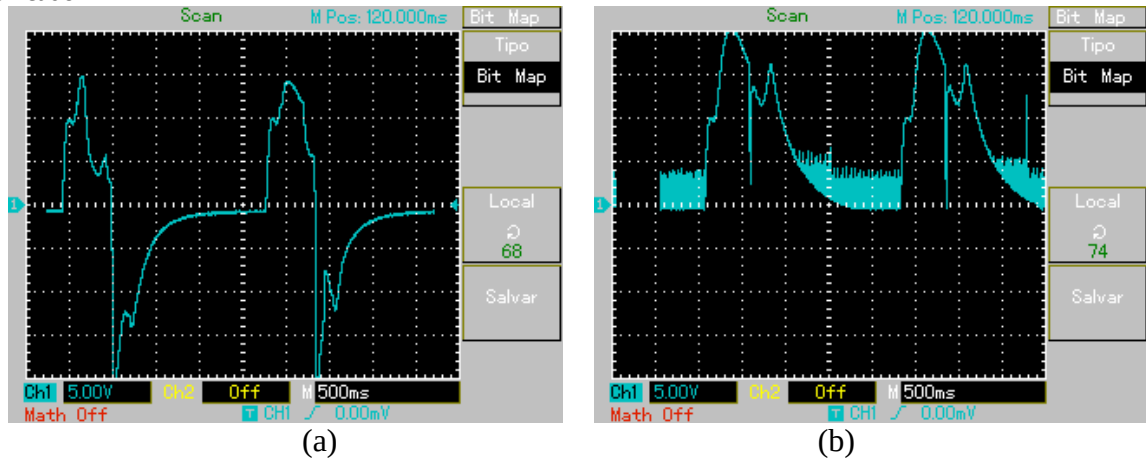
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 37 - Respostas de 8 PZTs em série excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador



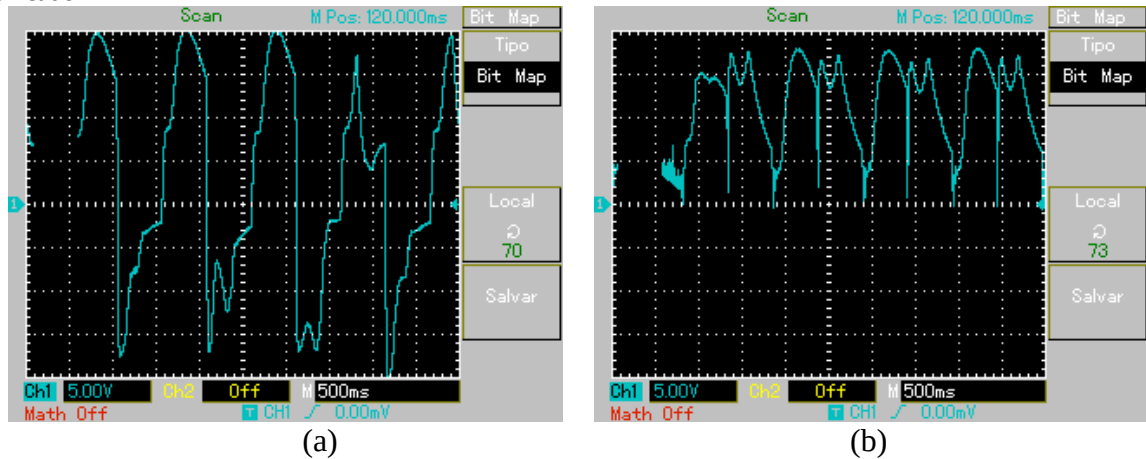
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 38 - Respostas de 8 PZTs em paralelo excitados com frequência de 0,5 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

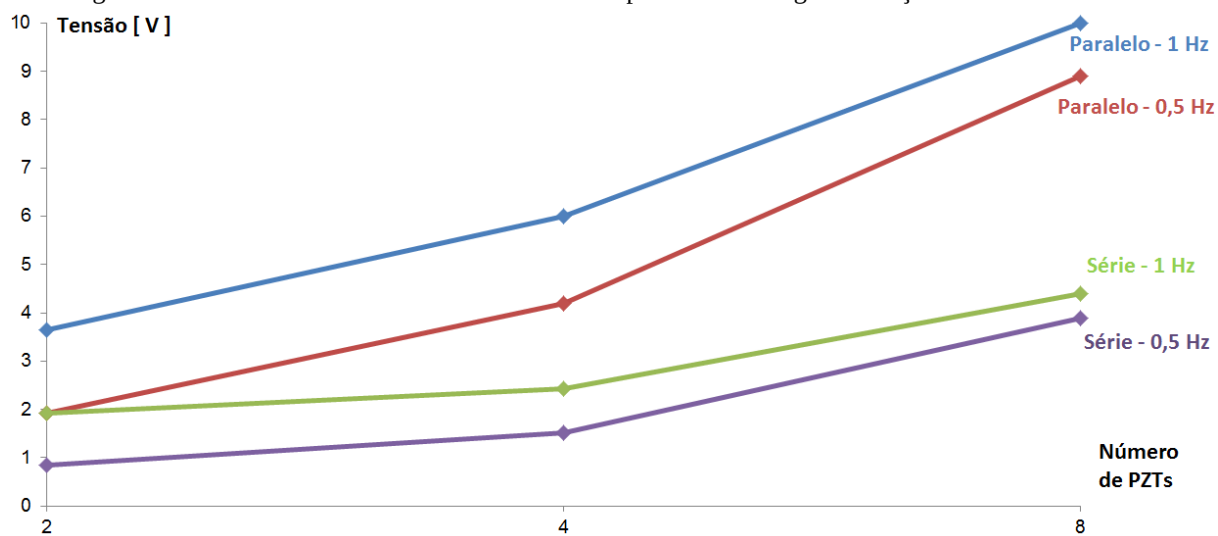
Figura 39 - Respostas de 8 PZTs em paralelo excitados com frequência de 1 Hz: (a) sem retificador; (b) com retificador



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

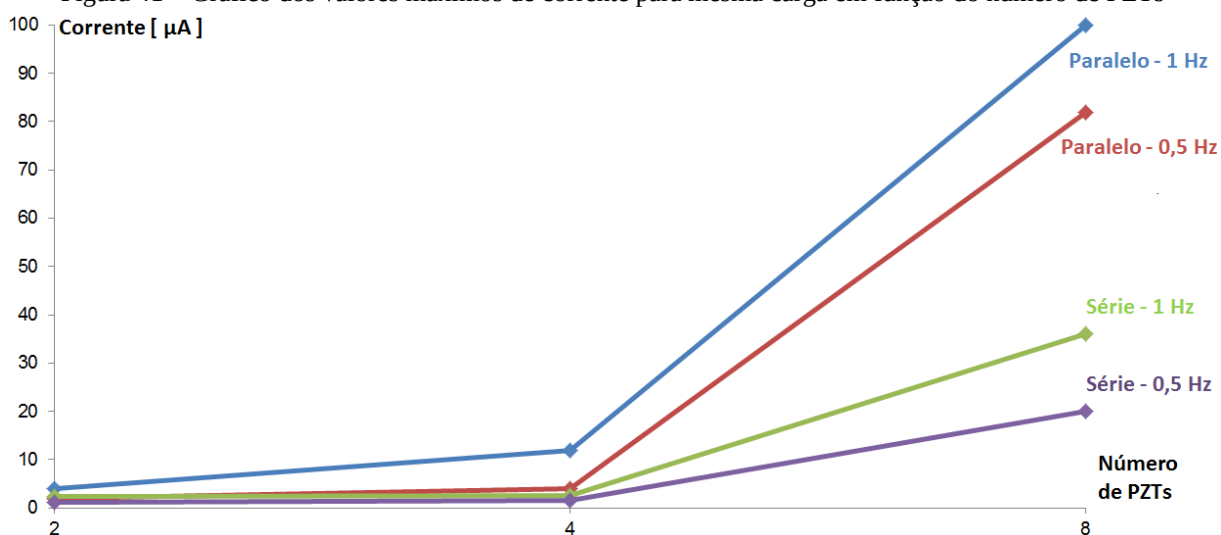
Nas figuras de 40 a 43 são ilustradas para melhor visualização os valores obtidos através das aquisições de dados realizadas para tensão, corrente, potência e energia acumulada no capacitor com tempo máximo de 5 minutos para as diferentes configurações e parâmetros testados.

Figura 40 – Gráfico dos valores máximos de tensão para mesma carga em função do numero de PZTs



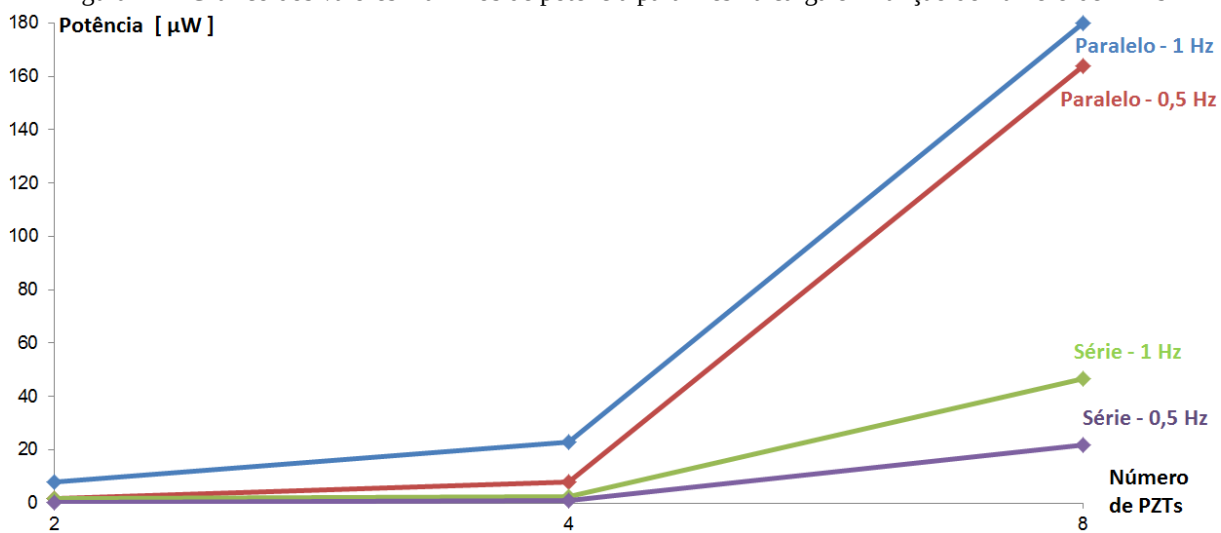
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 41 – Gráfico dos valores máximos de corrente para mesma carga em função do numero de PZTs

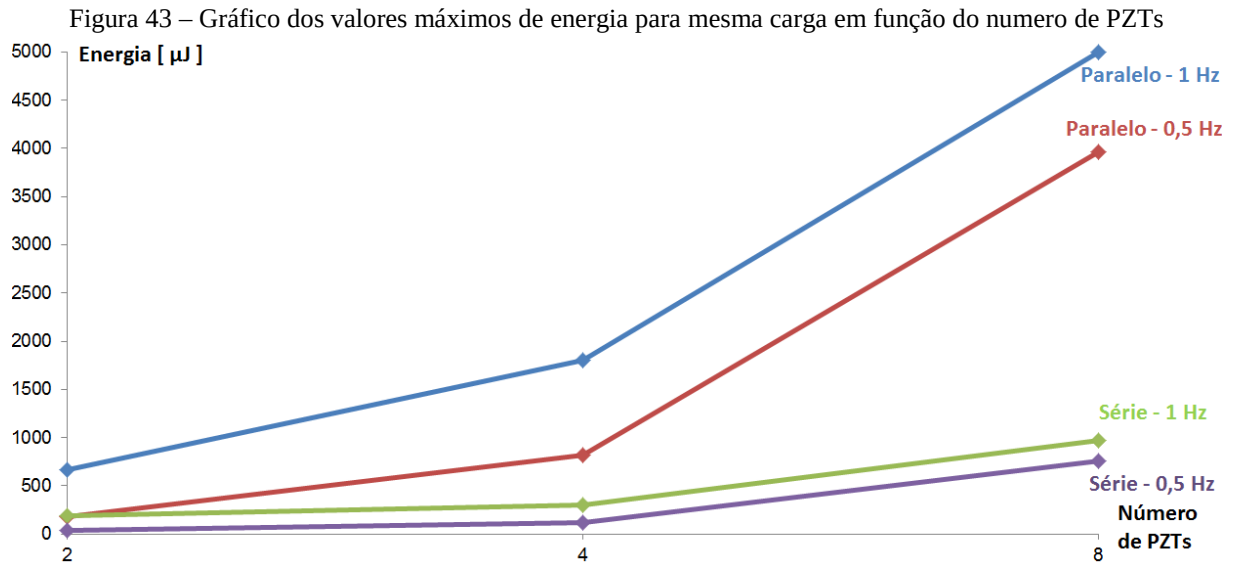


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 42 – Gráfico dos valores máximos de potência para mesma carga em função do numero de PZTs



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A tabela 6 apresenta os valores instantâneos obtidos através das aquisições de dados realizadas para tensão, corrente, potência e energia acumulada no capacitor com tempo máximo de 5 minutos para as diferentes configurações e parâmetros testados.

Tabela 6 - Valores máximos de tensão, carga, potência e energia acumulada no capacitor para um tempo de carga igual a 5 minutos

	2 PZTs Série		2 PZTs Paralelo		4 PZTs Série		4 PZTs Paralelo		8 PZTs Série		8 PZTs Paralelo	
Frequência (Hz)	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Tensão (V)	0,84	1,93	1,92	3,65	1,52	2,44	4,2	6	3,9	4,4	8,9	10
Corrente (µA)	1,10	2,40	2	4	1,6	2,6	4	12	20	36	82	100
Potência (µW)	0,32	1,74	1,85	8,07	0,91	2,40	8,10	23	22	46,8	164	180
Energia (µJ)	35,2	186,2	184,3	666,1	115,5	297,6	822	1800	760,5	968	3960	5000

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Foram realizadas ainda algumas relações para tensão, corrente e potência em função do número de PZTs, área e pressão considerando a força de 5,22 Newtons sobre os PZTs com as respectivas áreas e pressões (1,57 cm² e 3,33 N/cm²) para 2 PZTs, (3,14 cm² e 1,66 N/cm²) para 4 PZTs e (6,28 cm² e 0,83 N/cm²) para 8 PZTs, sendo apresentados na tabela 7. Essas relações se fazem importantes para quantificar em valores unitários as grandezas analisadas e poder realizar uma estimativa de geração supondo um sistema de maiores proporções.

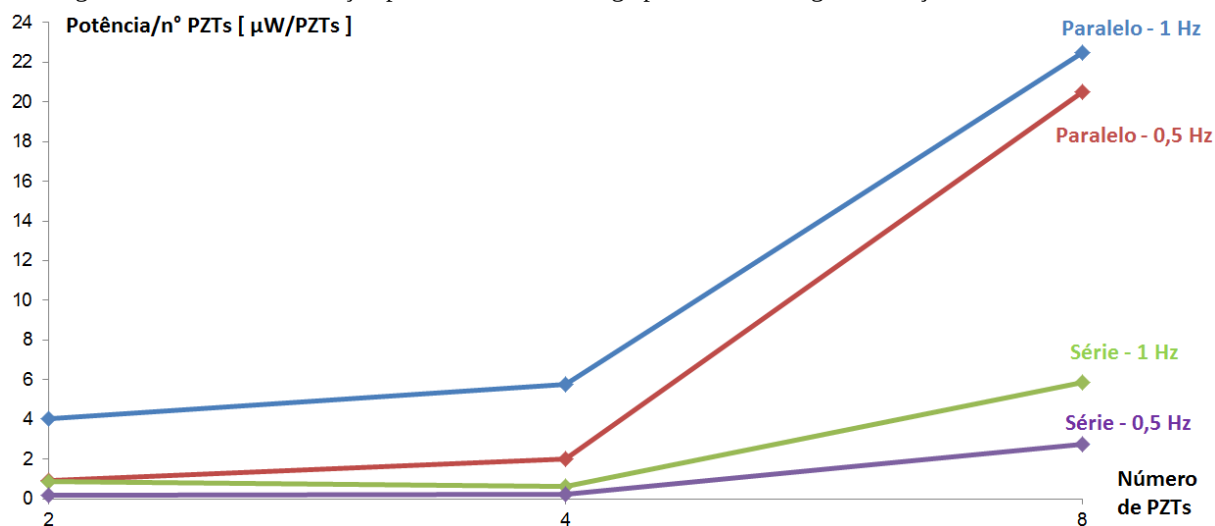
Tabela 7 - Valores máximos de tensão, corrente e potência em função da área e da pressão

	2 PZTs Série		2 PZTs Paralelo		4 PZTs Série		4 PZTs Paralelo		8 PZTs Série		8 PZTs Paralelo	
Frequência Hz	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Tensão/n° PZTs V/PZTs	0,42	0,96	0,96	1,82	0,38	0,61	1,05	1,5	0,48	0,55	1,11	1,25
Corrente/n° PZTs $\mu\text{A}/\text{PZTs}$	0,55	1,2	1	2	0,4	0,65	1	3	2,5	4,5	10	13
Potência/n° PZTs $\mu\text{W}/\text{PZTs}$	0,16	0,87	0,93	4,04	0,23	0,6	2,02	5,75	2,75	5,85	20,5	22,5
Tensão/Área V/cm^2	0,53	1,22	1,22	2,32	0,48	0,77	1,34	1,91	0,62	0,7	1,42	1,59
Corrente/Área $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0,7	1,5	1,3	2,5	0,51	0,83	1,3	3,8	3,2	5,7	13	16
Potência /Área $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	0,2	1,11	1,18	5,14	0,29	0,76	2,58	7,34	3,5	7,45	26,1	28,7
Tensão/Pressão $\text{V}/(\text{N}/\text{cm}^2)$	0,25	0,58	0,57	1,11	0,92	1,47	2,53	3,16	4,7	5,3	10,7	12,1
Corrente/Pressão $\mu\text{A}/(\text{N}/\text{cm}^2)$	0,33	0,72	0,6	1,2	0,96	1,56	2,4	7,23	24,1	43,37	98,8	120,48
Potência /Pressão $\mu\text{W}/(\text{N}/\text{cm}^2)$	0,09	0,52	0,55	2,42	0,55	1,45	4,88	13,85	26,5	56,38	197,6	216,86

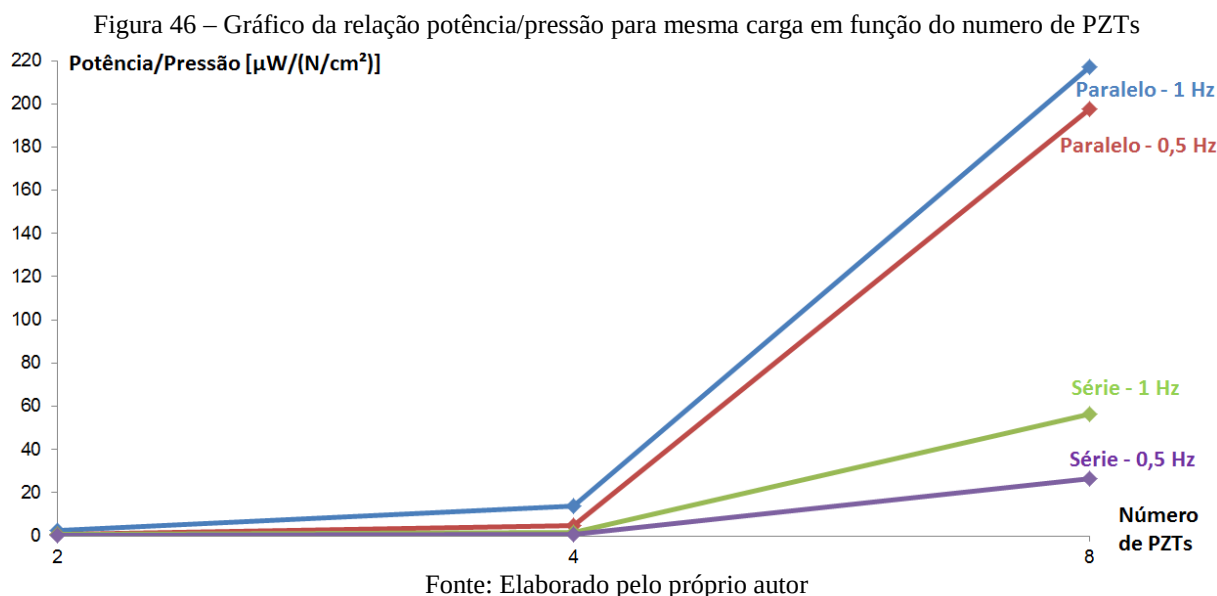
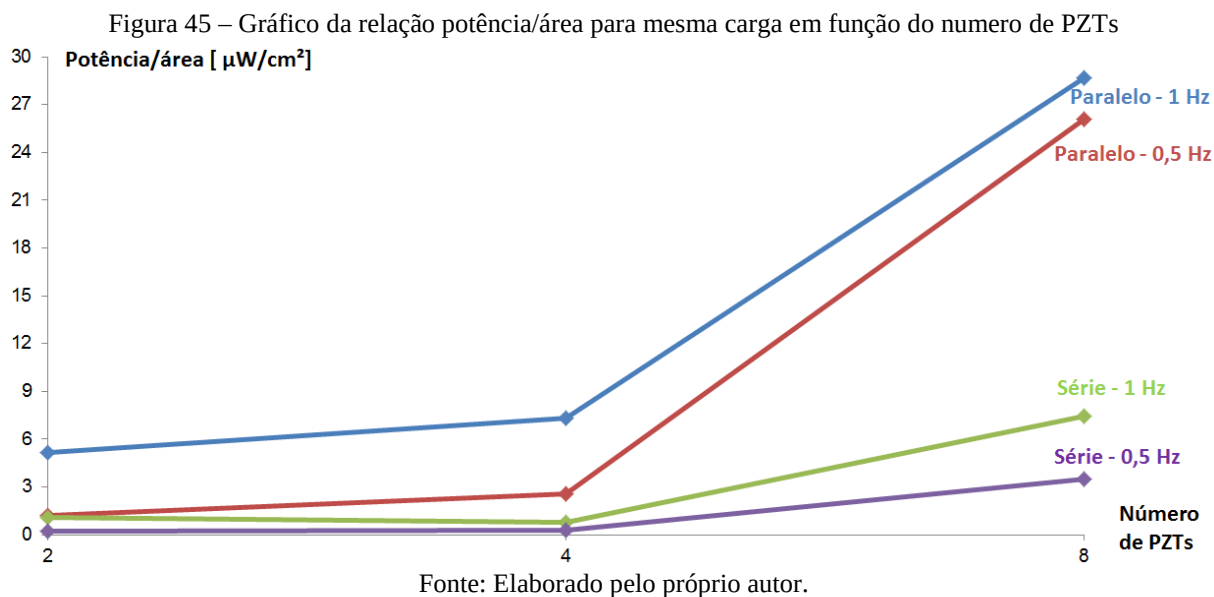
Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Nas figuras de 44 a 46 são ilustradas para melhor visualização os valores obtidos de potência em função do número de PZTs, área e pressão considerando a força de 5,22 Newtons.

Figura 44 – Gráfico da relação potência/n° PZTs carga para mesma carga em função do numero de PZTs



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



Discussões

Mediante os resultados apresentados conclui-se que:

Os resultados de maior expressão em termos de tensão, corrente, potência e energia armazenada no capacitor para a mesma intensidade de força aplicada foram alcançadas para excitação de 1 Hz, maior quantidade de geradores (8 PZTs) e conectados em paralelo.

Em relação à quantidade de PZTs (2, 4 e 8) para uma mesma frequência de excitação (0,5 Hz ou 1 Hz) e configuração de ligação (série ou paralelo), as respostas não são lineares, ou seja, dobrando a quantidade de PZTs ou a frequência de excitação os valores não dobram, mas, em sua maioria permanecem próximos a uma proporção. Onde a configuração em paralelo apresenta relações mais lineares do que as em série em função da variação de frequência de excitação.

Os dados dispostos graficamente e na tabela 6 ressaltam que a configuração em paralelo apresentou também maiores variações entre valores para a frequência de 0,5 Hz e 1 Hz, sendo 1,8 Volts para 4 PZTs, 18 μ A para 8 PZTs e 16 μ W também para 8 PZTs. Já a configuração em série as maiores variações são de 1,09 V para 4 PZTs, 16,4 μ A para 8 PZTs e 44 μ Watts também para 8 PZTs.

De um modo geral os valores dispostos na tabela 7 seguem a mesma tendência dos valores obtidos experimentalmente, ou seja, os valores mais significativos são para excitação de 1 Hz, maior quantidade de geradores (8 PZTs) e conectados em paralelo. Em relação à quantidade de PZTs (2, 4 e 8) para uma mesma frequência de excitação (0,5 Hz ou 1 Hz) e configuração de ligação (série ou paralelo), as relações em maioria são mais próximas quando utilizados 2 e 4 PZTs sendo mais expressivos ainda em paralelo, já para 8 PZTs as relações se afastam consideravelmente.

4.1.2 Resultados com pressão constante (3,33 N/cm²)

Neste caso será mantida a mesma pressão mecânica (3,33 N/cm²) sob os quais os PZTs estão submetidos mediante os impactos ocasionados pela “sapata” de nylon do atuador pneumático independentemente da quantidade utilizada, sendo para tanto alterado a intensidade de força aplicada mediante a regulação de altura da base do dispositivo que sustenta o atuador pneumático.

Neste caso se tem como propósito principal quantificar se os valores obtidos se comportam de maneira linear ou com relações próximas entre si para uma mesma pressão mecânica, variando quantidades de PZTs e frequências de impacto.

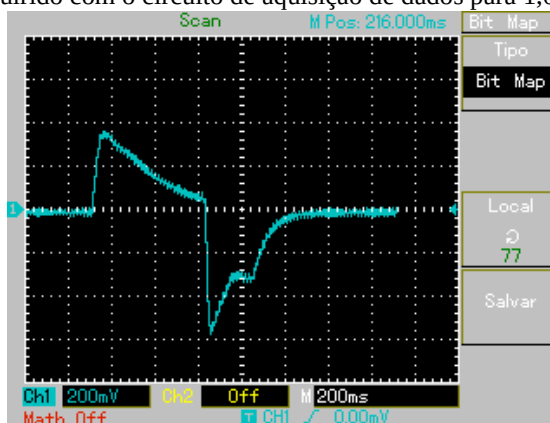
São obtidos valores com retificador para duas faixas de acionamento do atuador pneumático (0,5 Hz e 1 Hz), configurações em paralelo e diferentes quantidades de PZTs utilizadas (2, 4 e 8).

O intuito é quantificar as grandezas físicas anteriormente citadas (tensão, corrente, potência e energia) em função da mesma pressão mecânica aplicada sobre os PZTs, independentemente da quantidade empregada, ou seja, à medida que se aumenta a quantidade de PZTs se aumenta a força aplicada sobre os mesmos para que a pressão permaneça sempre constante.

Utilizando o circuito de aquisição com célula de carga descrito no capítulo 3 quantificou-se a intensidade da força aplicada sobre as respectivas quantidades de PZTs.

A resposta do circuito de aquisição de força apresentada na figura 47 para 4 PZTs de aproximadamente 0,32 Volts tendo o circuito uma sensibilidade de 0,3 V/Kg corresponde a uma intensidade de carga de aproximadamente 1,07 Kg (10,45 N).

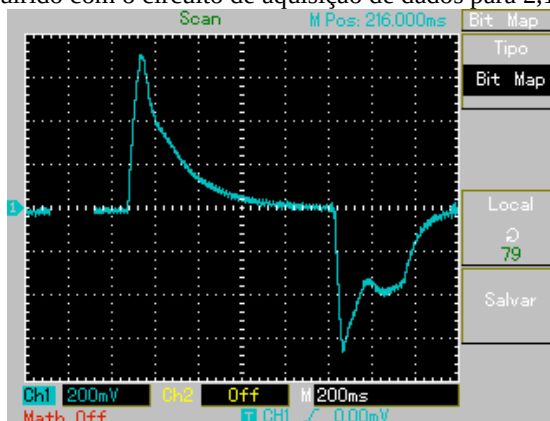
Figura 47 - Sinal adquirido com o circuito de aquisição de dados para 1,07 Kg (10,45 Newtons)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A resposta do circuito de aquisição de força apresentada na figura 48 para 8 PZTs de aproximadamente 0,64 Volts tendo o circuito uma sensibilidade de 0,3 V/Kg corresponde a uma intensidade de carga de aproximadamente 2,13 Kg (20,98 N).

Figura 48 - Sinal adquirido com o circuito de aquisição de dados para 2,13 Kg (20,98 Newtons)



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os testes foram refeitos somente para as configurações em paralelo (tabela 8), por apresentarem como já visto anteriormente resultados mais significativos.

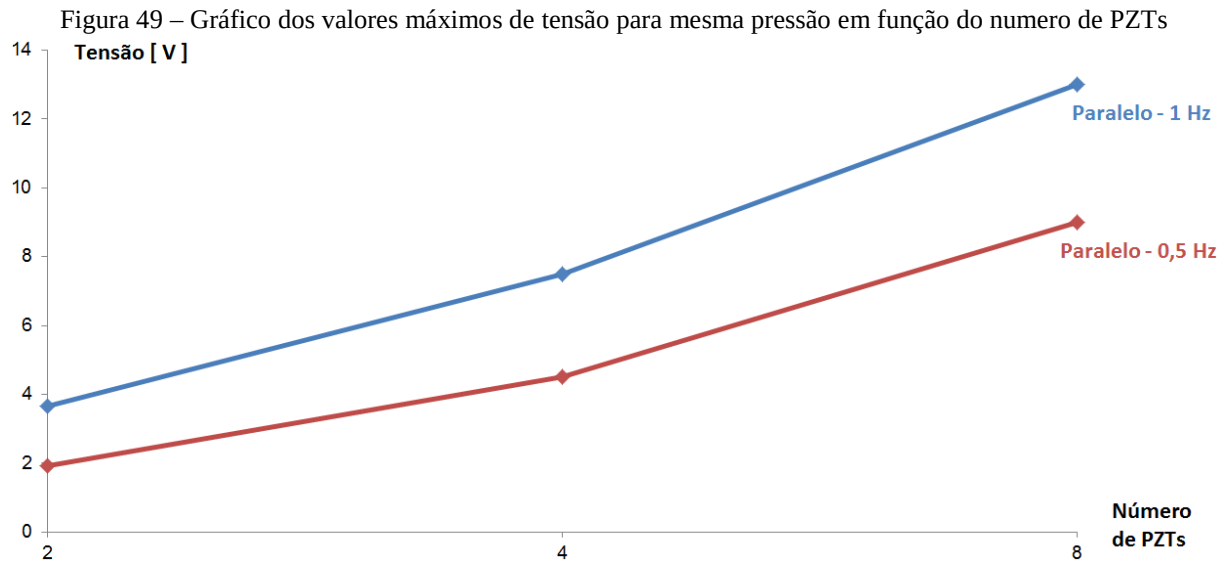
De maneira resumida tem-se:

1º caso: Para 2 PZTs, com pressão máxima de 3,33 N/cm², área de contato com 1,57 cm² se obteve uma intensidade de carga igual a 0,53 Kg (5,22 N).

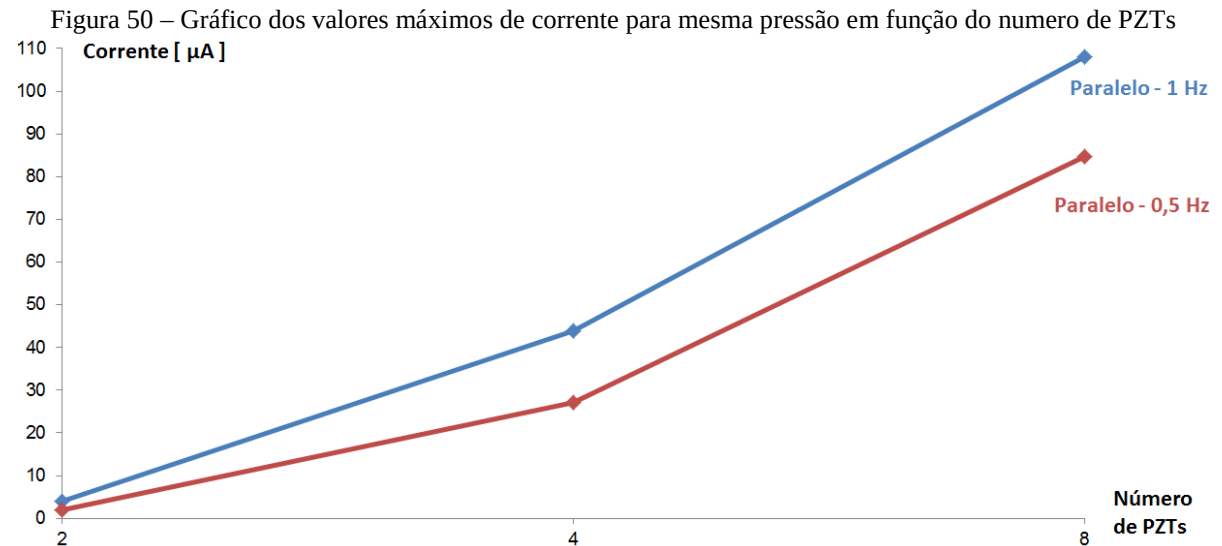
2º caso: Para 4 PZTs, com pressão máxima de 3,33 N/cm², área de contato com 3,14 cm² se obteve uma intensidade de carga igual a 1,07 Kg (10,45 N).

3º caso: Para 8 PZTs, com pressão máxima de $3,33 \text{ N/cm}^2$, área de contato com $6,28 \text{ cm}^2$ se obteve uma intensidade de carga igual a $2,13 \text{ Kg}$ ($20,98 \text{ N}$).

Nas figuras de 49 a 52 são ilustradas os valores obtidos através das aquisições de dados realizadas para tensão, corrente, potência e energia acumulada no capacitor com tempo máximo de 5 minutos para as diferentes configurações e parâmetros testados.

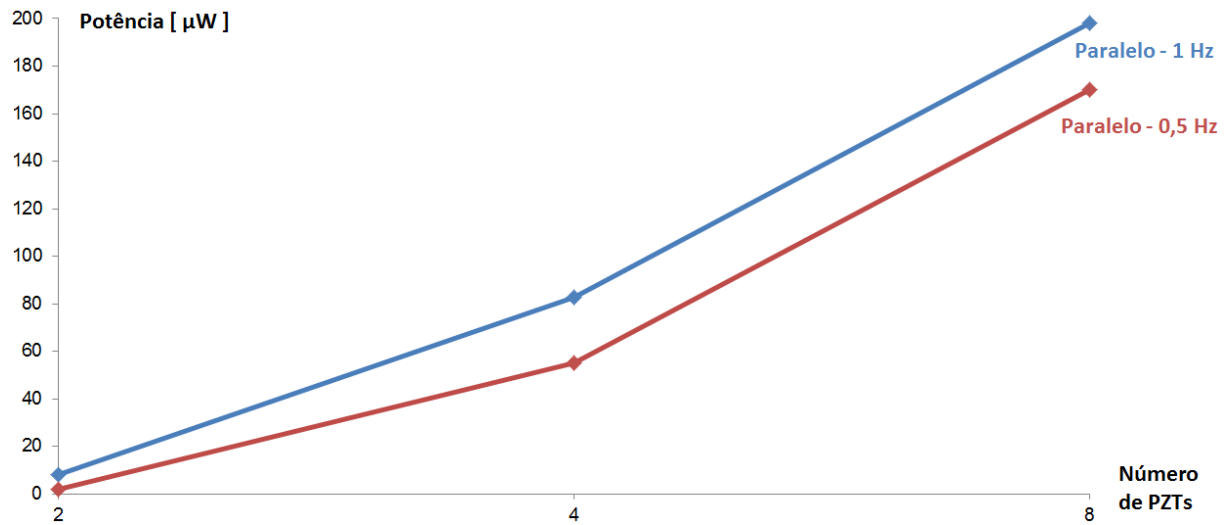


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



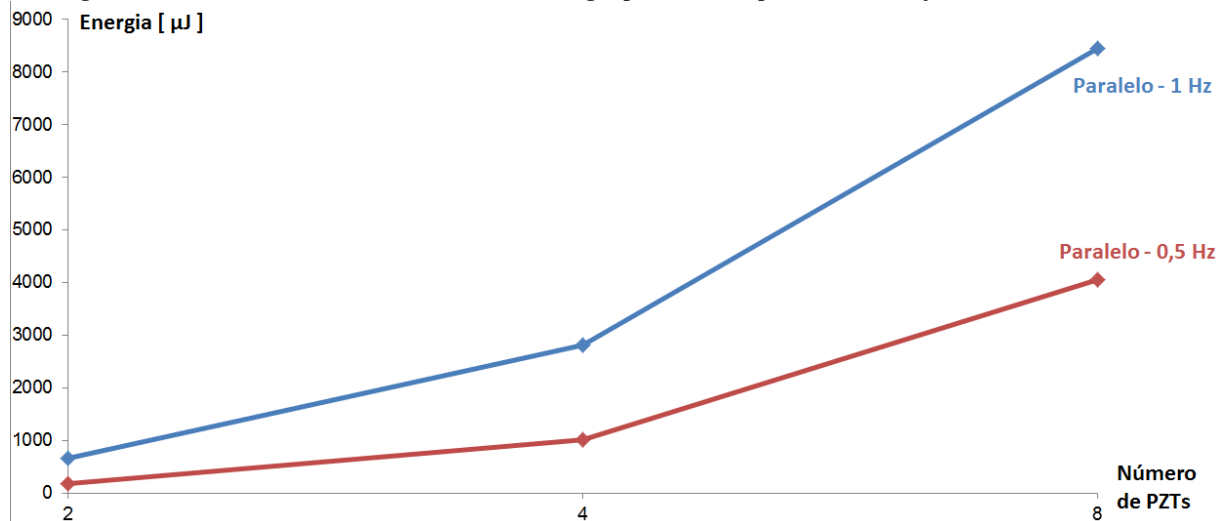
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 51 – Gráfico dos valores máximos de potência para mesma pressão em função do numero de PZTs



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Figura 52 – Gráfico dos valores máximos de energia para mesma pressão em função do numero de PZTs



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A tabela 8 apresenta os valores obtidos através das aquisições de dados realizadas para tensão e posteriormente para corrente, carga, potência e energia acumulada no capacitor com tempo máximo de 5 minutos para as diferentes configurações e parâmetros testados.

Tabela 8 - Valores máximos de tensão, carga, potência e energia acumulada no capacitor para um tempo de carga igual a 5 minutos

	2 PZTs Paralelo		4 PZTs Paralelo		8 PZTs Paralelo	
Frequência (Hz)	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Tensão (V)	1,92	3,65	4,5	7,5	9	13
Corrente (μA)	2	4	27,2	44	84,8	108
Potência (μW)	1,85	8,07	55,1	82,9	170	198
Energia (μJ)	184,3	666,1	1012,5	2812,5	4050	8450

Fonte: Elaborado pelo próprio autor

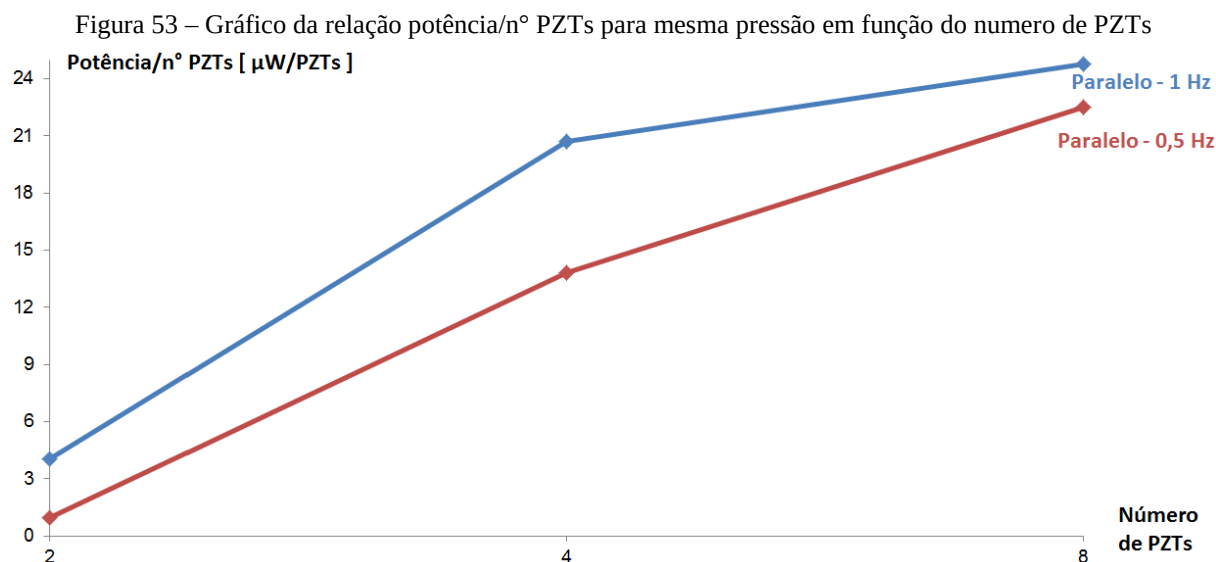
Foram realizadas também para esse caso relações para tensão, corrente e potência em função do número de PZTs, área e carga aplicada considerando a mesma pressão de 3,33 N/cm² com diferentes configurações e respectivas áreas dos PZTs (3,14 cm² para 4 PZTs e 6,28 cm² para 8 PZTs), sendo visualizados na tabela 9.

Tabela 9 - Valores máximos de tensão, potência e energia acumulada em função da área e pressão.

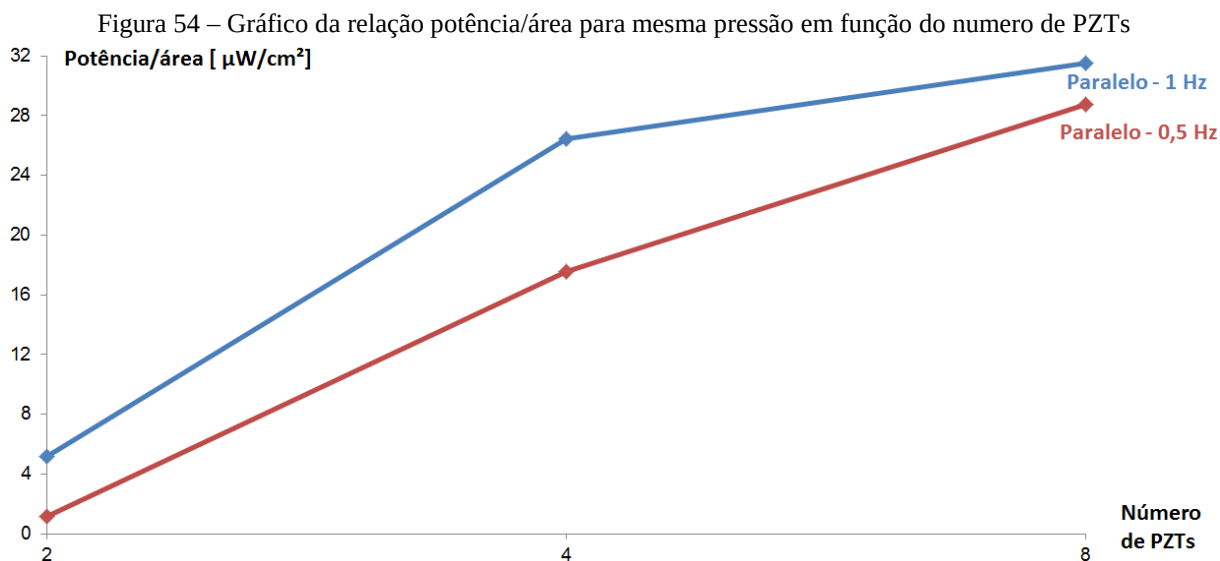
	2 PZTs Paralelo		4 PZTs Paralelo		8 PZTs Paralelo	
Frequência Hz	0,5	1	0,5	1	0,5	1
Tensão/n° PZTs V/PZTs	0,96	1,82	1,13	1,88	1,13	1,62
Corrente/n° PZTs μ A/PZTs	1	2	6,8	11	10,6	13,5
Potência/n° PZTs μ W/PZTs	0,93	4,04	13,8	20,73	22,5	24,75
Tensão/Área V/cm ²	1,22	2,32	1,43	2,39	1,43	2,07
Corrente/Área μ A/cm ²	1,3	2,5	8,66	14,01	13,5	17,2
Potência /Área μ W/cm ²	1,18	5,14	17,54	26,42	28,73	31,53
Tensão/Carga V/(Kg)	3,62	6,89	4,2	7	4,22	6,1
Corrente/Carga μ A/(Kg)	3,77	7,54	25,42	41,12	39,81	50,7
Potência /Carga μ W/(Kg)	3,5	15,23	51,5	77,48	79,81	92,96

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

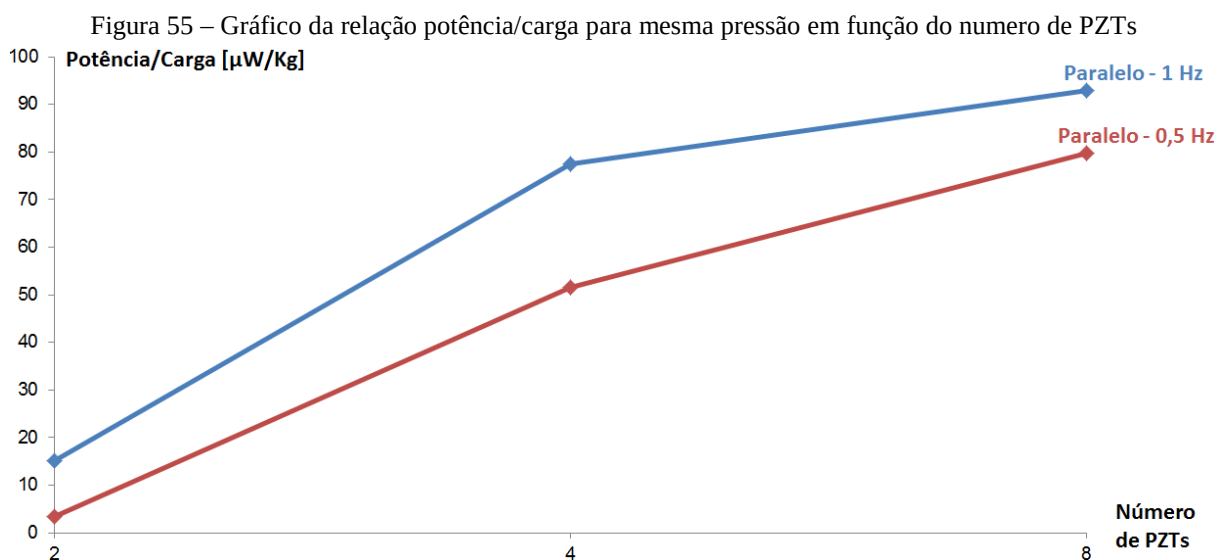
Nas figuras de 53 a 55 são ilustradas para melhor visualização os valores obtidos de potência em função do número de PZTs, área e carga considerando a mesma pressão de 3,33 N/cm²



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Conclusões

Mediante os resultados apresentados conclui-se que:

Os valores mais expressivos assim como anteriormente foram alcançados também com os PZTs excitados em 1 Hz. Os valores obtidos foram maiores do que os obtidos a carga constante, tanto para a frequência de 0,5 Hz quanto para 1 Hz. E que os valores apresentam respostas mais lineares do que o anterior, ou seja, a diferença apresenta menor variação.

Os dados dispostos graficamente e na tabela 8 ressaltam que a maiores variações entre valores para a frequência de 0,5 Hz e 1 Hz são de 4 V, 23,2 μA e 28 μW, todos para 8 PZTs.

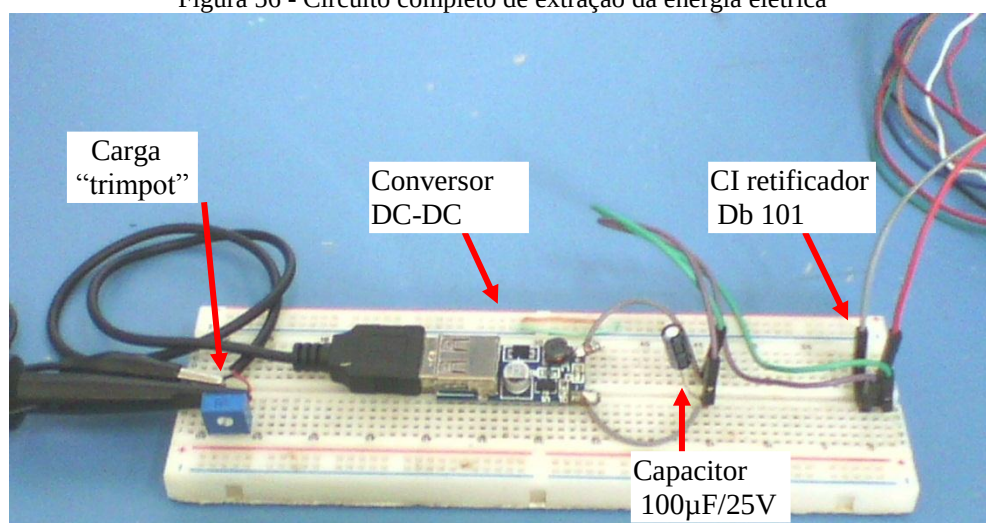
De um modo geral os valores dispostos na tabela 9 se refletem aos valores obtidos experimentalmente, ou seja, os valores mais significativos são para excitação de 1 Hz e maior quantidade de geradores (8 PZTs). Em relação à quantidade de PZTs (2, 4 e 8) para uma mesma frequência de excitação (0,5 Hz ou 1 Hz) e configuração de ligação (série ou paralelo),

as relações são mais próximas quando utilizados 4 e 8 PZTs sendo mais expressivos para 8 PZTs os quais se afastam bastante.

4.2 CIRCUITO RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA E CONVERSOR DC-DC

Com intuito de se aproximar ao máximo de um sistema de *power harvesting* para carregamento de baterias podendo ser utilizadas principalmente na alimentação de circuitos eletrônicos de baixo consumo, foi testado o circuito com retificador de onda completa e conversor DC-DC elevador descrito no capítulo 3.

Figura 56 - Circuito completo de extração da energia elétrica



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tendo isso em vista foram realizadas novas medições com circuito retificador e conversor DC-DC elevador para a configuração com 8 PZTs em paralelo submetidos a duas intensidades de carga aplicada pelo pistão pneumático e pressão mecânica diferentes (0,53 Kg – 0,83 N/cm² e 2,13 Kg – 3,33 N/cm²), bem como frequências de excitação de 0,5 Hz e 1 Hz.

Os valores máximos de tensão, corrente e potência na entrada/saída do retificador e conversor DC/DC estão dispostos na tabela 10.

Tabela 10 - Valores máximos encontrados no circuito de extração de energia elétrica

	8 PZTs em paralelo 0,53 Kg – 0,83 N/cm²		8 PZTs em paralelo 2,13 Kg – 3,33 N/cm²	
Frequência (Hz)	0,5	1	0,5	1
Potência máxima PZTs (μWrms)	192,9	211,8	200	232,9
Tensão máxima PZTs (Vrms)	5,65	6	5,88	6,47
Potência máxima (μW) Saída do retificador	164	180	170	198
Tensão máxima (V) Saída do retificador	4,8	5,1	5	5,5
Corrente máxima (μA) Saída do retificador	32,2	35,3	34	36
Potência máxima (μW) Saída do conversor DC-DC	98,4	108	102	118,8
Corrente máxima (μA) Saída conversor DC-DC para 5 Volts	19,5	21,5	20,5	23,6
Potência inutilizada no circuito (μW)	100	190	98	114
Carga ótima (KΩ)	255	230	245	210

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Foi quantificada também a eficiência dos circuitos envolvidos, donde se obteve para o retificador de onda completa um rendimento de 85 % e para o conversor DC-DC obteve-se 60 %. Tendo o sistema total um rendimento de aproximadamente 51 %.

Discussões

Os valores obtidos revelam que com o aumento da carga e pressão aplicadas sobre a mesma quantidade de PZTs, os valores na saída do circuito tendem a se elevar.

Como nos casos anteriores os valores são mais significativos são para a frequência de excitação igual a 1 Hz, em que a potência e corrente na saída do conversor 5V sai de 108 μ W e 21,5 μ A para 118,8 μ W e 23,6 μ A, respectivamente.

Percebe-se ainda que com o aumento da corrente na saída do conversor DC-DC faz com que o valor de resistência diminua, ou seja, o conversor mantém a potência constante.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são feitas as conclusões gerais obtidas com o desenvolvimento deste trabalho. Além disso, também são apresentadas propostas e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho pode-se concluir que o circuito eletrônico composto por retificador de onda completa, conversor *boost* e *buzzer* piezelétrico como gerador de energia podem ser empregados em sistemas de *power harvesting* para reaproveitamento de energia proveniente de esforços mecânicos causados por deformações de curta duração decorrente do tráfego de veículos e/ou caminhar de pedestres no carregamento de baterias, podendo ser destinados na alimentação de circuitos autônomos de monitoramento, indicação, iluminação, etc. em locais remotos, eliminando ou estendendo o tempo entre recargas desses dispositivos. Visto que, mesmo em baixas frequências de excitação e quantidades de PZTs é possível extrair energia desses elementos.

De um modo geral para o circuito retificador de onda completa os maiores valores encontrados em termos de tensão, corrente, potência e energia armazenada foram alcançadas para excitação de 1 Hz, maior quantidade de geradores (8 PZTs) e conectados em paralelo

Para as análises de carga constante os valores encontrados foram 10 V, 100 μ A, 180 μ W e 5000 μ J, obtidos para uma carga igual a 0,53 Kg e pressão de 0,83 N/cm². Os dados dispostos na tabela 6 ressaltam que a configuração em paralelo apresentou também maiores variações entre valores para a frequência de 0,5 Hz e 1 Hz, sendo 1,8 Volts para 4 PZTs, 18 μ A e 16 μ W para 8 PZTs. Já a configuração em série as maiores variações são de 1,09 V para 4 PZTs, 16,4 μ A e 44 μ Watts para 8 PZTs.

Já para as análises de pressão constante os maiores valores são de 13 V, 108 μ A, 198 μ W e 8450 μ J, obtidos para uma carga igual a 2,13 Kg e pressão de 3,33 N/cm². Os dados dispostos graficamente e na tabela 8 ressaltam que as maiores variações entre valores para a frequência de 0,5 Hz e 1 Hz são de 4 V, 23,2 μ A e 28 μ W, todos com 8 PZTs.

Quando se compara os resultados encontrados para carga constante e pressão constante, tem-se valores mais elevados para o segundo caso, principalmente em termos de corrente e potência, tanto para a frequência de 0,5 Hz quanto para 1 Hz, os quais também apresentam valores de respostas mais lineares, sendo também constatado que dobrando a quantidade de PZTs ou a frequência de excitação, os valores não dobram, mas em sua maioria permanecem próximos em proporção.

Com relação ao circuito completo os resultados mais significativos são para a frequência de excitação igual a 1 Hz, em que os valores das grandezas para a saída do conversor 5 Volts saem de 108 μ W e 21,5 μ A para 118,8 μ W e 23,6 μ A, respectivamente.

Tendo ainda um rendimento de 51%, 85 % para o retificador e 60% para o conversor dc-dc.

Por fim conclui-se que, para se obter valores de tensão, corrente e consequentemente potência mais elevados, podendo ser utilizados na alimentação de baterias para circuitos autônomos ou outra aplicação que demandem maior consumo, deve-se utilizar a maior quantidade de PZTs possível, levando em conta as relações obtidas para valores de tensão e corrente geradas, conectados eletricamente em paralelo, estando estes divididos em menores quantidades (células) nas quais devem ser conectadas na entrada de cada retificador, que por sua vez tem sua saída conectada em paralelo aos demais retificadores correspondentes às demais células existentes.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Com relação ao que foi feito, percebe-se que ainda é possível realizar uma série de etapas que podem ser explorados em outros trabalhos. Assim, a seguir são listadas algumas etapas para trabalhos futuros:

- Aperfeiçoar a estrutura piezelétrica a fim de se obter a máxima potência possível do gerador piezelétrico.
- Elaboração de um dispositivo com *buzzers* piezelétricos acoplados para que possa ser utilizado em uma aplicação real mediante a passagem de veículos e/ou pedestres, armazenando essa energia estriada em baterias.
- Testar diferentes tipos de materiais piezelétricos a fim de quantificar qual seria a melhor opção para construção do gerador piezelétrico utilizado em um dispositivo real de captação e armazenamento de energia.
- Projetar e testar um circuito integrado (CI) do circuito proposto a fim de se tentar obter menores perdas de energia, resultando em uma maior eficiência do circuito e consequentemente maiores valores de potência em sua saída.

- Implementar um sistema autônomo com fins práticos alimentado pela energia estriada por um sistema de *power harvesting* em lugares com circulação de veículos e/ou pessoas.

REFERÊNCIAS

- ANTON, S. R; SODANO, H. A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). **Smart Materials and Structure**, Bristol, v. 16, n. 3, p. R1–R21, 2007. Disponível em: <stacks.iop.org/SMS/16/R1>. Acesso em: 27 set. 2013.
- AJITSARIA, J.; CHOE, S. Y.; SHEN, D.; KIM, D. J. Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation. **Smart Materials and Structure**, Bristol, v.16, n.2, p. 447–454, 2007. Disponível em: < <http://iopscience.iop.org/0964-1726/16/2/024> >. Acesso em: 24 out. 2013.
- BARBIE, I. **Eletrônica de potência**. 6. ed. Florianópolis: CTC, 2006.
- BERLINCOURT, D.; KRUEGER, H. H. A.; NEAR, C. **Properties of piezoelectricity ceramics**. [S.l.]: Morgan Electro Ceramics, 2004. (Technical Publication TP, 226). Disponível em:<http://traktoria.org/files/sonar/piezoceramics/morgan/properties_of_piezoelectric_ceramics_%28pzt-4_pzt-5a_pzt-5h_pzt-8%29.pdf >. Acesso em: 15 out. 2014.
- BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**. 10. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- CAMARA, F. H. O. **Análise de uma piezoestrutura (PZT) multifrequência para geração, extração e armazenamento de energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.
- CARDOSO, A. J. **Sistema para aproveitamento de energia vibracional baseados em transdutores acústicos piezelétricos de baixo custo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria - RS, 2006.
- CARVALHO, F. C. **Avaliação experimental de um sistema não linear para extração de energia através de vibrações utilizando material piezelétrico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.
- CROSS, L. E. HEYWANG, W. Piezoelectricity: evolution and future of a technology. **Springer Series in Materials Science**, New York, v. 114, n. 1, p. 1–4, 2008.
- CLEMENTINO, M. A. **Análise numérica e experimental de geradores piezelétricos de energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.
- DUTOIT, N. E. **Modeling and design of a MEMS piezoelectric vibration energy harvester**. Dissertação (Mestrado) – University of Cambridge, Cambridge, 2005. Disponível em: < http://robotics.caltech.edu/~ndutoit/wiki/images/1/1b/MS_thesis.pdf >. Acesso em: 3 jun. 2014.
- EIRAS, J. A. **Materiais piezoelétricos**. São Paulo: AlphaMidia Assessoria Fonográfica, 2004. 34 p.
- FERRARI, M.; FERRARI, V.; GUIZZETTI, M.; MARIOLI, D.; TARONI, A. Piezoelectric multifrequency energy converter for power harvesting in autonomous microsystems. **Sensors**

and Actuators A, Lausanne, v. 1, n. 142, p. 329-335, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 30 set. 2013.

GAO, Y.; TAN, M. T.; CHENG, S. J.; Z, Y.; JE, M.; H. C, H. A Self-Powered Power Conditioning IC for Piezoelectric Energy Harvesting From Short-Duration Vibrations. **IEEE Transactions on circuits and systems - II: Express Briefs**, New York, v. 59, n. 9, setembro 2012

GASPAROTTO, G. **Síntese e caracterização da cerâmica PZT dopada com estrôncio e com nióbio e estrôncio**. 2002. Tese (Doutorado) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2002.

JIANG, X. et al. Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced pavement vibrations. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, Melville, v. 6, n. 4, 2014. Disponível em: <www.murata.com/products/catalog/pdf/p15e.pdf> Acesso em: 10 fev. 2015.

LAGOIN, T. G. **Utilização de materiais piezelétricos (PZTs) para coleta e armazenamento de energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

LEO, D. J. **Engineering analysis of smart material systems**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. p. 1-297.

LEUFEUVRE, E. et al. **Buck-boost converter for sensorless power optimization of piezoelectric energy harvester**. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 22, n. 5, p. 218-225, 2007.

MURATA. **Piezoelectric sound components**. [S. l.]: Murata Manufacturing, 2012. Disponível em: <www.murata.com/products/catalog/pdf/p15e.pdf> Acesso em: 10 fev. 2015.

OGAWA, T. et al. **Energy harvesting devices utilizing resonance vibration of piezoelectric buzzer**. Fukuroi: Instituto de Ciência e tecnologia Shizuoka, 2013.

OTTMAN, G. K. et al. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 17, n. 5, p. 669-676, 2002.

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

PEARSON, R. P. **Modeling and development of piezoceramic energy harvester for munitions applications**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Villanova University, Philadelphia, 2006. Disponível em: <<http://www37.homepage.villanova.edu/sean.pearson/Documents/Thesis.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2014.

PEDERSEN, J. H. **Low frequency low voltage vibration energy harvesting converter**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Técnica da Dinamarca, Kongens Lyngby, 2011. Disponível em: <http://www.delta.dk/imported/images/DELTA_Web/documents/Innovation/Master_Thesis_Johan_Pedersen_s052402.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2014.

PEIGNEY, M.; SIEGERT, D. **Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced bridge vibrations**. [S. l.]: IOP Publishing Smart Materials and Structures, 2013.

PEREIRA, A. H. A. **Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades**. São Carlos: [s. n.], 2010. Disponível em: < <http://www.atcp-ndt.com/imagens/produtos/ceramicas/artigos/RT-ATCP-01.pdf> > Acesso em: 10 jun. 2015

PEREIRA, A. H. A.; VENET, M.; **Materiais piezoelétricos**. São Carlos-SP: [s. n.], 2004. Disponível em:< http://www.atcp-ndt.com/imagens/produtos/ceramicas/artigos/Apostila3_curso-piezo-ATCP.pdf> Acesso em: 10 jun. 2015.

PEREIRA, A. H. A.; VENET, M. **Efeito piezoelétrico e as cerâmicas piezoelétricas**. São Carlos :[s. n.], 2004. Disponível em:<http://www.atcp-ndt.com/imagens/produtos/ceramicas/artigos/Apostila2_curso-piezo-ATCP.pdf> Acesso em: 10 jun. 2015.

PRIYA, S.; INMAN, D. **Energy harvesting technologies**. New York: Springer, 2008.

PRIYA, S.; INMAN, D. **Energy harvesting technologies**. New York: Springer, 2009.

PIEZO COMPANY LTD. **Introduction to piezo transducers**. New York: Springer, 2011. Disponível em: <<http://www.piezo.com/tech2intropiezotrans.html>>. Acesso em: 27 set. 2014.

RAMADASS, Y. R.; CHANDRAKASAN, A. P. An efficient piezoelectric energy harvesting interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, New York, v. 45, n. 1, p. 189-204, 2010.

RENAUD, Michael. et al. **Harvesting energy from the motion of human limbs: the design and analysis of an impact-based piezoelectric generator**. IOP Publishing Ltd – Smart Materials And Structures. 2012.

ROSANA, G.; AMARAL, J. **Processos industriais que utilizam corrente contínua, piezoeletricidade**. 2007. 15 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Técnico em Eletrotécnica) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco, Pesqueira, 2007.

SOUZA, F. S. **Sistema de extração de potência (power harvesting) usando transdutores piezoelétricos**. 2011. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

TABESH, A.; FRÉCHETTE, L. G. A low-power stand-alone adaptive circuit for harvesting energy from a piezoelectric micropower generator. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, v. 57, n. 3, p. 840-849, 2010.

TSENG, C. I., **Electromechanical dynamics of a coupled piezoelectric / mechanical system applied to vibration control and distributed**. 1989. 240 f. Ph. D. (Thesis in Mechanical Engineering) - University of Kentucky, 1989.

XIONG, H. et al. Piezoelectric energy harvesting from traffic induced deformation of pavements. **International Journal of Pavement Research and Technology**, Philadelphia, v. 5, n.5. 2012.

WANG, Y.; LEE, A. J.; INMAN, D. J. Energy harvesting of piezoelectric stack actuator from a shock event. **Jornal de vibrações e acústica**, New York/Michigan, 2014. Disponível em: <www.murata.com/products/catalog/pdf/p15e.pdf> Acesso em: 10 fev. 2015.