

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

GUSTAVO GOMES KUHN

**CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA PIEZELÉTRICO PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO

PATO BRANCO
2014

GUSTAVO GOMES KUHN

**CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA PIEZELÉTRICO PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica” – Área de Concentração: Sistemas e Processamento de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Jean Marc Stephane Lafay

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Rogerio Novak

**PATO BRANCO
2014**

K96c

Kuhn, Gustavo Gomes.

Caracterização de um sistema piezelétrico para geração de energia elétrica / Gustavo Gomes Kuhn. -- 2014.

98 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Jean-Marc Stephane Lafay

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Novak

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Pato Branco, PR, 2014.

Bibliografia: f. 82 – 85.

1. Cerâmica piezelétrica PZT-4. 2. Geração de energia de baixa potência. 3. Viga engastada. 4. Energy harvesting. 5. Circuito eletrônico de condicionamento. I. Lafay, Jean-Marc Stephane, orient. II. Novak, Paulo Rogério, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Pato Branco
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação n° 033

Caracterização de um sistema piezelétrico para geração de energia elétrica

por


Gustavo Gomes Kuhn

Dissertação apresentada às treze horas e trinta minutos do dia vinte e dois de outubro de dois mil e quatorze, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (Área de Concentração: Sistemas e Processamento de Energia), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:


Prof. Dr. Jean-Marc Stéphane Lafay
UTFPR/PB (Orientador)


Prof. Dr. Paulo Rogério Novak
UTFPR/PB (Coorientador)


Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
UNIOESTE/Cascavel


Prof. Dr. Emerson Giovanni Carati
UTFPR/PB

Às memórias de Getúlio, meu pai, Dario e Idalina, meus avós, pela criação pautada no respeito, na amizade, na compreensão e em valores morais que me tornaram uma pessoa de bem.

À Isolda, minha mãe, pelo amor incondicional (recíproco) e por ser a pessoa mais justa que tive a oportunidade de conviver. Este senso de justiça, aprendi, e aplico todos os dias de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todas as pessoas, e não me atreveria em nominá-las, pois eu estaria cometendo uma grande injustiça em não lembrar a todos, mas que ajudaram de alguma forma ou outra a construir e consolidar este trabalho científico.

Um agradecimento especial ao meu professor orientador, Jean-Marc Stephane Lafay, pela incansável paciência, pelas trocas de ideias claras e focadas no tema da dissertação e por ter pessoalmente me incentivado a dar início e continuidade aos estudos de pós-graduação, desta relação profissional, tornamo-nos muito bons amigos.

Algumas pessoas eu gostaria de agradecer nominalmente: professor Paulo Rogério Novak, meu co-orientador, especial participação em todos os ensaios vibracionais. Pessoa detalhista e com foco bem definido, muito importante na obtenção dos resultados. Professor Dalmarino Setti, pela várias dicas úteis e trocas de informações necessárias a conclusão do trabalho. O professor Gustavo Lacerda Dias, com certeza com pouquíssima participação técnica (devido a sua área de formação), mas uma pessoa correta, de alto astral, positiva, e incentivadora de bons pensamentos e amizade. E o professor Fernando José Avancini Schenatto pela ótima amizade e por muitas horas de conversa sobre muitos assuntos, que de certa forma, contribuíram para o meu fortalecimento emocional.

Também agradeço a todos os professores e colegas de pós-graduação com quem tive a oportunidade de conviver.

E por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer a minha família, que soube ter paciência em todos os momentos que precisei estar ausente. Minha esposa Cintia, muito dedicada à família e ao trabalho, fico sem palavras. Aos meus filhos Vivian, Vinicius e Pietra, que tudo isso sirva de incentivo a vocês.

“Com muita sabedoria, estudando muito, pensando muito, procurando compreender tudo e todos, um homem consegue, depois de mais ou menos quarenta anos de vida, aprender a ficar calado. ”

Millôr Fernandes

“Grandes descobertas científicas são realizadas a partir de um olhar profundo sobre aquilo que se parece óbvio à primeira vista. ”

Autor Desconhecido

RESUMO

KUHN, Gustavo Gomes. **Caracterização de um Sistema Piezelétrico para Geração de Energia Elétrica**. 2014. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Sistemas e Processamento de Energia). Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco. 2014.

A presente dissertação apresenta estudo sobre a geração de energia elétrica de baixa potência utilizando materiais piezelétricos, em particular pastilhas do modelo PZT-4. O sistema adotado é do tipo viga engastada com massa na extremidade livre da viga. Tem pastilhas piezelétricas (PZT) coladas a viga, e é submetido a forças externas harmônicas, em faixas de frequência de excitação na ordem de 0~35 Hz.

O gerador de energia utiliza o conceito de *energy harvesting*, onde se retira do meio externo, energias que seriam perdidas. O objetivo geral é caracterizar o sistema piezelétrico para geração de energia elétrica de baixa potência. Um came-seguidor (*shaker*) é empregado para gerar o movimento mecânico (força externa). Sobretudo, é realizado um modelamento matemático da pastilha PZT empregando o conceito de Modelo de Circuito Equivalente – ECM (*Equivalent Circuit Model*). Também são apresentadas algumas topologias de circuitos condicionadores do sinal AC-DC, onde o modelo empregado foi Chaveamento Híbrido Sincronizado de Extração de Energia no Indutor – HSSHI (*Hybrid Synchronized Switch Harvesting on Inductor*). Duas frequências de excitação foram investigadas 2,5 Hz e 19,5 Hz.

Os resultados são apresentados e discutidos por meio de gráficos, tais como: resposta em frequência da aceleração, aceleração do sistema, resposta em frequência da admitância, tensão gerada, corrente elétrica, tempo de carga de capacitores e potência elétrica gerada na saída do circuito.

A contribuição deste trabalho foi apresentar a caracterização do comportamento eletromecânico de um sistema piezelétrico para geração de energia elétrica para as duas frequências de excitação estudadas. A pesquisa apresenta a involução das relações entre alguns parâmetros nas duas frequências, como: resposta em frequência de excitação, com relação igual a 87,5 e relação de potência elétrica gerada igual a 1,07.

Palavras Chave: Cerâmica piezelétrica PZT-4, geração de energia de baixa potência, viga engastada, *energy harvesting*, circuito eletrônico de condicionamento.

ABSTRACT

KUHN, Gustavo Gomes. **Characterization of a Piezoelectric System for Electric Power Generation.** 2014. 98 f. Thesis (Master Science in Electrical Engineering – Systems and Energy Processing). Post Graduate Program in Electrical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Pato Branco. 2014.

This dissertation presents a study on low power electricity generation using piezoelectric materials, in particular patches of PZT-4 model. The system adopted is of the type cantilever beam with a mass on the free end of the beam. It has piezoelectric patches glued to the beam and is subjected to external forces harmonics in the excitation frequency bands in the order of 0~35 Hz.

The energy generator uses the concept of energy harvesting, which withdraws from the external environment, energy that would otherwise be lost. The overall objective is to characterize the piezoelectric system for generating electricity from low power. A cam follower (shaker) was used to generate mechanical motion (external force). Above, is an accomplished mathematical modeling of the PZT patches employing the concept of Equivalent Circuit Model – ECM. Some topologies conditioners circuits of AC-DC signal are also presented, where the model was employed Hybrid Synchronized Switch Harvesting on Inductor. Two excitation frequencies were investigated 2.5 Hz and 19.5 Hz.

The results presented and discussed through graphs: of frequency response of acceleration, acceleration of the system, frequency response of admittance, generated voltage, electric current, charging time of capacitors and electrical power generated in the output of the circuit. The contribution of this research was to present the characterization of the electromechanical behavior of a piezoelectric system to generate electricity for the two studied excitation frequencies. The research presents the involution the relationships of some parameters, such as frequency response of excitement, with ratio equal to 87.5 and electric power generated ratio equal to 1.07.

Keywords: PZT-4 piezoelectric ceramics, low-power generation, cantilever beam, energy harvesting, electronic conditioning circuit.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura Perovskita das cerâmicas PZT. (a) Abaixo da Temperatura de Curie. (b) Acima da Temperatura de Curie.	23
Figura 2 – Principais efeitos piezelétricos. (a) efeito longitudinal (b) efeito transversal.	25
Figura 3 – Relação entre números subscritos e eixos coordenados.	26
Figura 4 – (a) barra engastada, massa M, tensão elétrica V, strain S e deformação z. Em (b) fotografia do protótipo feito com PZT-5A.	27
Figura 5 – Diagrama esquemático de blocos do gerador utilizando transdutores acústicos (a) e fotografia do modelo experimental (b) detalhando o acelerômetro acoplado à esfera.	28
Figura 6 – Tensão de circuito aberto versus frequência.	28
Figura 7 – Em (a) deformação e tensão medidas versus força de carga aplicada em um disco PZT, em (b) a fotografia do disco conhecido como cápsula piezelétrica. Elemento PZT de baixo custo.	29
Figura 8 – Em (a) o circuito conversor DC ligado a um LED. Em (b) gerador PZT conectado a um <i>shaker</i> para simulação de vibração e (c) o sistema gerador acoplado ao guidão de uma bicicleta e alimentando uma lâmpada de LED.	30
Figura 9 – Ilustração de um sistema em pilha de PZT's.	30
Figura 10 – Dimensões e <i>layout</i> do gerador PZT.	31
Figura 11 – Dispositivos piezelétricos de geração, e o circuito esquemático de condicionamento de sinal e carga da bateria.	32
Figura 12 – Em (a) tensão elétrica <i>versus</i> tempo em horas, da carga de uma bateria de 300 mAh sendo carregada por meio de um gerador vibracional PZT, em sua frequência de ressonância. Em (b) a mesma bateria sendo carregada fora da faixa ressonante, vibrações aleatórias.	32
Figura 13 – Em (a) interface básica de <i>energy harvesting</i> e (b) níveis de deslocamento, tensão no material PZT e nível V_{DC} da tensão de saída do circuito.	34
Figura 14 – Chaveamento Sincronizado de Extração no Indutor, em (a) SSHI Paralelo e em (b) SSHI Série.	35
Figura 15 – Circuito SSHI Híbrido.	35
Figura 16 – Circuito SSDCI.	36
Figura 17 – Circuito similar ao SSHI Série sem diodos em ponte.	36

Figura 18 – Circuito de condicionamento do sinal AC-DC de Perelli <i>et al</i> , 2013.	37
Figura 19 – Potência produzida no modelo experimental e teórico <i>versus</i> a resistência de carga, em condições de aceleração de 5 m/s ² e frequência de 12,5 Hz.	38
Figura 20 – Experiência realizada em solado de calçado. (a) Diagrama esquemático das ligações entre o filme piezelétrico e o gerador eletrostático, (b) tensão elétrica <i>versus</i> tempo depois da retificação em um impacto único aplicado ao gerador.	38
Figura 21 – Tecido com estrutura em casca com piezelétrico incorporado, (a) e (b) tensão geradas desta estrutura, com movimento de articulação do cotovelo, (c) fotografia do sistema por meio de uma cotoveleira.....	39
Figura 22 – (a) Método de fabricação e (b) fotografia das cascas metálicas e filme de poliéster do protótipo.....	40
Figura 23 – Fluxograma das etapas de construção mecânica e elétrica.	43
Figura 24 – Esquema do transdutor piezelétrico tipo placa colado a uma placa metálica.	44
Figura 25 – Cerâmicas PZT do tipo PZT-4 com eletrodos WR e variações nas três dimensões.	47
Figura 26 – Vista superior da chapa de latão que foi usinada em fresa CNC.	47
Figura 27 – Chapas metálicas (latão).	48
Figura 28 – Pastilha PZT fixada no latão por meio da cola epóxi.	49
Figura 29 – Vista lateral do engaste do sistema piezelétrico.....	50
Figura 30 – Sistema massa mola piezo amortecido.	51
Figura 31 – Diagrama do sistema piezelétrico.	52
Figura 32 – Sistema completo de geração de energia piezelétrica.	53
Figura 33 – Esquemático do modelo do circuito equivalente da cerâmica PZT.	55
Figura 34 – Esquema elétrico para medição da frequência de ressonância e antirressonância do material PZT.	56
Figura 35 – Diagrama de Nyquist, lugar geométrico das admitâncias de um transdutor piezelétrico. .	57
Figura 36 – Transdutor Piezelétrico. Em (a) circuito elétrico equivalente - ECM primitivo e em (b) efeito transversal sofrido pelo PZT.....	59
Figura 37 – Circuito elétrico equivalente com inclusão das perdas eletromecânicas r e R_d	60
Figura 38 – ECM sem transformador e com fator de força Π inserido aos elementos R, L e C.	61
Figura 39 – Curva simulada da resposta em frequência da admitância.	64

Figura 40 – Circuito eletrônico de condicionamento do sinal com carga resistiva.....	66
Figura 41 – Circuito de condicionamento do sinal gerado.....	67
Figura 42 – Resposta em Frequências da Aceleração do Sistema Piezelétrico. Em (a) as duas frequências excitadoras (2,5 Hz e 19,5 Hz) e em (b) apenas a frequência de excitação 2,5 Hz.	70
Figura 43 – Comportamento das acelerações do sistema com excitação 19,5 Hz e 2,5 Hz.....	71
Figura 44 – Formas de onda da tensão elétrica gerada pela excitação mecânica do <i>shaker</i> em 2,5 Hz e 19,5 Hz. Comportamento senoidal da curva 2,5 Hz.	73
Figura 45 – Tempo de carga dos capacitores. Destaque para os pontos de 90% de full charge.	75
Figura 46 – Tensão de carga de capacitor (simulado e experimental).	76
Figura 47 – Corrente de carga (simulado e experimental).	76
Figura 48 – Potência gerada com variação da carga resistiva R na saída do Vout do circuito. De 3 M Ω a 5 M Ω ocorre a máxima transferência de potência do sistema.....	77
Figura 49 – Corrente elétrica na saída do circuito com variação da carga resistiva (impedância).....	78
Figura 50 – Modelo de elemento de mola. Viga engastada com massa na extremidade livre.	86
Figura 51 – Em (a) sistema massa mola amortecido e em (b) diagrama do corpo livre.	89
Figura 52 – Solução homogênea, particular e geral.	90
Figura 53 – Diagrama vetorial das forças que atuam em um corpo livre de massa m_{eq}	91
Figura 54 – Atraso na resposta em relação a excitação.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempo requerido para carregar baterias usando material PZT.....	33
Tabela 2 – Comparação entre dispositivos geradores piezelétricos ressonantes.....	41
Tabela 3 – Classificação de cerâmicas de acordo com suas propriedades e a relação percentual entre elas.....	45
Tabela 4 – Valores dos componentes elétricos do ECM.....	63
Tabela 5 – Cálculo das frequências ressonantes do sistema gerador de energia.....	68
Tabela 6 – Resultados obtidos para o tempo de carga de capacitores.....	74
Tabela 7 – Cálculo da carga Q dos capacitores.....	74
Tabela 8 – Resultados do sistema piezelétrico.....	78
Tabela 9 – Tabela comparativa da involução das relações dos parâmetros em função da frequência de excitação.....	79
Tabela 10 – Principais materiais piezelétricos comerciais e as respectivas constantes.....	94

LISTA DE SÍMBOLOS

$BaTiO_3$	Titanato de Bário	CV	Cavalo Vapor
$PbTiO_3$	Titanato de Chumbo	Ω	Ômega
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo	x, y, z	Eixos Coordenados
PVDF	Fluoreto de Polivinilideno	F	Força ou Força Externa Aplicada
f_r	Frequência de Ressonância	a	Aceleração
f_a	Frequência de Antirressonância	A	Área (Cerâmica)
f_h	Frequência de Máxima Admitância	ℓ	Comprimento (Cerâmica)
f_l	Frequência de Mínima Admitância	$\Delta\ell$	Variação do Comprimento (Cerâmica)
f_s	Frequência de Movimento	b	Largura (Cerâmica)
f_p	Frequência de Paralela	t	Espessura (Cerâmica)
Π	Fator de Força	m	Massa
N	Constante de Frequência	x	Deslocamento
d_{ij}	Constante de Deformação Piezelétrica	c	Coefficiente de Amortecimento
g_{ij}	Constante de Tensão Piezelétrica	k	Constante Elástica
k	Coefficiente de Acoplamento Eletromecânico	R	Resistência
Y^E	Módulo de Young	L	Indutância
ε^T	Constante Dielétrica	C	Capacitância
$\varepsilon^T/\varepsilon_0$	Constante Dielétrica Relativa	Q	Carga Elétrica
ε_0	Constante Dielétrica no Vácuo	$e(t)$	Fonte de Tensão
Q_m	Fator de Qualidade Mecânica	Z	Impedância
s	Complância	Y	Admitância
E	Campo Elétrico	Y_d	Admitância de Bloqueio
E_c	Campo Elétrico Coercivo Relativo	Y_m	Admitância de Movimento
θ	Temperatura de Curie	R_d	Resistência de Bloqueio
T	Stress	C_d	Capacitância de Bloqueio
S	Strain	ω	Velocidade Angular
ρ	Densidade	Z_{f1k}	Impedância para frequência em 1 kHz
σ^E	Razão de Poisson	Y_{f1k}	Admitância para frequência em 1 kHz
D	Deslocamento Elétrico	V_{OUT}	Tensão de saída do circuito eletrônico
P_r	Polarização Remanescente		
C_f	Capacitância Livre		

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVO GERAL	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.3	JUSTIFICATIVA.....	18
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	O EFEITO DA PIEZELETRICIDADE EM MATERIAIS CERÂMICOS.....	21
2.2	EFEITO LONGITUDINAL E TRANSVERSAL.....	25
2.3	O EFEITO PIEZELÉTRICO NA GERAÇÃO DE ENERGIA	26
2.4	GERADORES DE ENERGIA E SUA HISTÓRIA RECENTE.....	27
2.4.1	Primeiros Geradores PZT.....	27
2.4.2	Eficiência de Geração e Circuitos de Condicionamento.....	30
2.4.3	Geração com Aplicações Práticas	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1	DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO DOS SINAIS ELETROMECAÑICOS	45
3.2	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICAS.....	46
3.2.1	Cerâmicas PZT's	46
3.2.2	Corte da Chapa Metálica	47
3.2.3	Viga Metálica	48
3.2.4	Cola Epóxi.....	48
3.2.5	Fixação e Engaste.....	50
3.2.6	Viga em Balanço	50
3.2.7	Came-Seguidor (<i>Shaker</i>).....	51
3.3	DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO SISTEMA DE GERAÇÃO PIEZELÉTRICA.....	52
3.3.1	Modelo Matemático de Viga Engastada com uma Extremidade Livre.....	53

3.3.2	Modelo do Circuito Equivalente da Cerâmica Piezelétrica.....	54
3.3.3	Circuito de Condicionamento do Sinal	64
4	RESULTADOS.....	67
4.1	CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DO SISTEMA	67
4.2	DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS FREQUÊNCIAS DO SISTEMA.....	69
4.3	ACELERAÇÕES DO SISTEMA	70
4.4	TENSÃO ELÉTRICA GERADA SEM CARGA RESISTIVA	72
4.5	TEMPO DE CARGA DE CAPACITORES	73
4.6	POTÊNCIA GERADA PELO SISTEMA	76
5	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
	ANEXOS	86

1 INTRODUÇÃO

A busca pela geração de energia ou a conversão dela, seja elétrica, mecânica, solar, eólica, nuclear, tem sido através da história a base do desenvolvimento das civilizações. Nos dias atuais são cada vez maiores as necessidades energéticas para a produção de alimentos, bens de consumo, de serviço, de produção, lazer, e principalmente para promover o desenvolvimento econômico, social e cultural. Com o elevado consumo de combustíveis fósseis, o aumento na taxa de emissão de gases que causam efeito estufa e os impactos ambientais correlacionados a estes padrões de produção e consumo, percebe-se a real necessidade de busca por fontes alternativas de geração de energia, com aplicações diretas de consumo em todas as áreas dos setores produtivos.

Uma área em crescente ascensão de estudos científicos pela comunidade internacional é a geração e aproveitamento de energia buscando fontes que não são convencionais, é o conceito de *energy harvesting*¹, onde se retiram do meio, energias que seriam perdidas, pois até então eram desprezadas. Em algumas áreas, como a biomédica, militar, telecomunicação, eletrônica, informática, entre outras, a aplicação deste tipo de aproveitamento e geração de energia torna-se possível e a utilização de uma infinidade de equipamentos portáteis. Isto oportuniza ao usuário, mobilidade com melhor autonomia e longevidade a vida útil das baterias.

O estudo que segue descreverá, em ordem cronológica, pesquisas relevantes da área de piezeletricidade e que retratam assuntos transversais, como: transformação de energia mecânica em elétrica, eficiência dos materiais piezelétricos, quantidade de energia gerada por uma placa de cerâmica PZT, *energy harvesting*, fontes vibracionais. Estes são alguns tópicos que serão abordados e discutidos. Da mesma forma, o trabalho objetiva entender formas de gerar energia elétrica usando materiais piezelétricos do modelo PZT-4, para tal, serão criados protótipos de geradores PZT's que serão ensaiados em laboratório para caracterização do sistema de geração. Os protótipos serão submetidos a excitações harmônicas e a conversão eletromecânica será verificada, analisada e discutida.

¹ “Colheita” de Energia, termo usado em eletroeletrônica, ou engenharias, para o aproveitamento de energias renováveis, onde se retira do meio ou até mesmo dos seres humanos, energia oriunda de fontes alternativas.

1.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem por objetivo caracterizar o comportamento eletromecânico de um sistema piezelétrico acoplado a viga engastada utilizando cerâmica piezelétrica para a geração de energia elétrica de baixa potência.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar um panorama científico, estado da arte, sobre a geração de energia através do efeito da piezeletricidade.
- Estudar e apresentar modelos de circuitos condicionadores de sinal gerado e de armazenamento da energia gerada.
- Modelamento matemático de um material piezelétrico utilizando o modelo de circuito equivalente (ECM – *Equivalent Circuit Model*).
- Projetar um dispositivo gerador de energia elétrica utilizando a configuração de viga engastada com uma extremidade livre.
- Determinação da frequência de excitação para geração de energia elétrica.
- Nas frequências identificadas, determinar a aceleração do sistema, a resposta em frequência da admitância, tensão e corrente elétrica, tempo de carga de capacitores e potência elétrica.

1.3 JUSTIFICATIVA

A busca pela geração de energia elétrica a partir de recursos naturais renováveis tem impulsionado muitas pesquisas nos últimos anos. O conceito de *energy harvesting*, onde se retira do meio (fontes geradoras: pedestres, veículos, máquinas e até mesmo edificações) ou até mesmo dos seres humanos, a energia oriunda de fontes alternativas, está cada vez mais em evidência. Segundo Minazara (2008), o aumento no consumo de energia de baixa potência,

causado pelo crescente uso em equipamentos eletrônicos portáteis, desperta o interesse do conceito na captação destas energias renováveis. Para Rocha (2010), que também evidencia a crescente demanda por fontes de baixa potência, causada pela massificação do uso de dispositivos eletrônicos portáteis, proporcionará aplicações de cerâmicas piezelétricas para a captação da energia mecânica vibracional. Desta forma, acredita-se que a viabilidade do estudo do efeito da piezeletricidade e suas aplicações para transformar a energia mecânica vibracional em energia elétrica, terá muita relevância para o meio, buscando contribuir na possibilidade de aplicação deste conceito, *energy harvesting* para o atendimento da demanda energética de baixa potência atual.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 trata da caracterização do problema sobre o domínio da técnica de geração de energia de baixa potência por meio de piezeletricidade usando viga engastada para o sistema gerador de energia. Este capítulo também apresenta os objetivos geral e específico, justificativa e motivação da realização do trabalho.

O capítulo 2 é uma revisão de literatura, sobretudo, aborda o fenômeno da piezeletricidade e uma breve apresentação do histórico de sua descoberta. Apresenta as propriedades e características intrínsecas das células piezelétricas e efeitos que sofrem quando submetidas a tensões mecânicas e tensão elétrica. Do mesmo modo, aborda assuntos que tratam de um comparativo entre diversos tipos de materiais PZT e suas principais características e algumas limitações. Por fim, o capítulo 2 mostrará a evolução da tecnologia para a geração ocorrida na última década, das principais contribuições científicas sobre *energy harvesting* e a geração, eficiência, condicionamento de energia e aplicações de materiais piezelétricos.

No capítulo 3 o autor apresenta o detalhamento de todo o processo construtivo do sistema, desde o processo de dimensionamento da viga de latão, corte e usinagem da chapa, colagem da pastilha PZT à chapa metálica, fixação do gerador ao dispositivo gerador (*shaker*) das forças mecânicas de excitação do sistema, e o modelo matemático da viga engastada. Sobretudo, neste capítulo será apresentado o sistema completo gerador de energia de baixa potência. Aqui será necessário o estudo e aplicação de um sistema de condicionamento de

energia AC-DC ao sistema de geração. Este sistema de condicionamento e armazenamento terá características semelhantes às estudadas na revisão de literatura. Ele será responsável pela conversão ou armazenamento da energia gerada.

Na sequência, apresentar-se-á os resultados experimentais de bancada. Neste momento, serão apresentados gráficos de frequências de excitação, aceleração do sistema, da potência gerada, de tensão elétrica, corrente elétrica, tempo de carregamento de capacitores, responsáveis pela possibilidade de carregar um capacitor com carga resistiva análoga a uma bateria de dispositivos portáteis. Também serão apresentadas simulações em software matemático para comparação dos dados experimentais.

Ao final, mostraremos a conclusão do estudo que tem como foco principal, adquirir *know-how* na geração de energia utilizando materiais piezelétricos e deixando para trabalhos futuros, a possibilidade de concentrar estudo em circuitos eletrônicos de condicionamento e armazenamento de energia, buscando aumentar o rendimento deste processo de geração de energia elétrica de baixa potência por meio da piezeletricidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A geração de energia elétrica está relacionada às propriedades piezelétricas de uma cerâmica piezelétrica e à propagação de ondas mecânicas nos materiais. Este capítulo aborda o embasamento teórico necessário para o entendimento dos fenômenos associados ao funcionamento de um gerador de energia piezelétrico.

Será descrito como o efeito piezelétrico foi descoberto, suas aplicações iniciais, características e propriedades dos materiais cerâmicos, os efeitos causados no material PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) pela aplicação de tração e compressão mecânica e a conversão destas forças em energia elétrica e como os estudos acerca do assunto estão se desenvolvendo. O estudo principal abordará trabalhos que desenvolvem pesquisas relacionadas a geração de energia e ao condicionamento desta energia, bem como suas formas de usá-la e armazená-la.

2.1 O EFEITO DA PIEZELETRICIDADE EM MATERIAIS CERÂMICOS

O efeito piezelétrico foi descoberto em 1880 pelos irmãos Curie (IKEDA, 1990). Na oportunidade, eles observaram que quando determinados tipos de cristais eram tracionados ou comprimidos, sua estrutura cristalina produzia uma tensão proporcional a esta pressão. Este fenômeno ficou conhecido como efeito piezelétrico direto. De modo contrário, quando um campo elétrico é aplicado nestes tipos de cristais, a sua estrutura produz forças de tração ou compressão que alteram as dimensões do cristal - efeito piezelétrico reverso. Os efeitos, direto e reverso, ocorrem somente em materiais piezelétricos, e sua aplicação na construção de transdutores eletromecânicos é muito eficiente, afirma Pippi (2003).

Pela primeira vez, foi utilizado em uma aplicação prática, por Paul Langevin², no desenvolvimento de sonares durante a primeira guerra mundial. Langevin utilizou cristais

² Físico e químico francês, Estudou na Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris, onde foi mais tarde diretor. Foi o primeiro a utilizar a piezoelectricidade de cristais de quartzo, em 1916, com a construção do primeiro sonar (para uso militar na 1ª Guerra Mundial). Juntamente com Robert W. Boyle foram pioneiros no desenvolvimento e aplicação dos primeiros transdutores piezelétricos.

de quartzo acoplados a massas metálicas (inventando o transdutor tipo Langevin) para gerar ultrassom na faixa de 20 kHz a algumas centenas de kHz (banda de ultrassom 20 kHz~200 MHz). Após a primeira guerra mundial, devido à dificuldade de se excitar transdutores construídos com cristais de quartzo, por estes demandarem geradores de alta tensão, iniciaram-se estudos e sobre tudo, o desenvolvimento de materiais piezelétricos sintéticos. Estes esforços levaram à descoberta e aperfeiçoamento nas décadas de 40 e 50, das cerâmicas piezelétricas de Titanato de Bário (BaTiO_3) e Titanato de Chumbo (PbTiO_3), pela então URSS e Japão, e das cerâmicas piezelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo [PZT $\text{Pb}(\text{Zr}_x \text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ com $0 < x < 1$] pelos EUA, conforme Cardoso (2006).

Este efeito é percebido em um número de cristais que ocorrem naturalmente, por exemplo, turmalina, quartzo e tartarato de potássio e sódio, e estes materiais foram usados durante muitos anos como transdutores eletromecânicos. Para um cristal que apresenta o efeito piezelétrico, a sua estrutura não deve ter nenhum centro de simetria. A tensão mecânica (de tração ou compressão) aplicada a um cristal irá alterar a distância entre os locais de carga positiva e negativa de cada célula elementar que conduz a uma polarização na superfície do cristal. Este efeito é praticamente linear, isto é, a polarização varia diretamente com a tensão aplicada, e dependente da direção, de modo que as tensões de compressão e de tração geraram campos elétricos e, portanto, tensões elétricas de polaridade oposta. Também é recíproca, de tal forma que se o cristal está exposto a um campo elétrico, ele irá apresentar uma deformação elástica, causando a sua extensão aumentando ou diminuindo de acordo com a polaridade do campo.

As cerâmicas piezelétricas são corpos maciços constituídas de inúmeros cristais ferroelétricos microscópicos. Particularmente nas cerâmicas do tipo PZT, estes pequenos cristais possuem estrutura cristalina tipo Perovskita, que apresentam simetria tetragonal, romboédrica³ ou cúbica simples, dependendo da temperatura que o material se encontra, como destaca a Figura 1. Estando abaixo de uma determinada temperatura crítica, conhecida como temperatura de Curie, a estrutura Perovskita apresenta a simetria tetragonal em que o centro de simetria das cargas elétricas positivas não coincide com o centro de simetria das cargas negativas, dando origem a um dipolo elétrico, como ilustrado na Figura 1(a).

³ O sistema cristalino trigonal ou romboédrico possui três eixos cristalográficos de igual comprimento e horizontais, formando ângulos de 120° entre si, e um eixo vertical perpendicular aos demais, diferente deles no comprimento e com simetria ternária, permitindo 25 grupos espaciais.

A existência deste dipolo faz com que a estrutura cristalina se deforme na presença de um campo elétrico e gere uma diferença de potencial, quando submetida a uma deformação mecânica, o que caracteriza o efeito piezelétrico inverso e direto respectivamente. A deformação mecânica ou a variação do dipolo elétrico da estrutura cristalina da cerâmica não implica necessariamente em efeitos macroscópicos, visto que os dipolos se arranjam em domínios, que por sua vez se distribuem aleatoriamente no material policristalino. Para que ocorram manifestações macroscópicas é necessária uma orientação preferencial destes domínios, conhecida como polarização⁴. Inclusive esta polarização se perde, diminuindo com o passar do tempo e uso, inutilizando o material para a transformação de energia elétrica em mecânica ou vice-versa.

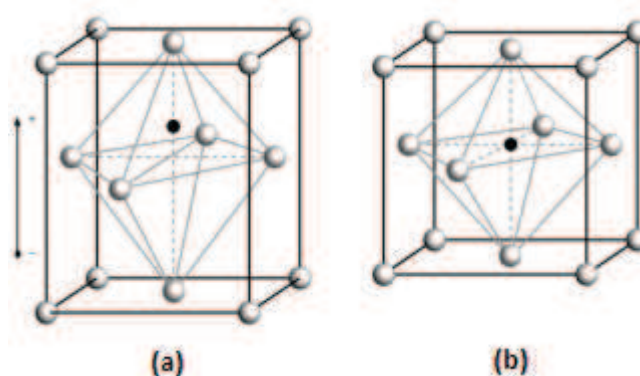


Figura 1 – Estrutura Perovskita das cerâmicas PZT. (a) Abaixo da Temperatura de Curie. (b) Acima da Temperatura de Curie.
Fonte: Pippi (2003).

O desenvolvimento das cerâmicas piezelétricas foi revolucionário. Além de apresentarem melhores propriedades que os cristais depois de polarizadas, também oferecem geometrias e dimensões flexíveis, por serem fabricadas através da sintetização de pó cerâmico conformado via prensagem ou extrusão. Destaca que atualmente as cerâmicas piezelétricas tipo PZT, em suas diversas variações, são as cerâmicas predominantes no mercado. Também podemos encontrar outros materiais, como por exemplo, o Titanato de Chumbo PT ($PbTiO_3$) e a solução sódica ferroelétrica PMN-xPT ($Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$), conhecida pelos altos valores de constante dielétrica e coeficientes piezelétricos, são utilizados em dispositivos que exigem propriedades especiais e muito específicas, como transdutores para alta temperatura. O desenvolvimento desse tipo de material cerâmico policristalino ampliou consideravelmente a

⁴ No processo de polarização o corpo cerâmico recebe eletrodos em um par de faces paralelas através das quais se submete o material aquecido a um campo elétrico com intensidade próxima ao limite de ruptura dielétrica, induzindo uma polarização macroscópica remanescente após este processo.

gama de aplicações da piezeletricidade. Tal fato se deve à fácil manipulação de suas características físicas e químicas. Os materiais PZT são dotados de características ímpares como:

- Dureza e densidade elevadas, podendo ser produzidos em qualquer tamanho e formato;
- Quimicamente inertes e imunes à umidade e outras condições atmosféricas;
- O eixo mecânico e o eixo elétrico podem ser precisamente orientados conforme a necessidade da aplicação através do processo de polarização do PZT.

Existem muitos tipos e modelos de cerâmicas PZT e muitas características diferenciadas. As cerâmicas de tipo B são do composto de titanato de bário modificado, que oferecem uma melhor estabilidade de temperatura e menos envelhecimento do que o composto de titanato de bário não modificado. A seguir, são apresentados alguns modelos que tem características aplicáveis aos geradores de energia elétrica:

PZT-2 pode ser usado onde os requisitos de constante dielétrica baixa, mas é inferior em quase todos os aspectos às cerâmicas PZT-4 e PZT-5A.

PZT-4 é recomendado para transdutores acústicos de alta potência, pelo motivo de sua alta resistência a despolarização e perdas dielétricas baixas quando submetido à alta tensão. Sua elevada resistência à despolarização quando aplicado a ele tensões mecânicas, torna-o adequado à utilização em transdutores acústicos de profundidade e como elementos ativos em **sistemas de geração de energia elétrica**.

PZT-5A é recomendado para hidrofones ou em instrumentação devido a sua elevada resistividade em altas temperaturas, alta sensibilidade e alto tempo de estabilidade.

PZT-5H tem uma sensibilidade ainda maior que a cerâmica PZT-5A e é, na maioria dos outros aspectos, semelhante à PZT-5A. Tem uma característica acentuada de baixo ponto de Curie, embora, isto limita a gama de temperatura de trabalho e leva a uma diminuição de sua estabilidade.

PZT-8 é semelhante ao PZT-4, mas tem mais perdas dielétricas e mecânicas quando submetido ao acionamento em alta tensão. É recomendado para aplicações que exijam maior capacidade de tratamento de alta tensão do que o PZT-4.

2.2 EFEITO LONGITUDINAL E TRANSVERSAL

No caso particular deste trabalho, se produzirá energia pelo efeito vibracional da cerâmica, funcionando assim, como: sensores e atuadores. Em Pippi (2003), o autor relata que:

Conforme o tipo de polarização e o formato da peça cerâmica, disco, anel, placa retangular (quadrado), o material piezelétrico pode ser aplicado de modo a aproveitar alguns dos efeitos de deformação mais acentuados, como: efeito transversal, efeito longitudinal e efeito torcional. Entre eles, o efeito transversal e o longitudinal se destacam pela larga utilização em atuadores, transformando excitação elétrica em movimento efetivamente.

A Figura 2(a) mostra que no efeito longitudinal as deformações ocorrem paralelamente ao eixo de excitação elétrica. Já no efeito transversal, mostrado na Figura 2(b) elas são perpendiculares ao eixo de excitação. Na prática, estes dois efeitos se manifestam simultaneamente no corpo cerâmico e a geometria da peça determina sua relação de magnitudes. Sobretudo, outros tipos de dispositivos podem ser construídos com base no efeito torcional, mas tal fenômeno, é de menor relevância para este trabalho e não será levado em consideração.

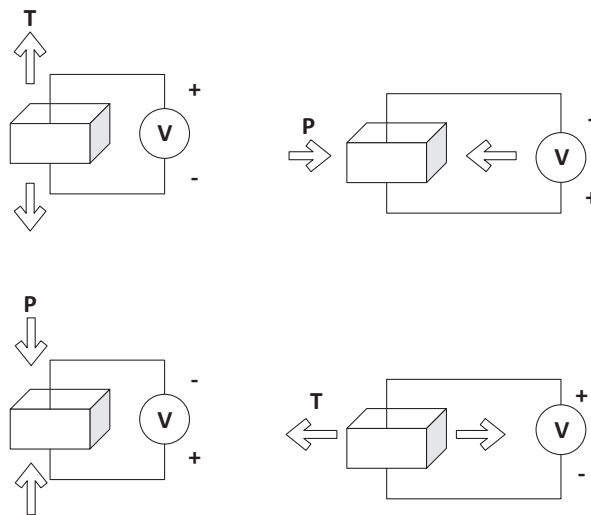


Figura 2 – Principais efeitos piezelétricos. (a) efeito longitudinal (b) efeito transversal.

Fonte: Pippi (2003).

Consequentemente, a escolha da geometria, quadrada ou retangular, e da forma como estão dispostos os eletrodos na cerâmica PZT, e principalmente a forma como o PZT

receberá a vibração mecânica, justifica-se que o sistema sofrerá efeito longitudinal. Todos os cálculos terão influência deste parâmetro.

2.3 O EFEITO PIEZELÉTRICO NA GERAÇÃO DE ENERGIA

Relacionado as grandezas de deformação da cerâmica, Cardoso (2006) afirma:

A maior parte das expressões que envolvem grandezas de compressão, dilatação e deformação, utiliza subscritos e sobrescritos em seus símbolos. O sobrescrito mostra a grandeza que permaneceu invariante durante o fenômeno (deformação). Os subscritos indicam a orientação do eixo que causou o fenômeno e que sofreu efeito, respectivamente.

A Figura 3 mostra a correspondência dos eixos coordenados x , y e z com os números 1, 2 e 3, respectivamente. Os números 4, 5 e 6 se referem aos modos de torção associados a x , y e z , respectivamente, mas para este estudo, não utilizaremos modos torcionais, apenas longitudinais e transversais.

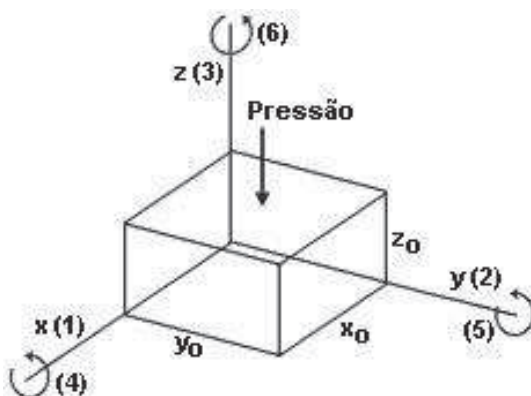


Figura 3 – Relação entre números subscritos e eixos coordenados.
Fonte: Pippi (2003).

A partir do modelamento matemático, será importante conhecer as principais características dos materiais piezelétricos, pois, é a partir destes que parâmetros poderão ser alterados para se buscar alternativas e conseqüentemente resultados com rendimentos satisfatórios a pesquisa.

2.4 GERADORES DE ENERGIA E SUA HISTÓRIA RECENTE

A seguir serão descritos autores que recentemente, nas décadas de 1990 e 2000, vem avançando em suas pesquisas e tendo resultados expressivos que serão abordados. A geração de energia por meio de células piezelétricas será vista por diversas óticas e a concepção de dispositivos geradores será estudada.

Será realizada uma pequena classificação, para organização dos assuntos, em três etapas do estudo: Primeiros Geradores PZT, Eficiência de Geração e Circuitos de Condicionamento e Geração com Aplicações Práticas.

2.4.1 Primeiros Geradores PZT

Os autores Umeda, Nakamura e Ueha (1996) *apud* Sodano, Inman e Park (2004) realizaram uma investigação sobre os fundamentos de um gerador, que transforma energia mecânica em energia elétrica usando um vibrador piezelétrico e uma esfera de aço. Os autores também investigaram o efeito das diferentes características de um vibrador piezelétrico. Para simular o mecanismo de geração, criaram um modelo de circuito elétrico equivalente da cerâmica, que será tratado mais adiante.

Os pesquisadores Roundy e Wright (2004) usam a mesma forma de projeto de gerador, viga engastada com uma extremidade livre. A Figura 4(a) mostra a deformação z da barra e em (b) a fotografia do protótipo com dimensão reduzida.

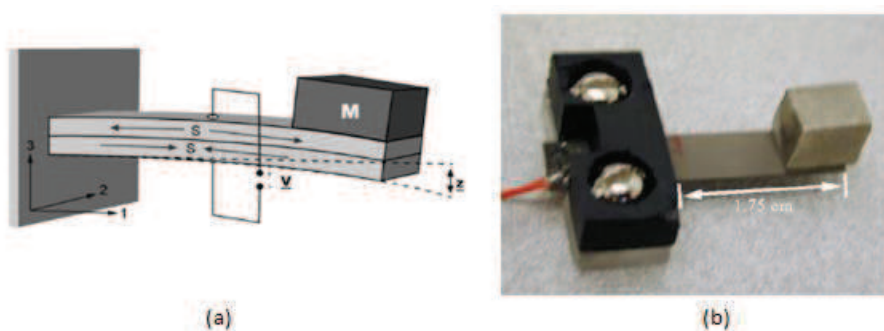


Figura 4 – (a) barra engastada, massa M , tensão elétrica V , strain S e deformação z . Em (b) fotografia do protótipo feito com PZT-5A.

Fonte: Extraída de Roundy e Wright (2004).

Em Cardoso (2006), o autor cria um sistema para aproveitamento de energia vibracional baseado em transdutores acústicos piezelétricos de baixo custo. A Figura 5 mostra o diagrama de blocos e o modelo experimental.

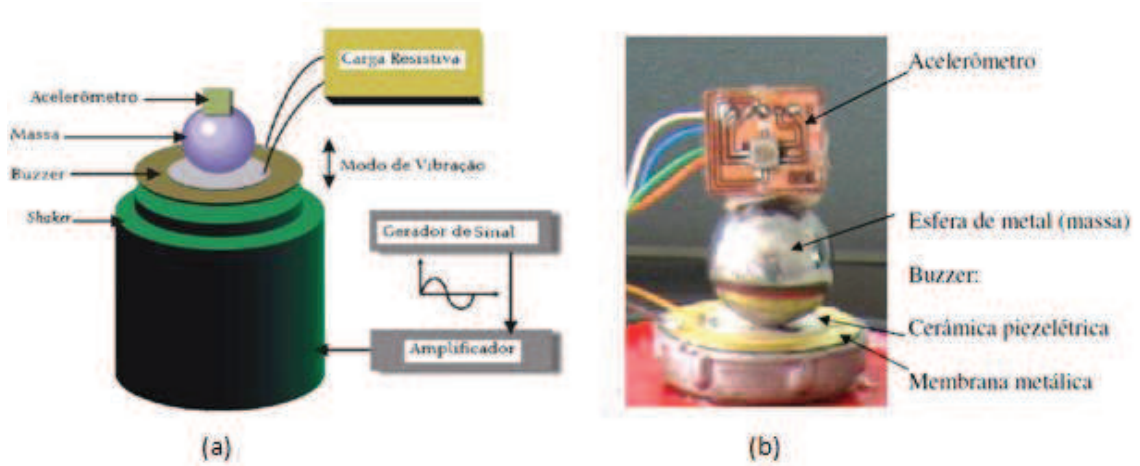


Figura 5 – Diagrama esquemático de blocos do gerador utilizando transdutores acústicos (a) e fotografia do modelo experimental (b) detalhando o acelerômetro acoplado à esfera.
Fonte: Cardoso (2006).

Cardoso (2006) ainda destaca em seus resultados, que o desvio na frequência de ressonância do sistema se deve ao fato da mudança na massa da esfera o que altera a rigidez e a constante de mola do sistema. Em seus ensaios, para uma massa de 44,86g, alcançou 4,05V de tensão elétrica. A Figura 6 apresenta estes resultados.

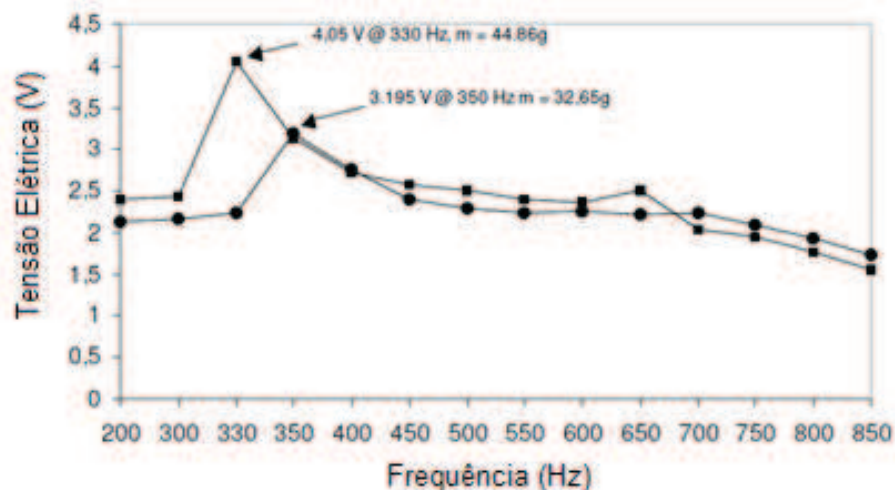


Figura 6 – Tensão de circuito aberto versus frequência.
Fonte: Cardoso (2006).

Para Wischke, Goldschmidtboeing e Woias (2007), relatam que a última década foi de grandes melhorias no desempenho e miniaturização de circuitos eletrônicos. Isso é visto

nos dispositivos celulares, MP3, palmtops, tablets, da mesma maneira que os sistemas inteligentes que gerenciam estes hardwares trazem mais conforto e segurança ao usuário. No entanto, todos estes dispositivos dependem de energia elétrica, e normalmente suportada por baterias. A demanda de durabilidade de ciclos de carga só pode ser satisfeita com os conceitos de fornecimento de energia. A *energy harvesting* poderá constituir-se em uma alternativa para geração e armazenamento de energia, e caminha em direção a uma “endless power supply” (fonte de alimentação sem fim). Os autores trabalham com um conceito de geradores piezelétricos de baixo custo, comumente conhecidos como cápsulas piezelétricas ou simplesmente *buzzers*. E discutem que as áreas de aplicação são promissoras, para dispositivos pessoais alimentados a partir de caminhada humana. A Figura 7, conforme sua pesquisa apresenta a deformação e tensão elétrica medida *versus* força de carga aplicada em um disco piezelétrico.

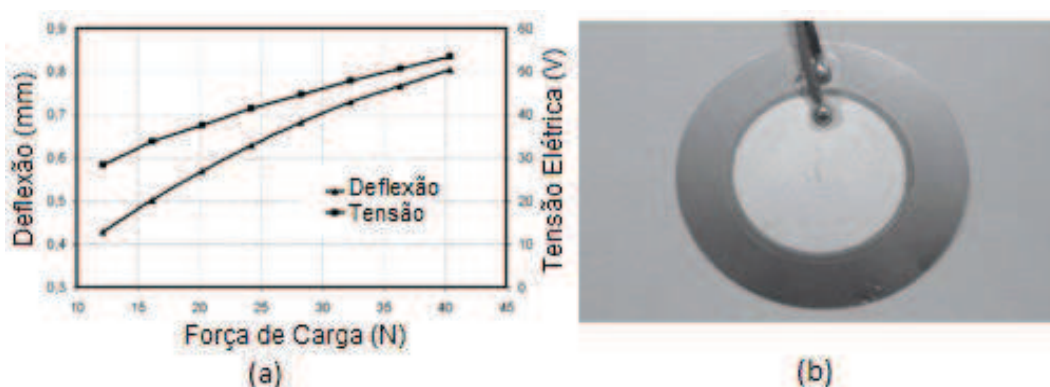


Figura 7 – Em (a) deformação e tensão medidas versus força de carga aplicada em um disco PZT, em (b) a fotografia do disco conhecido como cápsula piezelétrica. Elemento PZT de baixo custo. Fonte: Wischke, Goldschmidtboeing e Woias (2007)

Minazara, Vasic e Costa (2008) utilizaram o circuito elétrico apresentado na Figura 8(a) para alimentar uma lâmpada de LED (Light Emission Diode), gerando energia elétrica por meio de vibrações captadas em um guidão de bicicleta. Em Figura 8(b) usou um *shaker* para simular vibração no sistema gerador PZT. E em Figura 8(c) o dispositivo acoplado ao guidão e ligado a uma lâmpada de LED.

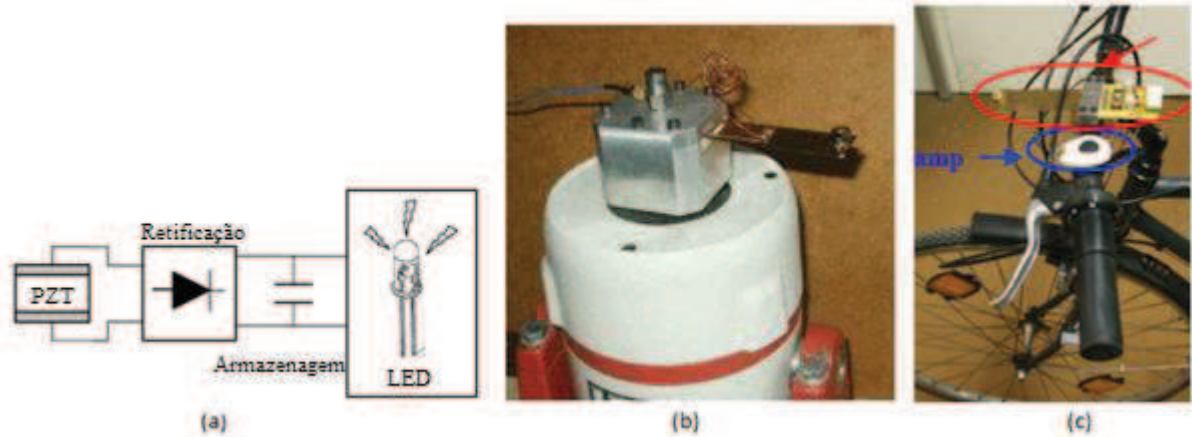


Figura 8 – Em (a) o circuito conversor DC ligado a um LED. Em (b) gerador PZT conectado a um *shaker* para simulação de vibração e (c) o sistema gerador acoplado ao guidão de uma bicicleta e alimentando uma lâmpada de LED.

Fonte: Minazara, Vasic e Costa (2008).

2.4.2 Eficiência de Geração e Circuitos de Condicionamento

Para Goldfarb e Jones (1999), que estudaram a eficiência do material piezoelectrico em uma configuração de cerâmicas em pilha, Figura 9, para geração de energia elétrica, o modelo sugere que o problema fundamental na geração a partir de um material piezoelectrico é que ele armazena a maior parte da energia produzida e devolve-a a fonte de excitação que inicialmente gerou a carga elétrica. Os autores sugerem que a máxima eficiência de geração de energia pode ser obtida pela minimização da quantidade de energia armazenada no interior do material piezoelectrico. A eficiência do modelo foi observada e determinada através de uma análise no espectro de frequências e os valores de resistência de carga.

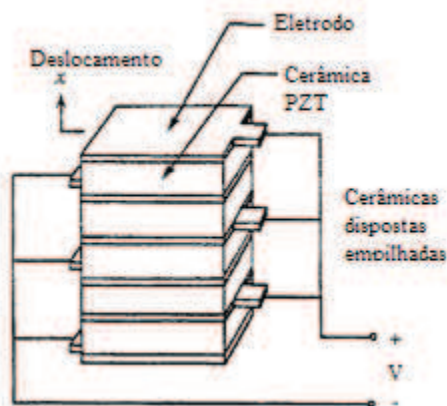


Figura 9 – Ilustração de um sistema em pilha de PZT's.
Fonte: Goldfarb e Jones (1999).

Em Sodano *et al.* (2002), os autores realizaram um estudo para investigar a quantidade de energia gerada por meio da vibração de uma placa piezelétrica, bem como duas formas de armazenamento de energia. A placa PZT foi excitada utilizando um agitador eletromagnético com sinais de excitação em suas frequências ressonantes e modo aleatório. Verificou que a placa piezelétrica poderia gerar uma potência máxima de 2 mW quando excitada com a frequência de ressonância da placa *clamped-free*. Além disso, a capacidade da placa piezelétrica para armazenar a sua potência em ambos os circuitos de um capacitor e uma bateria recarregável foi testada. Este artigo foi o primeiro a demonstrar que a potência de saída do material piezelétrico foi capaz de recarregar a bateria totalmente descarregada sem a utilização de fontes de energia externas. O autor mostra também que ambos os métodos de armazenamento de energia podem ser utilizados, no entanto, no uso de pilhas recarregáveis, verificou-se possuir qualidades de energia de armazenamento que permitem que uma gama maior de dispositivos eletrônicos pode ser projetada e utilizada, do que somente o uso do capacitor de armazenamento. Isto se dá devido à fraca capacidade de carga do capacitor para armazenar grandes quantidades de energia e da sua taxa de descarga rápida, o que faz com que a saída do circuito de uma fonte de alimentação tenha um chaveamento *on-off* periódico.

A configuração do sistema usada por Sodano *et al.* (2002), é uma placa de alumínio colada ao PZT, com espessuras de dimensões 63,5 μm e 266,7 μm , respectivamente. O comprimento e a largura são 63,5 mm e 60,325 mm respectivamente. A Figura 10 mostra estas dimensões e o *layout*.

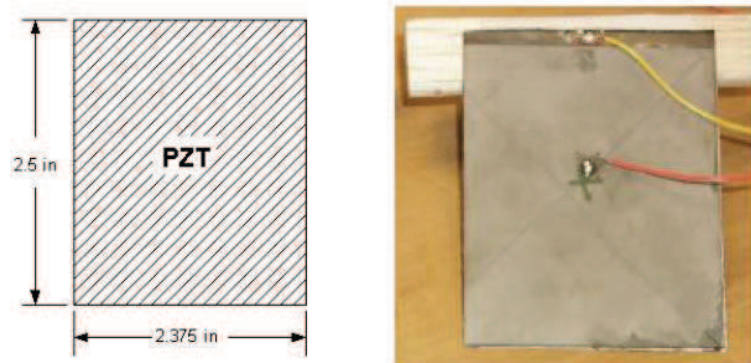


Figura 10 – Dimensões e *layout* do gerador PZT.

Fonte: Sodano *et al.* (2002).

A Figura 11(a) mostra o circuito eletrônico básico utilizado por Sodano para carregar baterias.

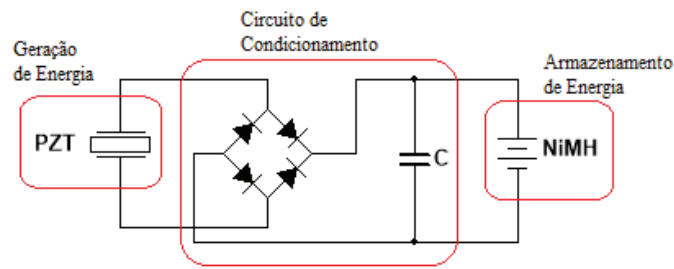


Figura 11 – Dispositivos piezelétricos de geração, e o circuito esquemático de condicionamento de sinal e carga da bateria.

Fonte: Sodano *et al.* (2002).

A Figura 12 apresenta a tensão elétrica de carregamento de uma bateria de 300 mAh *versus* a quantidade de horas necessárias para uma carga. Em (a) o gerador operando em suas frequências ressonantes, e em (b) faixas aleatórias de 0~500 Hz de frequência.

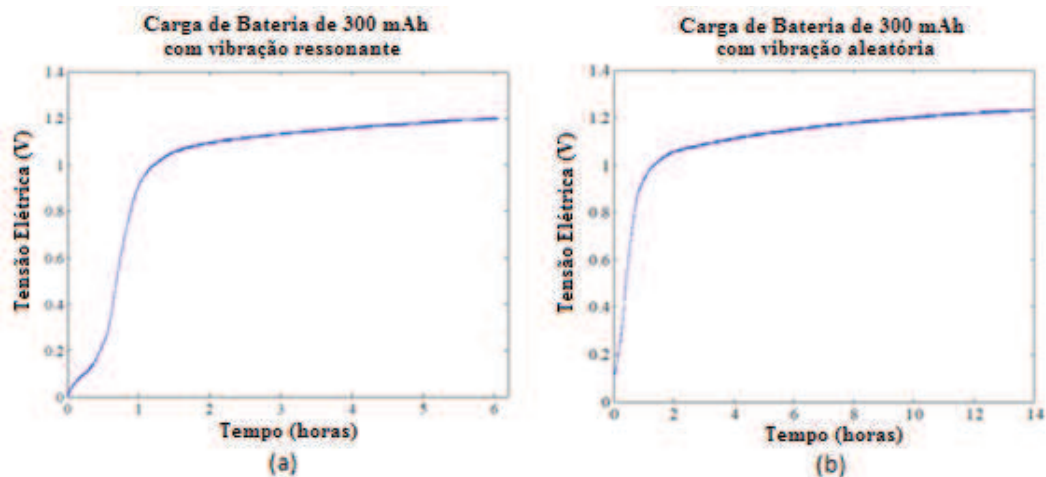


Figura 12 – Em (a) tensão elétrica *versus* tempo em horas, da carga de uma bateria de 300 mAh sendo carregada por meio de um gerador vibracional PZT, em sua frequência de ressonância. Em (b) a mesma bateria sendo carregada fora da faixa ressonante, vibrações aleatórias.

Fonte: Sodano *et al.* (2002).

Este estudo forneceu uma plataforma para construir mecanismos de carregamento de baterias usando materiais piezelétricos. A Tabela 1 mostra o tempo necessário para carregar completamente baterias com várias capacidades diferentes.

Tabela 1 – Tempo requerido para carregar baterias usando material PZT.

Capacidade da Bateria (mAh)	Tempo de Carga na Ressonância	Tempo de carga com sinal aleatório
40	1,6 horas	1,6 horas
80	1,2 horas	2, 0 horas
200	4,0 horas	3,2 horas
300	6,0 horas	5,8 horas
750	7,0 horas	8,6 horas
1000	22 horas	32 horas

Fonte: Adaptado de Sodano *et al.* (2002).

Duas necessidades se evidenciam quando se retiram do meio, energias na forma de vibração. O que deve ser feito com a energia, deve-se armazená-la ou consumi-la? Sodano, Inman e Park (2004) descrevem que, na maioria dos casos, é necessário um meio de armazenar a energia gerada, para após fazer o uso da mesma. Entretanto, sem a possibilidade de acumular quantidade significativa de energia qualquer sistema de *energy harvesting* não será uma fonte com aplicabilidade para a maioria dos dispositivos eletrônicos de consumo. As pesquisas convergem para duas linhas, projetar circuitos de armazenamento da energia, produzida pelo material cerâmico, ou desenvolver circuitos que permitam que a energia seja removida do piezelétrico de uma forma mais eficiente e permitindo que mais energia seja gerada.

Para Guyomar e Lallart (2011), que apresentam e discutem diversas interfaces eletrônicas, acreditam que este método de conversão eletromecânica pode ser descrito em duas categorias, se o material piezelétrico é ligado diretamente a fase de armazenamento ou não. A seguir serão apresentados alguns circuitos eletrônicos propostos por Guyomar e Lallart e sua capacidade de conversão do sinal AC-DC.

O primeiro circuito de interfaceamento não linear para o aprimoramento da conversão eletromecânica consiste no conceito do chaveamento direto das conexões do material piezelétrico ao estágio de armazenamento. Este circuito básico é visto na Figura 13.

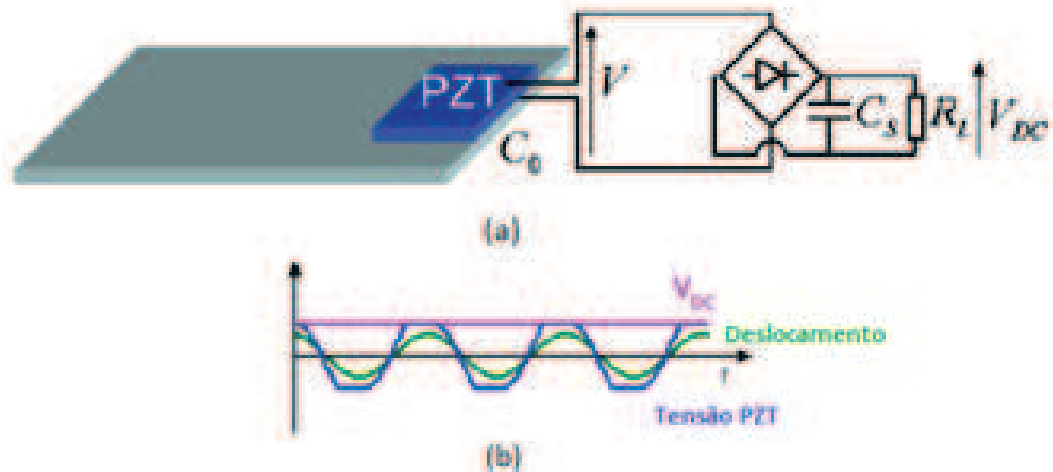
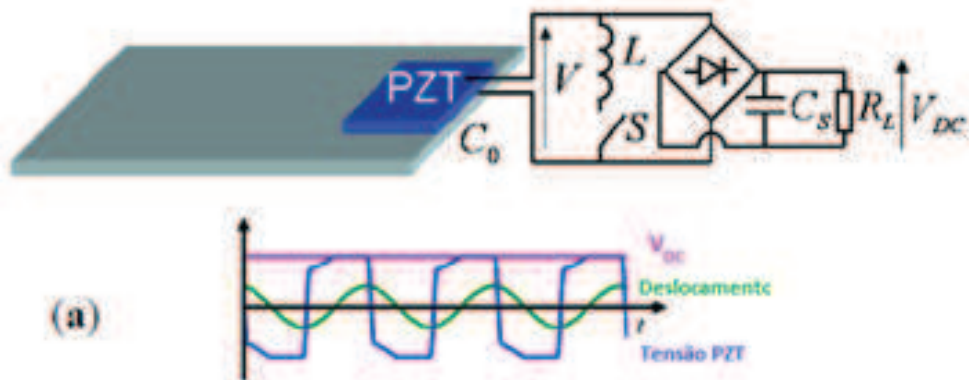


Figura 13 – Em (a) interface básica de *energy harvesting* e (b) níveis de deslocamento, tensão no material PZT e nível V_{DC} da tensão de saída do circuito.
 Fonte: Guyomar e Lallart (2011).

A inclusão de elementos comutadores em paralelo ou série com o material piezolétrico, leva ao conceito de *Synchronized Switch Harvesting on Inductor* – SSHI (Chaveamento Sincronizado de Extração no Indutor). O princípio de operação do SSHI paralelo consiste em inverter a tensão depois do processo de captação da energia, enquanto que para a operação em SSHI série, a inversão e extração de energia ocorrem ao mesmo tempo. Os dois processos são apresentados na Figura 14(a) e (b).



1

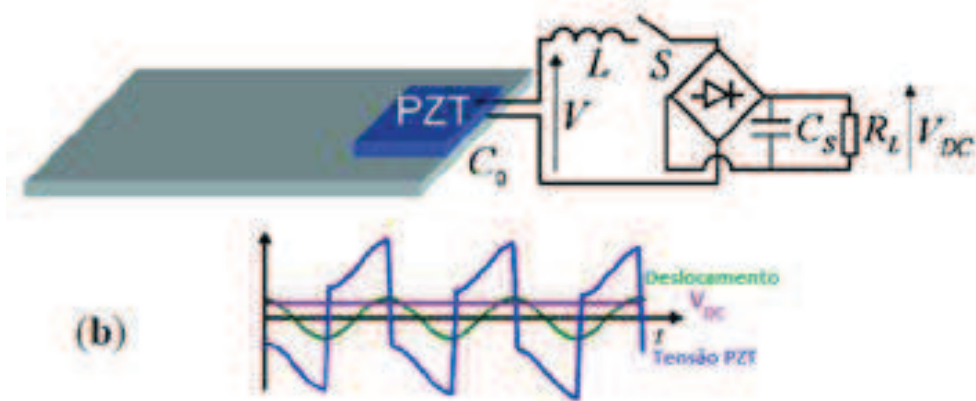


Figura 14 – Chaveamento Sincronizado de Extração no Indutor, em (a) SSHI Paralelo e em (b) SSHI Série.

Fonte: Guyomar e Lallart (2011).

Para os métodos de SSHI é possível ainda substituir a indutância por um transformador, que permite uma mudança na carga visto pelo material piezoelétrico. Esta configuração é chamada de SSHI Híbrida. Este conceito híbrido é possível devido a fase de captação de energia ser desacoplada da fase de armazenamento elétrico. Esta configuração permite uma extração de energia quatro vezes em um período contra duas vezes nos métodos anteriores. Esta configuração tem uma vantagem essencial, a largura de banda de utilização de cargas elétrica é grande. O circuito híbrido pode ser visto na Figura 15.

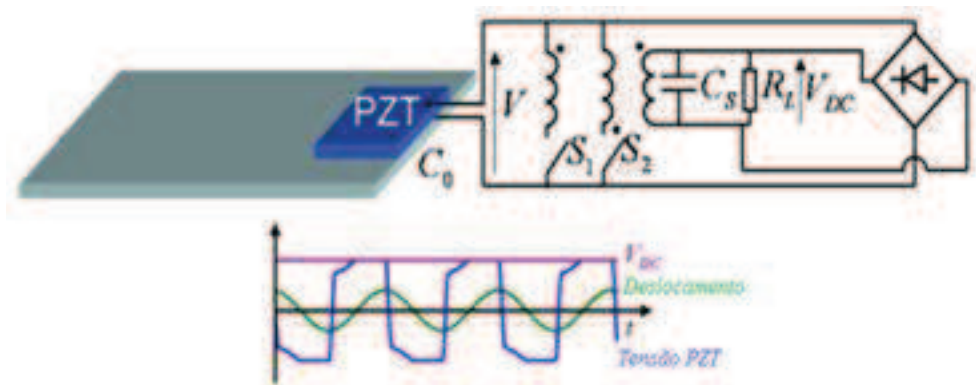


Figura 15 – Circuito SSHI Híbrido.

Fonte: Guyomar e Lallart (2011).

Outro método similar ao SSHI Série foi usado por Wu *et al.* (2009), chamado de *Synchronized Switching and Discharging to a storage Capacitor through an Inductor* – SSDCI (comutação sincronizada e carga de um capacitor por meio de um indutor). Este método

consiste em transferir a energia eletrostática disponível no material piezelétrico para um capacitor de armazenamento por meio de uma indutância. No entanto, o processo de comutação é interrompido por um diodo retificador exatamente quando a tensão elétrica no PZT é igual a zero. Neste instante, ainda não é a energia do indutor que é transferida ao capacitor. Entretanto, para valores de carga resistiva elevada, a tensão piezelétrica não chega a zero, e o circuito funciona de forma semelhante ao SSHI Série. Assim, esta abordagem permite uma extração de energia quatro vezes maior do que casos onde a faixa de valores de carga é larga. Este método é visto na Figura 16.

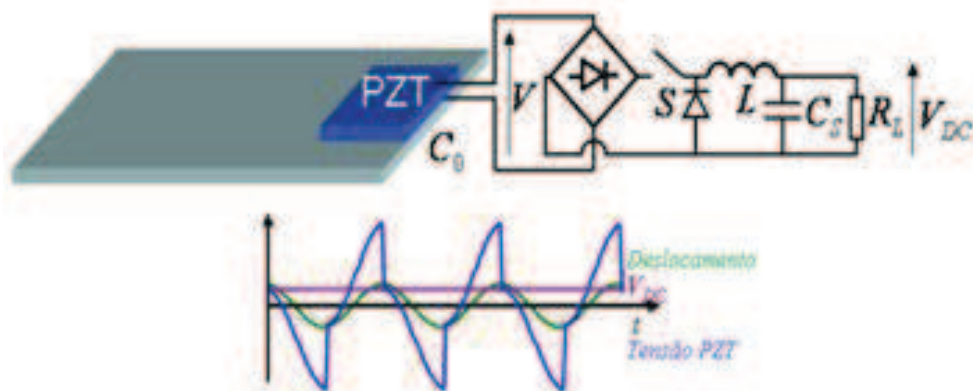


Figura 16 – Circuito SSDCI.
Fonte: Guyomar e Lallart (2011).

Uma preocupação dos autores Guyomar e Lallart (2011) é justamente a utilização dos diodos, que absorvem boa parte da tensão gerada, algumas centenas de mV (no caso de diodos de germânio 300 mV). Por isso destacam que a aplicação de técnicas de tratamento do sinal que utilizam elementos de transformação tem bons rendimentos, pois senão toda energia gerada seria consumida por poucos componentes discretos, a exemplo do diodo. Entretanto, indicam que pode haver uma ligeira modificação no circuito Série SSHI retirando os diodos sem modificar a operação do circuito. Este modelo é apresentado na Figura 17.

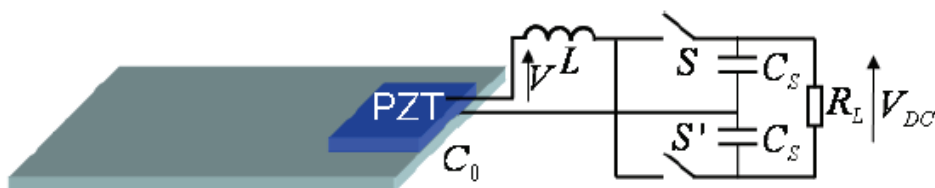


Figura 17 – Circuito similar ao SSHI Série sem diodos em ponte.
Fonte: Guyomar e Lallart (2011).

Outros pesquisadores, Perelli, *et al.* (2013), relatam que para ter o aproveitamento da energia gerada a partir de *energy harvesting* (neste caso, geração a partir do movimento das águas de um rio), se faz necessária a aplicação de um circuito com características semelhantes aos já apresentados. O circuito de condicionamento AC-DC usado por Perelli *et al.*, é apresentado na Figura 18, e é composto por um retificador em ponte, um capacitor para obtenção do nível DC (filtragem), um regulador DC-DC para possibilitar um nível contínuo e adequado ao carregamento de uma bateria recarregável de íon lítio. Além, da resistência de carga R de 1 k Ω .

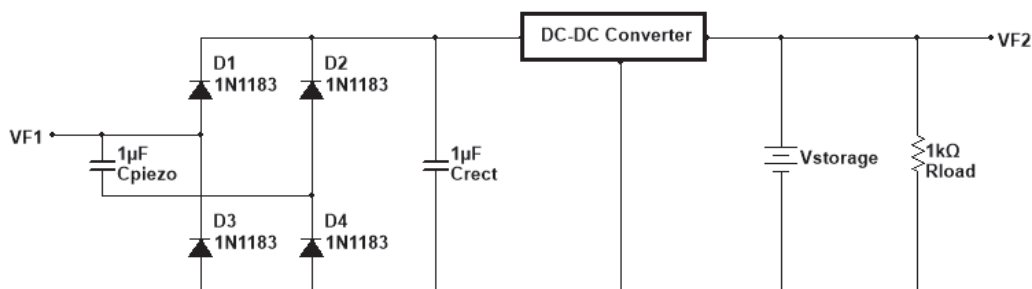


Figura 18 – Circuito de condicionamento do sinal AC-DC de Perelli *et al*, 2013.
Fonte: Adaptado de Perelli, et al. (2013).

2.4.3 Geração com Aplicações Práticas

Conforme Minazara, Vasic e Costa (2008), os autores projetaram um gerador piezelétrico, que foi instalado no guidão e em outros pontos de uma bicicleta, o primeiro experimento que realizaram mostraram que os poucos *mW* que o gerador piezelétrico produziu são capazes de alimentar lâmpadas de LED. Sob condições ideais, tais como vibrações sinusoidais puras em 5 m/s^2 de aceleração e frequência de 12,5 Hz, os valores medidos alcançaram 3,5*mW* por uma carga resistiva adequada de 100 k Ω , esta energia é suficiente para recarregar uma bateria, ou para aplicação em dispositivos de baixo consumo de energia. Na Figura 19, o gráfico, mostra a potência produzida no modelo experimental e teórico *versus* a resistência de carga, em condições de aceleração de 5 m/s^2 e frequência de 12,5 Hz.

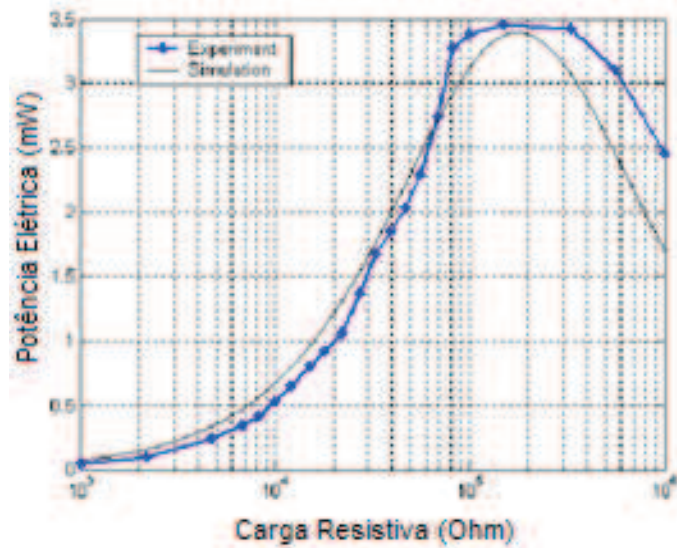


Figura 19 – Potência produzida no modelo experimental e teórico *versus* a resistência de carga, em condições de aceleração de 5 m/s^2 e frequência de $12,5 \text{ Hz}$.
Fonte: Minazara, Vasic e Costa (2008).

Em Rocha *et al.* (2010), os estudos realçaram a crescente demanda por fontes de baixa potência devido à massificação de dispositivos eletrônicos portáteis. Uma das aplicações de cerâmicas piezelétricas é a captação da energia vibracional proporcionada por seres humanos, e durante o caminhar das pessoas, o conceito de geração e armazenamento de energia é evidente e promissor, tornando possível acoplar materiais piezo em solados de calçados. Os autores utilizam um circuito eletrônico semelhante ao de Sodano *et al.* (2002), Figura 20(a) incluindo um diodo em série com a carga e conseguem tensões na ordem de 6 V quando o sistema gerador é submetido a um único impacto, como pode ser visto na Figura 20(b):

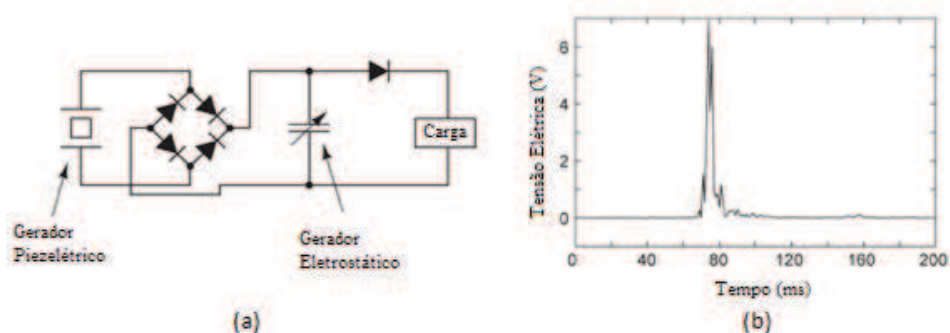


Figura 20 – Experiência realizada em solado de calçado. (a) Diagrama esquemático das ligações entre o filme piezelétrico e o gerador eletrostático, (b) tensão elétrica *versus* tempo depois da retificação em um impacto único aplicado ao gerador.
Fonte: Rocha *et al.* (2010).

Outra aplicabilidade para *energy harvesting* é apontada por Yang e Yun (2011), é o fato da maior necessidade do aproveitamento de fontes geradoras de energias para aplicação em dispositivos portáteis. Uma fonte de alimentação é um componente importante para determinar o tempo de vida útil, tamanho, e peso da eletrônica embarcada em dispositivos eletrônicos. A maioria dos eletrônicos geralmente usa bateria tradicional, que tem uma vida útil limitada, tamanho grande, e custos de substituição elevados. Hoje em dia, o conceito de *self-powered*⁵ é crescente em substituição às baterias convencionais, e os elementos piezelétricos podem vir a suprir esta necessidade. Suas pesquisas, Yang e Yun também vão além, criaram uma espécie de cotoveleira, para gerar energia com o movimento do braço de uma pessoa. Para tal dispositivo, usaram outro tipo de célula geradora piezelétrica, e é chamada de fluoreto de polivinilideno (*polyvinylidene fluoride*), conhecida por PVDF. A Figura 21 mostra um tecido em torno do cotovelo e nela acoplados vários dispositivos geradores (*shell structures*) que com o movimento da articulação do braço, provocam o surgimento de energia. Em (a) tensão elétrica *versus* o tempo em segundos, da estrutura em concha ou casca, proposta pelos autores. Em (b) utilização de uma estrutura *flat* do PVDF mostrando e a tensão elétrica *versus* o tempo, em (c) é visto a fotografia de todo o sistema gerador aplicado ao braço de um ser humano.

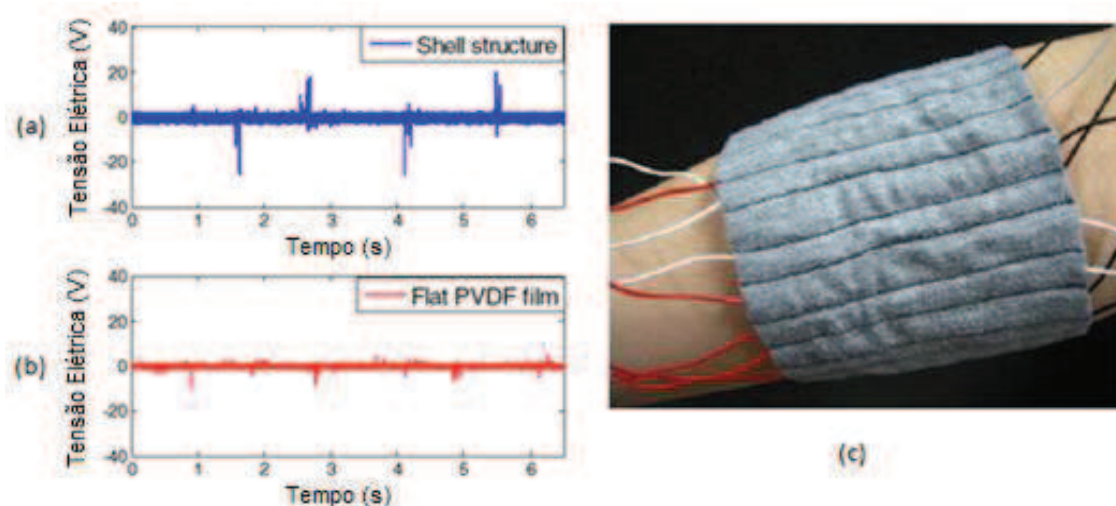


Figura 21 – Tecido com estrutura em casca com piezelétrico incorporado, (a) e (b) tensão geradas desta estrutura, com movimento de articulação do cotovelo, (c) fotografia do sistema por meio de uma cotoveleira.

Fonte: Yang e Yun (2011).

O método de fabricação do protótipo da estrutura em “casca” pode ser visto na Figura 22. A estrutura em casca usa 2 materiais um de poliéster e outro PDVF, e ambos têm

⁵ Sistemas autoalimentados são aqueles que não necessitam de fonte externa de alimentação.

espessura de 127 μm e 110 μm , respectivamente. A estrutura é fixada a um conector metálico (alma - core) por meio de uma fita ou filme adesivo que recebe um aquecimento de 150 $^{\circ}\text{C}$ durante 3 minutos. Após a estrutura em casca estar moldada, Figura 22(a), a alma metálica é retirada, ficando apenas o filme de polímero. Então um filme de PDVF de dimensões 20 mm de comprimento e 2 mm de largura e é conectado ao polímero por meio de adesivos. A Figura 22(b) mostra o protótipo fabricado por Yang e Yun.

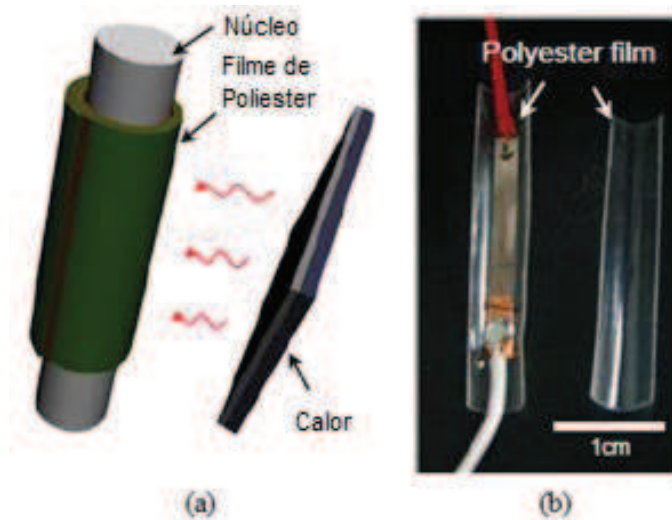


Figura 22 – (a) Método de fabricação e (b) fotografia das cascas metálicas e filme de poliéster do protótipo.
Fonte: Yang e Yun (2011).

Segundo Calìo *et. al.* (2014) e no sentido de criar uma comparação entre alguns geradores de energia piezelétrica da literatura, mesmo sendo em vários modos vibracionais diferentes d_{31} , d_{33} , e d_{15} , a Tabela 2 apresenta os resultados de alguns autores para materiais PZT.

Analisando os dados da Tabela 2, pode-se apontar que o modo d_{31} representa o modo de vibração mais utilizado em dispositivos baseados em piezeletricidade. Dispositivos baseados no modo de vibração d_{33} foram estudados, na tentativa de superar as restrições de desempenho de energia do modo d_{31} . Apesar das expectativas, estes dispositivos não apresentaram desempenho eficaz, por problemas de polarização, devido a um percentual de material piezelétrico que não contribui para a conversão de energia. Como pode ser visto na Tabela 2, os dispositivos de *energy harvesting* em modo de vibração d_{33} oferecem uma tensão de saída mais elevada se comparada aos de modo d_{31} . Por outro lado, os dispositivos, em modo

d_{15} parecem mostrar as melhores performances de energia, mas que exigem um processo de fabricação mais complexo.

Tabela 2 – Comparação entre dispositivos geradores piezelétricos ressonantes.

Referência	Material		d_{ij}	V_{PZT}	f_n	R_L	V_{OUT}	$P_{densidade}$
	Nome	Constante Carga PZT	(pm/V)	(mm ³)	(Hz)	(Ω)	(V)	(W/cm ³)
Ng, T. H.	PZT	d_{31}	320	80,4	223,8	9,9E+3	-	77,0E-6
Park, J. H.	PZT	d_{31}	-55	0,014	130,8	11,0E+3	0,77	1,9E-3
	PZT	d_{33}	100	0,014	118,1	4,5E+6	4,7	136,0E-6
Kim, S. B.	PZT	d_{31}	-55	0,003	243	9,9E+3	1,5 rms	2,0E-3
	PZT	d_{33}	100	0,003	243	2,0E+6	2 rms	1,6E-3
Zhao, J.	PZT	d_{15}	700	65	73	2,2E+6	6,2	51,0E-6

Fonte: Adaptado de Caliò *et. al.* (2014) .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do trabalho será realizada pelo estudo do efeito da piezeletricidade, onde se pretende realizar uma análise dos modelos, características e propriedades piezelétricas de cerâmicas do modelo PZT-4, e dando ênfase no formato retangular das pastilhas piezelétricas que é adequado a captação de energia pelo modo de vibração d_{31} . Este efeito transversal será estudado, também as principais características dos materiais PZT, além das propriedades envolvidas neste processo de geração de energia elétrica, que estão detalhadas no Anexo C, tais como: Constante de Frequência, Constantes Piezelétricas, Coeficiente de Acoplamento Eletromecânico, Fator de Qualidade Mecânica, Temperatura de Curie, Razão de Poisson, Densidade, Permissividade Relativa, Módulo de Young, Constante Dielétrica, Campo Elétrico Coercivo. Sobretudo, serão apresentados os principais procedimentos metodológicos utilizados para realização dos ensaios experimentais e obtenção de resultados. Sinteticamente, descreve-se as seguintes etapas:

- Escolha da célula piezelétrica mais adequada a montagem do sistema;
- Modelo matemático de viga engastada com extremidade livre;
- Modelagem do sistema piezelétrico a partir de um Modelo de Circuito Equivalente;
- Montagem do sistema piezelétrico (usinagem da chapa metálica, soldagem de fios flexíveis aos eletrodos da cerâmica, colagem da cerâmica à chapa de latão, fixação e engaste no came-seguidor);
- Montagem do circuito eletrônico de condicionamento e ensaio do sistema piezelétrico (frequência, aceleração, tensão e corrente elétrica, tempo de carga de capacitores, potência gerada);
- Análise, comparação e apresentação dos dados experimentais e simulados.

O fluxograma que é apresentado na Figura 23 apresenta etapas da fase de construção mecânica do sistema e também as etapas elétricas de projeto e construção de circuitos eletrônicos da modelagem da cerâmica e circuito de condicionamento, além da apresentação de resultados finais.

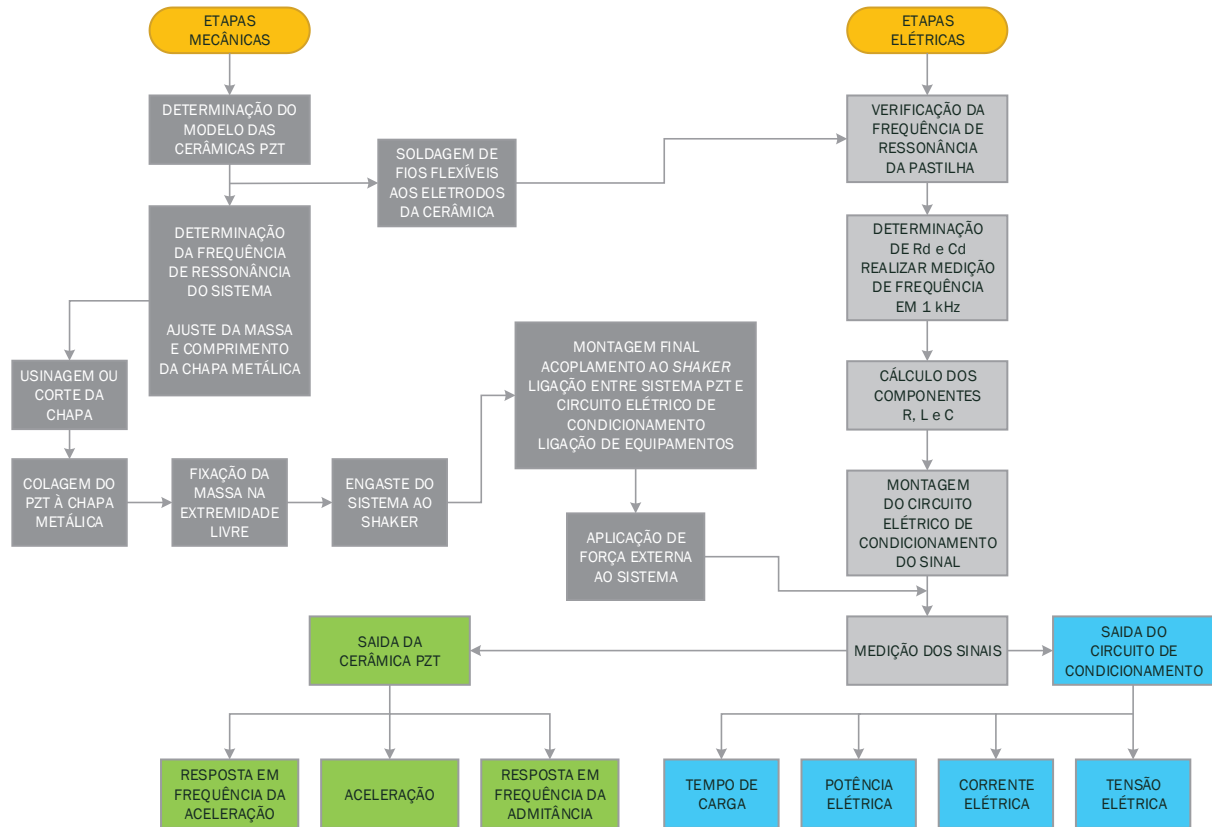


Figura 23 – Fluxograma das etapas de construção mecânica e elétrica.

Fonte: Autoria Própria

O sistema utilizado para gerar energia é uma estrutura de viga engastada com extremidade livre, com material piezelétrico ligado a face superior (modelo proposto) ou ainda a face superior e inferior. O formato escolhido e utilizado para a célula PZT foi retangular e é uma geometria atraente para a captação de energia a partir de vibrações mecânicas usando viga engastada. Este modelo é concebido para funcionar em um único modo de flexão, assim, forçando a pastilha piezelétrica a gerar carga a partir do efeito d_{31} (constante de deformação piezelétrica na direção transversal ao movimento). Uma viga engastada proporciona baixas frequências de ressonância, sendo variáveis pela adição ou retirada de massa na extremidade livre da viga. Também é uma estrutura de pequenas dimensões e elevados níveis de tensões mecânicas na superfície de contato da viga com o material piezelétrico. Entretanto, para modelar o gerador piezelétrico se faz necessário conhecer algumas das principais grandezas relacionadas à piezeletricidade. Estes parâmetros são fundamentais para o modelo e estimativa das características do atuador piezelétrico em tela, e podem ser melhor verificados no Anexo C.

Para verificar o processo de geração em materiais piezelétricos, foram necessárias cerâmicas PZT's e chapas de latão. O esboço deste experimento está sendo mostrado na Figura 24, que evidencia o transdutor piezelétrico tipo pastilha acoplado a uma barra metálica e esta, engastada em suporte próprio. Para o experimento, este modelo mecânico levará em consideração, as cerâmicas do modelo PZT-4 com formato retangular, com dois tipos de dimensão, que variam de 20 x 20 x 1,0 mm (comprimento x largura x espessura) e 10 x 10 x 0,5 mm.

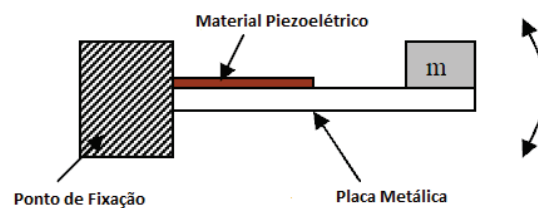


Figura 24 – Esquema do transdutor piezelétrico tipo placa colado a uma placa metálica.

Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 3 destaca as principais propriedades e mostra uma comparação percentual entre estas de alguns modelos de cerâmicas piezelétricas. Com isso, buscam-se evidências físicas dos materiais, que possam subsidiar a escolha e a definição de qual é o tipo e modelo ideal para a aplicação em geração de energia elétrica a partir de movimento mecânico vibracional captado do meio (*energy harvesting*).

Pelas características apresentadas e destacadas na Tabela 3, percebe-se que o tipo de cerâmica PZT-4 apresenta valores altos para algumas propriedades piezelétricas. O fator de acoplamento k está relacionado a eficiência do material na conversão de energia elétrica em mecânica e vice versa. O valor não é o mais alto entre os modelos mas com percentual de 89 %. O campo elétrico coercivo é a quantidade de tensão elétrica por centímetro que o material suporta sem perda da despolarização, valor mais alto dos modelos verificados. A constante de carga piezelétrica d informa qual é a proporção entre a variação dimensional (Δl) do material piezoelétrico (em metros) e a diferença de potencial aplicada (em Volts), e entre a geração de cargas elétricas (em Coulombs) e a força aplicada no material (em Newtons). Valor tido como muito útil para a criação das cargas elétricas pela força externa aplicada. A definição da constante de tensão piezelétrica g é a proporção entre a diferença de potencial gerada (em Volts) e a força aplicada (em Newton) para uma cerâmica com comprimento de 1 metro, valor em 100 % para o material utilizado, fator muito bom se comparado a outros modelos. E fator de

qualidade mecânica Q_m é uma medida das perdas mecânicas (amortecimento) do material, é uma fator adimensional e apresenta percentual alto, 94 %. Mediante estas características do modelo PZT-4, fica este determinado para uso e aplicação ao gerador piezelétrico proposto.

Para um melhor entendimento da Tabela 3 o 100 % refere-se àquela propriedade, em que o material é melhor ou tem valores mais altos se comparados com os outros modelos. Exemplificando, para uma cerâmica do modelo B, o seu fator de acoplamento k é 51% do fator de acoplamento da cerâmica do modelo PZT-5H que produz os 100 % desta propriedade.

Tabela 3 – Classificação de cerâmicas de acordo com suas propriedades e a relação percentual entre elas.

PROPRIEDADES DAS CERÂMICAS		Classificação de Cerâmicas em Relação à %.					
		B	PZT-2	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-8
Fator de Acoplamento	k	51	72	89	92	100	8
Sensibilidade de Curto-circuito		26	26	50	64	100	38
Sensibilidade de Circuito Aberto		37	100	68	65	50	69
Permissividade	ϵ	35	13	38	50	100	29
Complância	S	52	71	75	100	100	70
Campo Elétrico Coercivo Relativo	E_C	44	46	100	12	8	-
Tensão Mecânica Rel. Constante de Carga Piezelétrica	d	23	24	100	15	16	-
Compressão Mec. Rel. Constante de Tensão Piezelétrica	g	25	-	100	25	19	-
Fator de Qualidade Mecânica	Q_m	-	-	94	8	10	100
Temperatura de Curie	θ	115°C	370°C	328°C	365°C	193°C	300°C

Fonte: Technical Publication TP-226 - Morgan Electro Ceramics.

Destacam-se as propriedades do fator de acoplamento com 89 %, o fator de qualidade mecânica com 94 % e as constantes de carga piezelétrica e tensão piezelétrica, ambas com 100 % para a cerâmica PZT-4.

3.1 DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO DOS SINAIS ELETROMECAÑICOS

Algumas medições preliminares dos sinais eletromecânicos foram necessárias, como: faixa de frequência de operação do came-seguidor, amplitude das acelerações a que o sistema seria submetido, tensão elétrica gerada (preliminar). Para tal, foram utilizados acelerômetros e softwares coletores de dados. Os pontos de medição serão detalhados em

capítulo subsequente. E para produção da força mecânica externa foi utilizado o came-seguidor, que neste projeto, tem a mesma função de um *shaker*. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Vibrações da UTFPR, e foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Acelerômetros piezelétricos de alta sensibilidade;
- Bancadas isoladas para ensaios de vibrações com suporte para fixação do sistema;
- Coletor de dados de vibração, CSi;
- Analisador e lâmpada estroboscópica, NK100;
- Computadores com softwares: Scilab (versão *student*), DBF Suite (versão licenciada);
- Osciloscópio Icel (20 MHz).

3.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICAS

As etapas da construção mecânica do sistema de geração de energia serão detalhas a seguir, e terão sequencia embasadas a cada passo dado para a obtenção do sistema de viga engastada com cerâmica PZT fixada a viga.

3.2.1 Cerâmicas PZT's

As cerâmicas PZT's adquiridas são do modelo PZT-4, consideradas as mais recomendadas para aplicação em geração de energia elétrica. O formato escolhido foi quadrado (modelo disponível pelo fornecedor), pois o projeto de viga engastada utiliza uma viga metálica de apoio, que tem formato semelhantes, variando apenas suas dimensões. As dimensões selecionadas para a pastilha PZT foram duas: 10 x 10 x 0,5 mm, 20 x 20 x 0,5 mm, todas com eletrodos do tipo WR (uma face positiva e a outra negativa) como apresentado na Figura 25. Fios flexíveis foram soldados aos eletrodos positivo e negativo. Cuidados mínimos com a solda: não acrescentar muito estanho ao ponto de solda, pois provoca rigidez ao PZT, também cuidar a temperatura de solda, pois alguns dispositivos perdem suas propriedades e polarização quando submetidos a altas temperaturas. O tipo de eletrodo escolhido proporciona que toda a área inferior da pastilha fique em contato com a chapa metálica. A Figura 28 destaca esta situação da cerâmica já colada ao latão. Este procedimento proporciona 100% de área de contato entre

cerâmica e viga metálica. Nesta configuração o movimento transversal será absorvido pela cerâmica PZT.

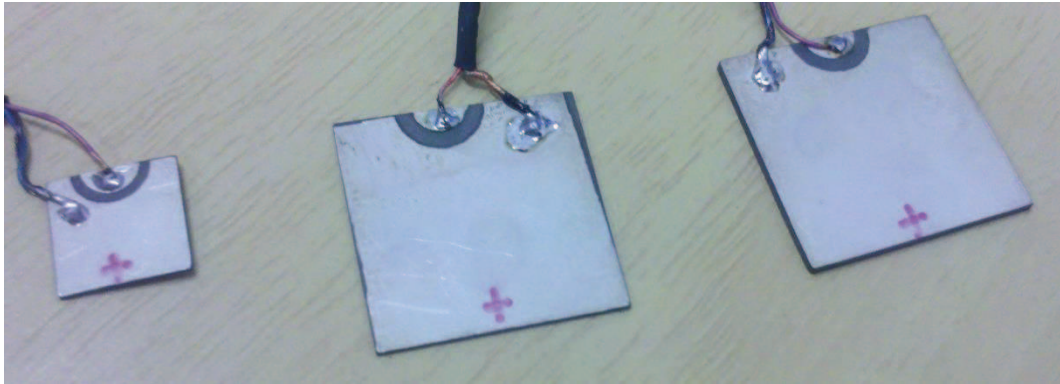


Figura 25 – Cerâmicas PZT do tipo PZT-4 com eletrodos WR e variações nas três dimensões.
Fonte: Autoria Própria.

3.2.2 Corte da Chapa Metálica

A chapa de latão foi cortada/usinada seguindo o projeto mostrado na Figura 26. Foi utilizada uma fresa CNC. A borda externa é necessária à fixação na fresa. Realizado o corte, somente o interior da peça será aproveitado para o gerador de energia elétrica. Dependente do tamanho da cerâmica PZT, o latão sofre alteração na sua largura, ou 10 mm ou 20 mm. O comprimento também é ajustado conforme a faixa de frequências que deseja-se trabalhar.

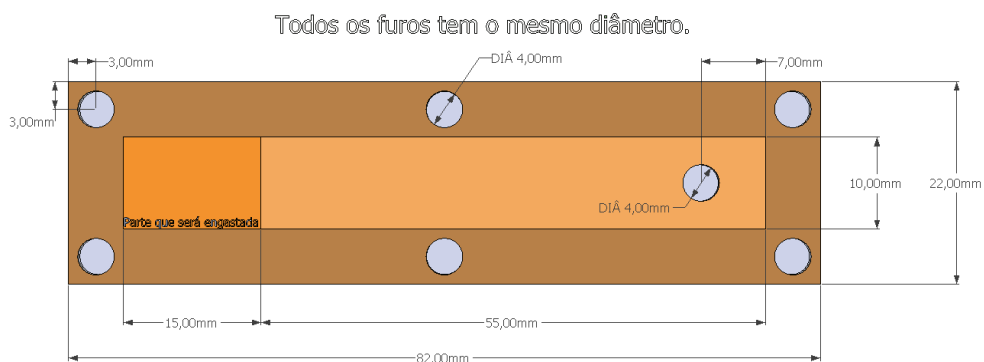


Figura 26 – Vista superior da chapa de latão que foi usinada em fresa CNC.
Fonte: Autoria Própria.

Primeiramente serão realizados ensaios experimentais e verificados os resultados com as cerâmicas PZT de dimensões de 10 mm de comprimento x largura. O

tamanho da viga de latão é importante para determinar as frequências de excitação natural e de ressonância do sistema. O cálculo da viga engastada é demonstrado no Anexo A.

3.2.3 Viga Metálica

O material escolhido foi o latão pois tem características mecânicas específicas que transferem a qualquer material sobreposto a ele, uma grande parcela da vibração por ele captada. Esta transferência de vibração mecânica é adequada ao projeto do gerador elétrico e será captada pela cerâmica PZT. O fornecedor garante um certificado de qualidade de origem, cuja composição química é Cobre = 62% / Zinco = 35% / Chumbo = 3%. A Figura 27 apresenta a estrutura metálica (latão) já usinada, pronta para utilização. Um furo na extremidade livre para melhor fixação da massa que será adicionada ao sistema.



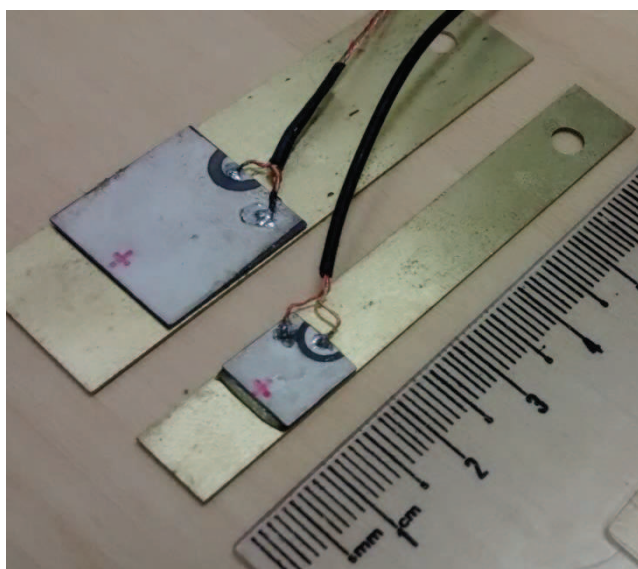
Figura 27 – Chapas metálicas (latão).
Fonte: Autoria Própria.

3.2.4 Cola Epóxi

A cola utilizada para fixação dos dois materiais, latão e pastilha PZT, é do tipo epóxi, com dois elementos, um deles a resina e o outro, o endurecedor. O fabricante recomenda que a secagem ocorra em 10 min à temperatura de 25 °C. Em temperaturas inferiores, a secagem é mais lenta. Após 8 horas, o produto adquire sua resistência final. Para peças que sofrerão esforços mecânicos, caso do gerador piezelétrico, recomenda-se aguardar 24 horas. O sistema mecânico a que será submetido este material epóxi envolve acelerações numa faixa de 0 a 9,81 m/s², e poderia apresentar algum tipo de ruptura, seguiu-se então, a determinação de secagem de 24 horas, assim a cola epóxi ficará com sua característica de secagem total e conseqüentemente com maior rigidez mecânica.

O processo de colagem da cerâmica na chapa de latão foi bastante simples, embora a quantidade residual de cola, pudesse provocar mínimas variações de peso, amortecimento, rigidez, perda de transferência de vibração entre metal e cerâmica, entre outros fatores que poderiam afetar a geração de energia. O processo de mistura é bastante simples apenas tomando o cuidado para não demorar muito para aplicar a cola aos materiais, pois corre-se o risco de secagem e dificuldade de manuseio devido ao endurecimento. Então, aplica-se a cola em toda a face do eletrodo negativo da cerâmica. Na sequência, faz-se a fixação da pastilha PZT ao latão e aguarda-se o tempo necessário ao processo de curagem e secagem total.

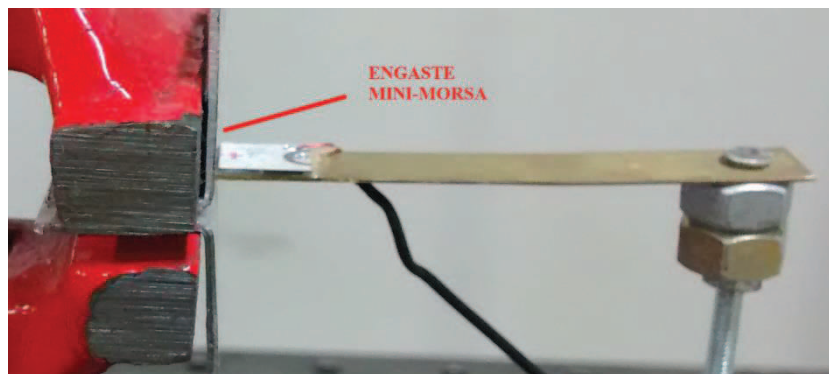
Finalizada a etapa de secagem da cola, fica assim apresentada, na Figura 28 o gerador PZT. A área de contato entre metal e cerâmica se dá pelo eletrodo negativo e é pelo efeito transversal sofrido pela pastilha que serão transformados em energia elétrica, os movimentos mecânicos aplicados ao sistema. Percebe-se que a preocupação com a maior rigidez mecânica e possível aumento de massa do sistema se confirma. Na mesma figura vê-se a peça de 10 mm de largura, com um excesso residual de cola. Não compromete a geração, mas pode diminuir a qualidade do sinal gerado, que é afetado pela “nova” rigidez mecânica do conjunto, alterando os resultados da quantidade de massa que será acoplada a extremidade livre, e a frequência ressonante do sistema também pode sofrer alterações.



**Figura 28 – Pastilha PZT fixada no latão por meio da cola epóxi.
Fonte: Autoria Própria.**

3.2.5 Fixação e Engaste

Realizadas as etapas anteriores, necessita-se realizar a fixação do sistema ao *shaker* (came seguidor) e a fixação ou engaste do gerador PZT. Foi utilizada uma mini morsa que proporcionou a união do came e do gerador piezelétrico. Esta etapa é bastante simples apenas tomando o cuidado para realizar a fixação adequada para que o sistema não fique com folgas e perca rendimento a medida que forças externas atuem sobre ele. O engaste pode ser visualizado na Figura 29.



**Figura 29 – Vista lateral do engaste do sistema piezelétrico.
Fonte: Autoria Própria.**

O engaste da placa metálica é muito importante, pois sem a fixação rígida, o sistema gerador pode não operar nas frequências de excitação desejadas. Destaca-se que o sistema deve ter uma boa flexibilidade/rigidez mecânica, proporcionando uma vida útil que chega a vários milhões de ciclos. Segundo Minazara, Vasic e Costa (2008), mesmo com os baixos níveis de vibração, tais tipos de transdutores podem ser deformados consideravelmente. Quanto mais o elemento piezelétrico é deformado, mais energia elétrica é produzida.

3.2.6 Viga em Balanço

A técnica aplicada por Minazara, Vasic e Costa (2008) com relação ao comportamento mecânico descreve que se o gerador está excitado e considerando o entorno da sua frequência de ressonância e, no caso de um pequeno deslocamento para o qual o movimento linear é remanescente, a estrutura com os elementos piezelétricos pode ser modelada pelo

sistema massa mola piezo, como o mostrado na Figura 30. Em uma abordagem simplificada, a estrutura considera uma massa M rígida colada sobre uma mola K , correspondente à rigidez da estrutura mecânica, um amortecedor D , correspondente às perdas mecânicas da estrutura, e uma pastilha piezoeletrica correspondente ao elemento piezoeletrico colado a ele. O deslocamento de massa é u . I e V são a corrente de saída e a tensão na camada piezoeletrica que está colada no dispositivo de *energy harvesting*.

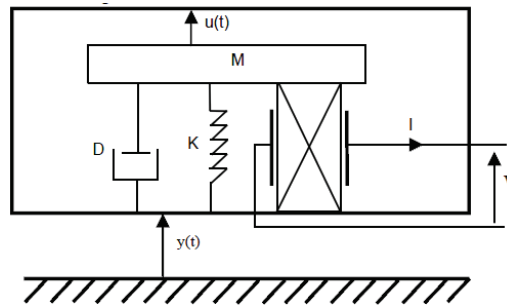


Figura 30 – Sistema massa mola piezo amortecido.
Fonte: Minazara, Vasic e Costa (2008).

Este modelo será reproduzido para ensaiar o comportamento modal com chapas de latão, onde umas das medidas fixas é a espessura de 0,5 mm. Variações nas medidas da chapa de latão poderão ocorrer conforme resultados indicarem que o parâmetro flexibilidade e rigidez devam ser alterados. A determinação das variáveis comprimento l e massa m que são mostradas na Figura 50, foram adotadas conforme Rao (2008). O cálculo foi apresentado no Anexo A.

3.2.7 Came-Seguidor (*Shaker*)

O dispositivo came-seguidor que simula a utilização de um *shaker* é composto por três componentes: inversor de frequência, motor de indução trifásico e o came-seguidor. O inversor é utilizado para inserir uma frequência de excitação externa ao motor de indução. Este por sua vez é responsável pelo movimento de rotação que será transferido ao êmbolo. Este êmbolo tem um eixo de fixação, ao eixo do motor, excêntrico. Esta excentricidade é responsável pelo deslocamento vertical do êmbolo e desta forma transferindo a aceleração que o sistema mecânico de aceleração está oferecendo ao sistema piezoeletrico de geração. O came-seguidor é visto na Figura 32.

3.3 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO SISTEMA DE GERAÇÃO PIEZELÉTRICA

Neste momento será apresentado o sistema de geração piezelétrica de baixa potência. O sistema de geração implementado pode ser visualizado na Figura 31. É compreendido de uma chapa de metal (latão), uma massa na extremidade livre, a cerâmica PZT colada a placa de metal, o circuito de condicionamento do sinal (retificação, filtragem, carga R) e a fase de armazenamento da energia gerada (capacitor).

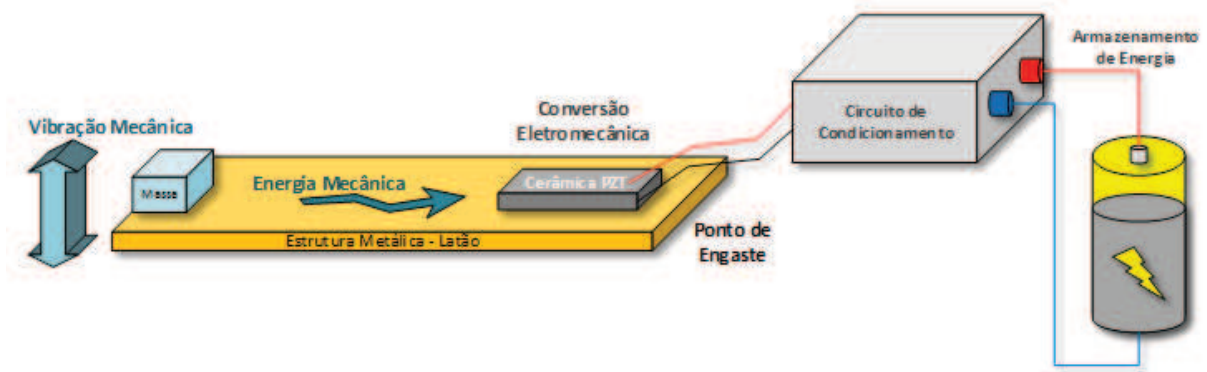


Figura 31 – Diagrama do sistema piezelétrico.
Fonte: Autoria Própria.

O sistema piezelétrico apresentado na Figura 32 é visto de forma mais ampla, com todos os subsistemas que compõem o gerador piezelétrico e equipamentos necessários a medição dos sinais de saída do circuito de condicionamento do sinal gerado. Destaca-se em especial, a cerâmica PZT acoplada a chapa de latão (subseção 3.2.1 e 3.2.3), o circuito de condicionamento (subseção 3.3.2) e o came-seguidor (subseção 3.2.7). Os modelos matemáticos da cerâmica PZT e da viga engastada serão detalhados *a posteriori*.

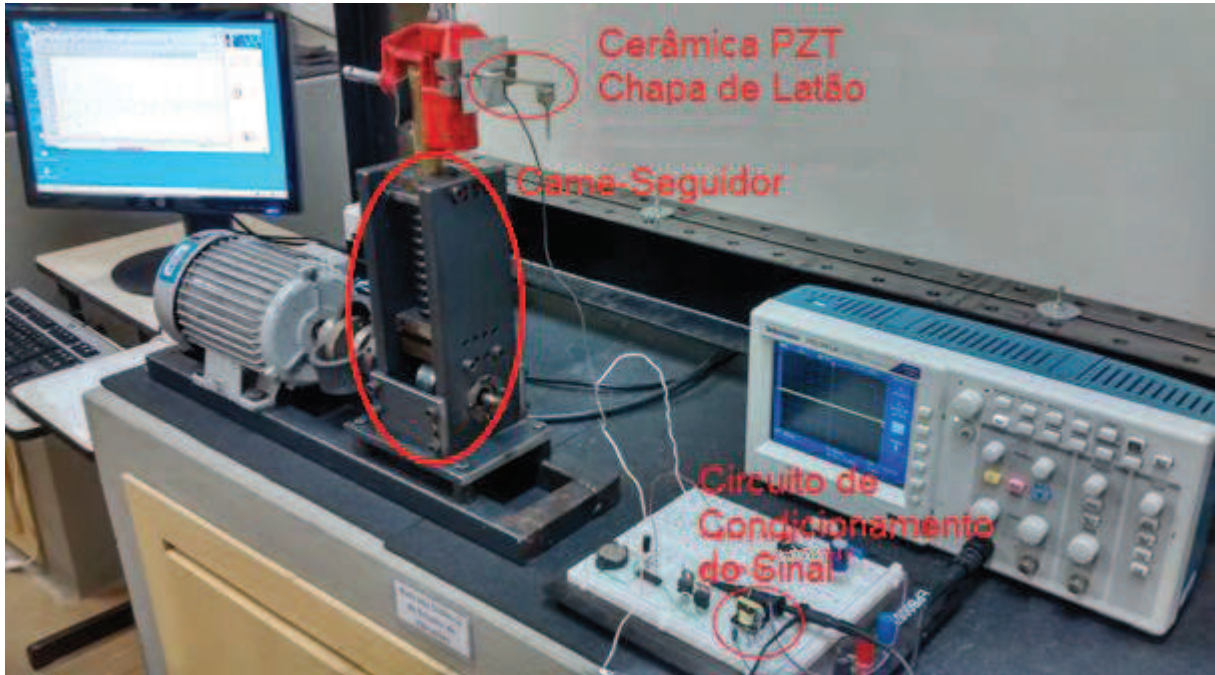


Figura 32 – Sistema completo de geração de energia piezelétrica.
Fonte: Autoria Própria.

3.3.1 Modelo Matemático de Viga Engastada com uma Extremidade Livre

De fato, este componente tem grande importância no sistema de geração, pois é nele que se dará a passagem da energia mecânica (vibração) e transferência da mesma para a pastilha PZT e conseqüentemente a conversão em energia elétrica. De certa forma, é um dispositivo de construção simples, composto por uma chapa metálica (latão) e colada à chapa, uma cerâmica PZT (o detalhamento do processo construtivo da viga foi discutido e apresentado no capítulo 3) com uma massa de aproximadamente 10g na extremidade livre. Este sistema é responsável pelo recebimento das vibrações mecânicas geradas pelo came-seguidor. A Figura 28 apresentou este dispositivo sem a adição da massa.

Quanto menor o tamanho do dispositivo captador de *energy harvesting*, melhor a sua capacidade de integração e miniaturização. Todavia, a produção de energia elétrica é reduzida a medida que o gerador diminui. Portanto, um projeto ideal é necessário para a conversão eletromecânica ter a medida exata entre produção de energia elétrica e um dispositivo compacto, segundo Swee-Leong e Abraham (2012). Geralmente a base de um movimento harmônico excitado em uma viga engastada do tipo unimorfo é modelado como um sistema massa mola piezo (k, M, c). As vibrações forçadas amortecidas com excitação harmônica são

aquelas que ocorrem quando o sistema sofre a ação de forças externas durante o movimento. A excitação harmônica é facilmente encontrada em sistemas mecânicos: máquinas rotativas desbalanceadas, automóveis deslocando-se sobre estradas de perfil senoidal, etc. O gerador piezelétrico em estudo é exatamente um destes exemplos, é um movimento harmônico excitado por força externa (came-seguidor). Será preciso conhecer o efeito da resposta forçada de um sistema mecânico quando submetido a uma força harmônica que atua livremente sobre a massa translacional, conforme Soeiro (2008). Este cálculo foi apresentado no Anexo B.

3.3.2 Modelo do Circuito Equivalente da Cerâmica Piezelétrica

Será apresentado a partir de agora o modelo matemático que a pastilha PZT representa, e é por meio dele que serão aproximados os valores dos componentes discretos que farão parte deste modelo. Para realizar este modelamento matemático da célula piezelétrica vamos aproximá-lo a um circuito eletrônico, conforme Perelli *et al.* (2013). Este modelo é semelhante a um sistema genérico de segunda ordem, visto no Anexo A, na Equação (41). Aqui será feito um arranjo dos subíndices com propósito único de simplificação dos termos da equação. A Equação (41), do Anexo A, por conveniência, será rerepresentada:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (1)$$

Onde, m é a massa, x é o deslocamento a partir de uma posição inicial, c é o coeficiente de amortecimento, k a constante elástica da mola e F a força externa aplicada.

Um sistema mecânico massa mola amortecido pode ser comparado ao modelo de um circuito eletrônico equivalente, conhecido apenas por circuito RLC. Por este caminho, é possível simular o comportamento do sistema com um software de simulação eletrônica. A Equação (1) é equivalente à Equação (2), mostrada a seguir, no domínio da eletrônica.

$$L \frac{di(t)}{dt} + R i(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = e(t) \quad (2)$$

Esta equação representa a Lei das Tensões de Kirchoff para o circuito RLC da Figura 33. Considerando a Equação (2) como uma função da carga elétrica Q , que é obtida pelo Princípio da Conservação de Energia pela integração da corrente i no intervalo de tempo $0 \sim t$, portanto a equação pode ser reescrita como:

$$L \ddot{Q}(t) + R \dot{Q}(t) + \frac{1}{C} Q(t) = e(t) \quad (3)$$

O esquemático equivalente, visto na Figura 33, é composto por um fonte de tensão $e(t)$ (equivalente a força externa), dois componentes de armazenagem L e C e um componente dissipativo R . Cada elemento em separado, pode ser comparado a um elemento mecânico equivalente. Estas relações são mostradas na Equação (4). O circuito puramente elétrico é acompanhado na Figura 33, com um acoplamento eletromecânico que será abordado na sequência.

$$L = m$$

$$R = c$$

$$\frac{1}{C} = k \quad (4)$$

$$Q(t) = x(t)$$

$$e(t) = F(t)$$

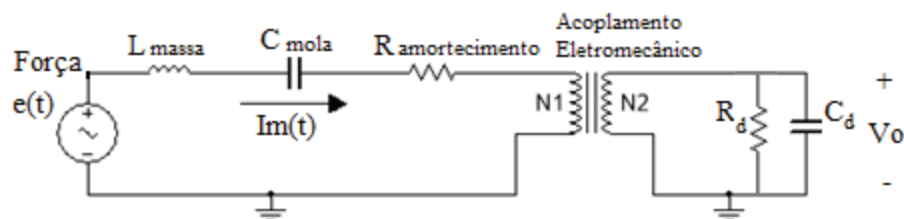
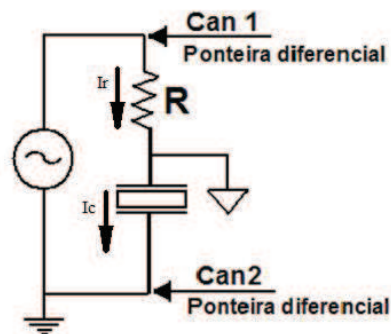


Figura 33 – Esquemático do modelo do circuito equivalente da cerâmica PZT.
Fonte: Autoria Própria.

O circuito apresentado em seu lado elétrico é um circuito RLC série e no lado mecânico é um circuito RC paralelo. Cada componente será calculado na sequência. Neste sentido, é possível simular e medir o valor do deslocamento de $x(t)$ para uma determinada força externa harmônica $F(t)$ aplicada ao sistema. É possível realizar a estimativa do valor da carga elétrica $Q(t)$ para uma determinada tensão elétrica $e(t)$ inserida no circuito, a partir da medição de $i(t)$, como por exemplo, utilizando um amperímetro. Por outro lado, no circuito, estão representados o acoplamento eletromecânico por meio de um transformador e a resistência e capacitância (de amortecimento) R_d e C_d respectivamente, do material piezelétrico, que é um parâmetro intrínseco do componente. A resposta do circuito com entrada senoidal é análoga ao obtido com o modelo mecânico.

Este tipo ou variações deste modelo de circuito equivalente ou simplesmente chamado de ECM (da sigla em inglês Equivalent Circuit Model), foi empregado por Hirata e Ueha (1995) *apud* Kuhn, Rodrigues e Pippi (2007). Embora os autores tenham trabalhado com o efeito reverso, gerar movimento/deslocamento a partir de uma excitação elétrica, os princípios que regem o efeito eletromecânico de um sistema piezelétrico são idênticos.

Neste momento a evolução dos cálculos é apresentada, pois se faz necessária a determinação dos parâmetros elétricos (R , L , C , R_d e C_d) que foram importantes na validação do modelo do gerador piezelétrico. Foi feito, experimentalmente, uma varredura em frequência do dispositivo PZT. Usando a 1ª Lei de Ohm, foi possível determinar, corrente elétrica, impedância e admitância na pastilha. A Figura 34 apresenta como foi realizado este simples processo. O cálculo da admitância da pastilha é importante, pois é por meio dela que foram calculados vários pares de frequência (que serão apresentados a seguir) responsáveis pela determinação dos valores dos componentes eletrônicos.



**Figura 34 – Esquema elétrico para medição da frequência de ressonância e antirressonância do material PZT.
Fonte: Adaptado de Pippi (2003).**

No material piezolétrico, a admitância é dada pela soma da admitância *damping* Y_d ou admitância intrínseca (rigidez do material) com a admitância de movimento Y_m (provoca o movimento vibracional). Nas Equações (5), (6) e (7) tem-se estas relações:

$$Y = Y_d + Y_m \quad (5)$$

Onde:

$$Y_d = \frac{1}{R_d} + j \cdot \omega \cdot C_d \quad (6)$$

$$Y_m = \frac{1}{R + j \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)} \quad (7)$$

A Figura 35 mostra o lugar geométrico das admitâncias (Diagrama de Nyquist) para um transdutor piezolétrico com alto fator de qualidade mecânica Q_m , conforme Ikeda (1990). Este diagrama tem uma relação direta com valores de pares de frequências, que serão utilizados para cálculo dos parâmetros do circuito equivalente. Na sequência serão discutidos este fator de qualidade mecânica e os pares de frequências.

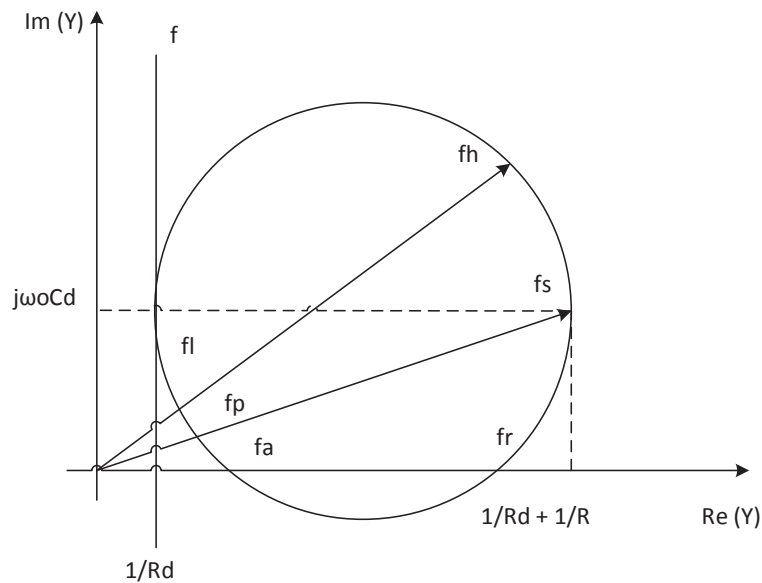


Figura 35 – Diagrama de Nyquist, lugar geométrico das admitâncias de um transdutor piezolétrico.
Fonte: Ikeda (1990).

Os pares de frequência que estão destacados no diagrama são: frequência de máxima admitância (f_h), frequência de mínima admitância (f_l), frequência de movimento (f_s), frequência paralela (f_p), frequência de ressonância (f_r) e frequência de antirressonância (f_a). Esta família de frequências é de fundamental importância no processo de identificação de todos os parâmetros elétricos que compõem o ECM de dois terminais. A definição das características dos parâmetros obtidos no Diagrama de Nyquist da Figura 35 é descrito na sequência de equações.

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{ou} \quad f_s = \frac{f_h + f_r}{2} \quad (8)$$

$$f_p = \frac{\sqrt{1 + \frac{C_d}{C}}}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{ou} \quad f_p = \frac{f_l + f_a}{2} \quad (9)$$

$$f_r = Re_{max}(Y) \quad (10)$$

$$f_a = Re_{min}(Y) \quad (11)$$

$$Q = 2\pi f_s \frac{L}{R} \quad \text{ou} \quad Q = \frac{1}{2\pi f_s RC} \quad (12)$$

Determinados os pares de frequências, se retornará a falar do circuito equivalente, pois é a partir do seu modelo que será possível entender o princípio da geração de energia no material piezelétrico. Então, ao se trabalhar com o ECM, dois sistemas distintos serão tratados: mecânico e elétrico. Para tais configurações surgem algumas quantidades: tensão e corrente elétrica, força, velocidade (aceleração), deformação, tensão mecânica. Para Pippi (2003), a inter-relação desses termos, pode ser entendida quando as equações forem manipuladas em função do fator de força A . Uma boa definição para este fator foi abordada por Hirata e Ueha (1995), onde diz que é a relação da corrente de movimento que flui na peça vibradora, pela máxima velocidade (ou integral da aceleração) de vibração na direção normal, onde a pastilha está em contato com a chapa de metal. A seguir apresenta-se duas equações que estão relacionadas ao fator de força.

$$-F = A \cdot V - Z \cdot v \quad (13)$$

$$I = Y_d \cdot V + A \cdot v \quad (14)$$

Onde F é a força e v a velocidade (para o sistema proposto, integral da aceleração) produzida nos terminais mecânicos, V é a tensão e I a corrente nos terminais elétricos, Z é a impedância mecânica e Y_d a admitância de bloqueio (damping) ou admitância intrínseca formada pelo PZT. O circuito equivalente primitivo fica assim representado na Figura 36(a). Já a Figura 36(b) apresenta o efeito transversal sofrido pelo material piezelétrico.

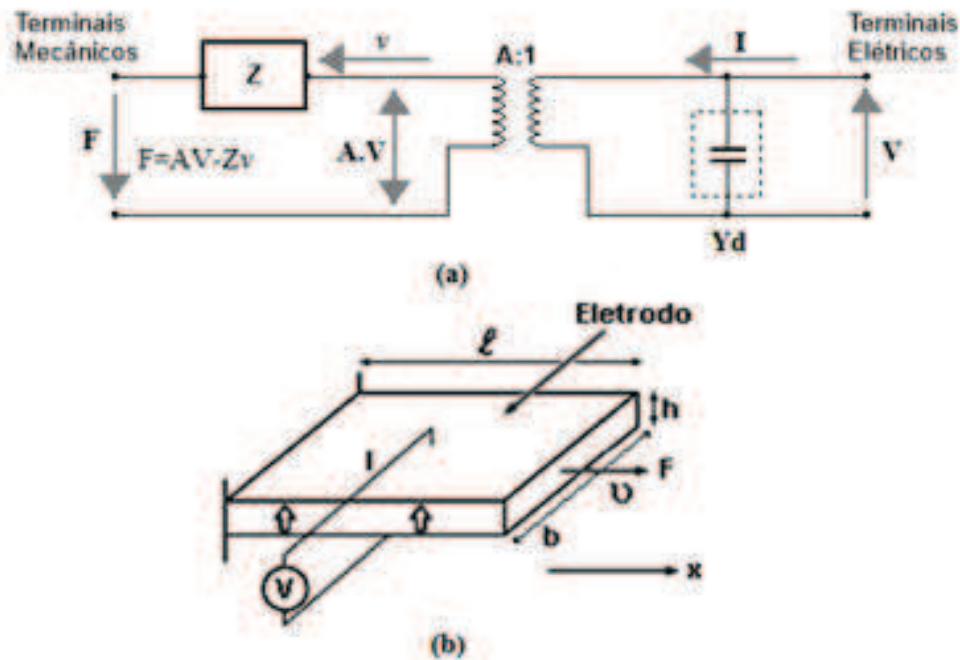


Figura 36 – Transdutor Piezelétrico. Em (a) circuito elétrico equivalente - ECM primitivo e em (b) efeito transversal sofrido pelo PZT.

Fonte: (a) Adaptado de Kuhn (2007) e (b) Adaptado de Pippi (2003).

O termo $A \cdot V$ da Equação (13) representa a força gerada no interior do PZT. Quando subtraído $Z \cdot v$, a expressão representa a força exercida pela cerâmica externamente. Assim, o fator de força A pode ser definido como a tensão elétrica produzida quando uma unidade de força é aplicada. O termo $Y_d \cdot V$ da Equação (14) é a corrente que flui através do capacitor formado pelo material piezelétrico e $A \cdot v$ é a velocidade responsável pela deformação do PZT. Desta forma, o fator de força A também pode ser definido como sendo a corrente gerada quando uma unidade de velocidade (aceleração) é aplicada à cerâmica. O fator de força A

geralmente depende das propriedades, das dimensões da cerâmica e da maneira como ela é usada. Sua unidade é expressa em N/V ou C/m . A progressão de cálculos apresentada por Sashida e Kenjo (1993), faz uso dos parâmetros mostrados na Figura 36 para obter a expressão que representa o fator de força do segmento cerâmico, apresentado na Equação (15):

$$A = b \cdot d_{31} \cdot Y_{11} \quad (15)$$

Onde, b é largura da pastilha, d_{31} é a constante de deformação piezolétrica e o Módulo de Young Y_{11} .

O circuito eletromecânico será transformado em um circuito puramente elétrico. Para representar este circuito em termos reais, é necessário inserir elementos ao circuito da Figura 36(a), tanto nos terminais mecânicos quanto elétricos. Deve-se inserir uma resistência de bloqueio (*damping*) R_d em paralelo com o capacitor C_d , onde esta resistência representa as perdas dielétricas e, no terminal mecânico, uma resistência r que representa as perdas da conversão eletromecânica em série com a indutância l e a capacitância c . Esta nova configuração pode ser visualizada na Figura 37.

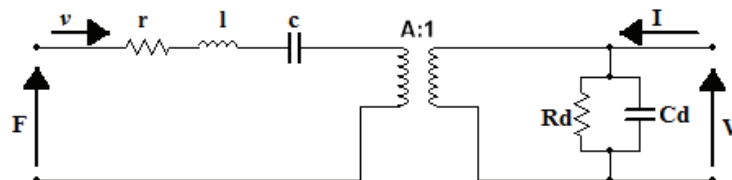


Figura 37 – Circuito elétrico equivalente com inclusão das perdas eletromecânicas r e R_d .

Fonte: Adaptado de Kuhn (2007).

O transformador eletromecânico não é usual para circuitos equivalentes de dois terminais, então é normalmente eliminado pela transformação mecânica dos elementos r , l e c mecânicos. O fator de força A passará a ser chamado de fator de força Π , simplesmente para diferenciação da dimensão área (A) da cerâmica, que normalmente aparece quando se relacionam grandezas como: comprimento, largura ou espessura. Então, para realizar tal transformação, fica estabelecida a relação entre os elementos eletromecânicos e os elementos elétricos. Observa-se o fator de força Π nas Equações (16), (17) e (18):

$$R = \frac{r}{\Pi^2} \quad (16)$$

$$L = \frac{l}{\Pi^2} \quad (17)$$

$$C = \Pi^2 \cdot c \quad (18)$$

O circuito é então transformado em elementos discretos, e é visto logo a seguir na Figura 38, ele representa o modelo de circuito equivalente que mais se aproxima do modelamento da cerâmica PZT. O cálculo da viga engastada está apresentado no Anexo A.

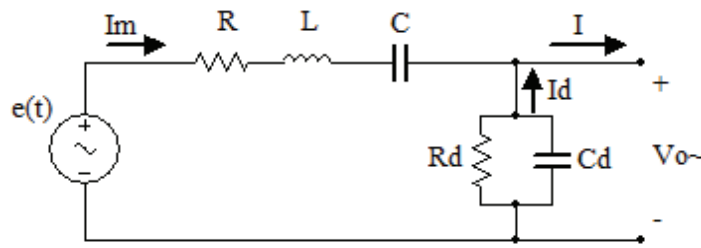


Figura 38 – ECM sem transformador e com fator de força Π inserido aos elementos R , L e C .

Fonte: Autoria Própria.

Foram medidas algumas grandezas que são necessárias ao cálculo dos parâmetros elétricos do ECM. A impedância Z_{f1k} para uma frequência muito baixa foi medida com 1 kHz (está relacionado com os parâmetros elétricos intrínsecos do material PZT), com relação à frequência de ressonância da pastilha de cerâmica. Esta grandeza é representada na forma da admitância Y_{f1k} , vista na Equação (19):

$$Y_{f1k} = \frac{1}{Z_{f1k}} \quad (19)$$

A parte real desta admitância é calculada na Equação (20) e é dada pelo módulo da admitância em 1 kHz, vezes o cosseno do ângulo φ , que é o ângulo de fase da admitância Y_{f1k} .

$$Re(Y_{f_{1k}}) = Y_{f_{1k}} \cdot \cos(\varphi) \quad (20)$$

A determinação da frequência de movimento f_s é dada pela relação $f_r * 0,707$ que equivale a -3 dB da frequência ressonante. Utilizando a f_s , pode-se calcular a impedância de movimento Z_{f_s} e a partir desta encontrar a admitância de movimento, pela expressão $Y_{f_s} = 1/Z_{f_s}$, inverso da impedância.

Do módulo da admitância na frequência de ressonância de movimento Y_{f_s} , projetado nos eixos cartesianos, obteve-se a parte real e imaginária desta admitância, e pode ser vista nas Equações (21) e (22).

$$Re(Y_{f_s}) = Y_{f_s} \cdot \cos(\varphi) \quad (21)$$

$$Im(Y_{f_s}) = Y_{f_s} \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (22)$$

Utilizando-se das equações desenvolvidas anteriormente, chega-se às expressões que resultarão nos elementos elétricos que compõem o ECM. Nas equações (23) e (24) tem-se os elementos da parte elétrica de bloqueio, já nas equações seguintes, (25), (26) e (27), os equivalentes elétricos da parte de movimento (mecânicos).

$$R_d = \frac{1}{Re(Y_{1k})} \quad (23)$$

$$C_d = \frac{Im(Y_{f_s})}{2 \cdot \pi \cdot f_s} \quad (24)$$

$$r = \frac{1}{Re(Y_{f_s}) - \frac{1}{R_d}} \quad (25)$$

$$l = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot C_d \cdot (f_p^2 - f_s^2)} \quad (26)$$

$$c = C_d \cdot \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_s^2} \quad (27)$$

A partir de agora, será usado o fator de força Π para fazer a transformação eletromecânica das perdas como visto nas equações (16), (17) e (18). O circuito elétrico agora está completo, como foi visto na Figura 38, com os elementos da parte de amortecimento e de movimento. Ficam os valores de R_d , C_d , R , L e C assim determinados e apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores dos componentes elétricos do ECM.

$$R_d = \frac{1}{Re(Y_{1k})} \Rightarrow R_d = 4,5 \text{ M}\Omega$$

$$C_d = \frac{Im(Y_{fs})}{2 \cdot \pi \cdot f_s} \Rightarrow C_d = 2,36 \text{ nF}$$

$$R = \frac{r}{\Pi^2} \Rightarrow R = 3,07 \text{ k}\Omega$$

$$L = \frac{l}{\Pi^2} \Rightarrow L = 10,34 \text{ H}$$

$$C = \Pi^2 \cdot c \Rightarrow C = 2,08 \text{ nF}$$

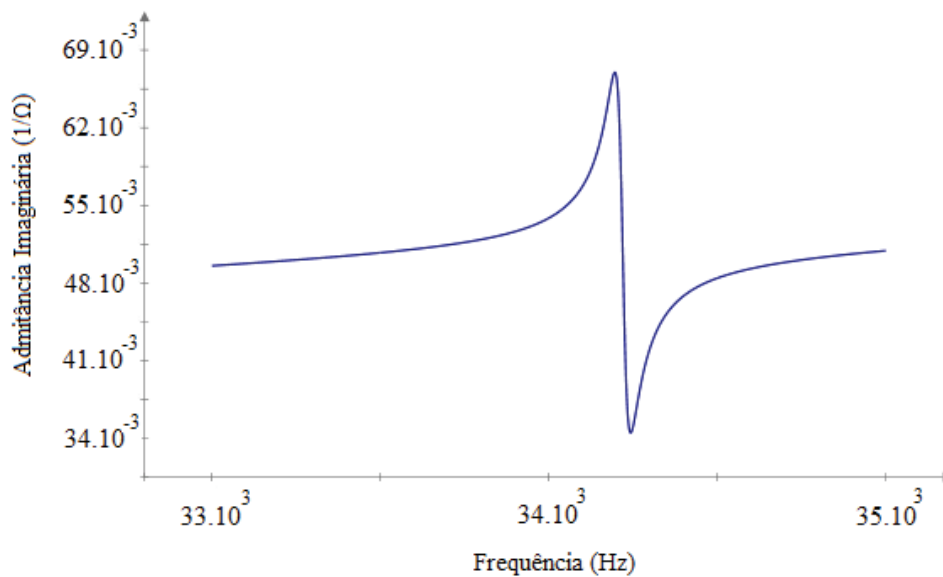
Utilizando os dados obtidos na Tabela 4, pode-se chegar ao cálculo da admitância, que é o elemento elétrico responsável pela vibração/movimentação do sistema. Viu-se, na Equação (5), que a admitância total é igual a admitância de bloqueio, mais a admitância de movimento ($Y = Y_d + Y_m$). Como as duas admitâncias são complexas, os termos já foram rearranjados em suas partes real e imaginária. Sendo assim, todos os parâmetros elétricos do ECM já foram estudados e encontrados, então apresenta-se a fórmula da admitância total de movimento na Equação (28):

$$Y(f) = \frac{1}{R_d} + \frac{R}{\left(\omega(f).L - \frac{1}{\omega(f).C}\right)^2} \cdot j \left[\omega(f).C_d + \frac{\frac{1}{\omega(f).C} - \omega(f).L}{R^2 + \left(\omega(f).L - \frac{1}{\omega(f).C}\right)^2} \right] \quad (28)$$

Desmembrando-se $\omega = 2. \pi. f$ a fórmula permanecerá em função da frequência e será reescrita pela Equação (29).

$$Y(f) = \frac{1}{R_d} + \frac{R}{\left(2. \pi. f. L - \frac{1}{2. \pi. f. C}\right)^2} \cdot j \left[2. \pi. f. C_d + \frac{\frac{1}{2. \pi. f. C} - 2. \pi. f. L}{R^2 + \left(2. \pi. f. L - \frac{1}{2. \pi. f. C}\right)^2} \right] \quad (29)$$

A Figura 39 apresenta a resposta em frequência desta admitância.



**Figura 39 – Curva simulada da resposta em frequência da admitância.
Fonte: Autoria Própria.**

3.3.3 Circuito de Condicionamento do Sinal

Para o condicionamento e armazenamento da energia, foi necessário estudar modelos de circuitos elétricos existentes, e adequar às condições ideais para o projeto em questão. É uma etapa importante, pois dependendo do circuito pretendido para o projeto, os

rendimentos vibracionais e suas devidas conversões eletromecânicas serão afetadas por circuitos com pouco rendimento para condicionar e armazenar a energia gerada. É sabido que uma cerâmica PZT gera em seus terminais uma tensão AC de acordo com o regime de aplicação de força, enquanto que uma bateria (capacitor) necessita de tensão DC para seu carregamento. A inserção de um circuito eletrônico se faz necessária a esta transformação. A retificação será realizada utilizando o retificador de onda completa, pois se sabe que os retificadores de onda completa são os componentes que fornecem a maior tensão média em sua saída. Embora se perceba que carregar uma bateria diretamente de um retificador não é a melhor maneira, pois como a tensão no gerador piezelétrico varia de acordo com as vibrações recebidas por ele, cria-se a necessidade de flexibilizar a tensão de saída retificada para transferir a máxima potência para a possibilidade de carregamento da bateria. Definiu-se primeiramente que o circuito será ponte completa com capacitor de filtro (diminuição do *ripple*) em paralelo com a bateria. Conhecido o processo de geração, e também a forma de onda gerada, foram estudados outros modelos de circuitos condicionadores para possibilitar mais rendimento ao sistema.

No sistema gerador piezelétrico, o circuito de condicionamento do sinal é um elemento importante no processo, pois é por meio dele que os resultados serão apresentados. Cientificamente, existem muitos modelos de circuitos que são capazes de tratar a energia gerada pelo sistema. Em Sodano *et al.* (2003), os autores utilizam um circuito eletrônico muito simples, composto de uma ponte retificadora, um capacitor de filtro e uma bateria ligada à saída do circuito. Conforme Sodano, algumas particularidades são percebidas, o circuito não é apropriado para determinar o momento exato de carga completa, mas sobretudo, apresenta a capacidade do sistema gerar 1,2 V ou próximo disso. O detalhamento deste estudo já foi considerado no subcapítulo 2.4.2.

Comparando os circuitos apresentados por Guyomar e Lallart (2011) e Perelli, *et al.* (2013) definiu-se a topologia para o circuito de condicionamento do sinal AC - DC, é o circuito SSHI Híbrido, apresentado na Figura 15. Embora, inicialmente realizaram-se alguns ensaios utilizando o circuito baseado no circuito de Umeda, Nakamura e Ueha (1996) *apud* Sodano, Inman e Park (2004), optou-se por usar o modelo Híbrido por apresentar um bom potencial de tensão média de geração. A determinação da escolha desta topologia inicial por utilizar um número reduzido de componentes eletrônicos, que pudessem consumir minimamente a energia gerada, para que esta pudesse ser, de alguma forma, aproveitada.

No princípio da geração é apresentado pelo circuito da Figura 40, durante a excitação mecânica, a cerâmica piezelétrica gera picos de tensão, sem carga elétrica. Para a caracterização do modelo Híbrido, foi inserido o transformador *EE16*, que é de núcleo de ferro com blindagem eletrostática e tem uma transformação de sinal na ordem de $N = 10$. O sinal gerado é então retificado pela ponte de onda completa, de diodos de germânio (queda de tensão para operação muito baixa), e filtrados pelo capacitor C . O resistor R simula a presença de uma carga resistiva na saída do circuito de condicionamento.

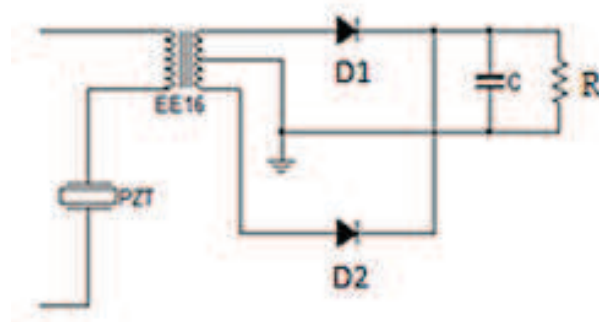


Figura 40 – Circuito eletrônico de condicionamento do sinal com carga resistiva.

Fonte: Adaptado de Umeda, Nakamura e Ueha (1996) *apud* Sodano, Inman e Park (2004).

A Figura 41 mostra o circuito completo utilizado por Kuhn *et al.* (2014) para o condicionamento do sinal DC de saída. O circuito de retificação em ponte completa empregado é de diodos de germânio, devido a sua baixa queda de tensão 0,3 V, foi necessário a inclusão de dois MOSFET's para realizar o chaveamento do sinal de saída, pois o transformador *EE16* opera em alta frequência (40 kHz). Este transformador foi incluído no circuito para garantir a topologia de circuito SSHI Híbrido e também para garantir que a quantidade de energia gerada fosse suficiente para colocar em operação os diodos da ponte retificadora. Foi empregado o microcontrolador *MSP430G2231* para controle de chaveamento dos MOSFET's. A escolha do modelo do MSP foi exatamente porque tem características de consumo de baixíssima potência. A faixa de operação de tensão do microcontrolador MSP já especificado é baixa, de 1,8 V à 3,6 V, embora que para aos ensaios foi utilizada uma bateria de lítio do tipo *CR2032* (3 V) para alimentação do microcontrolador. O consumo de potência deste MSP é 220 μW em modo ativo, em modo *standby* 0,5 μW e em modo *off* (retenção de memória RAM) 0,1 μW . Na saída do circuito de condicionamento, usou-se um capacitor C_{FILTRO} para filtragem do sinal retificado.

Estão conectados ainda, em paralelo com o filtro, um resistor R_{Carga} e um capacitor C_{Carga} , para simular o tempo de carga necessário ao carregamento de uma bateria.

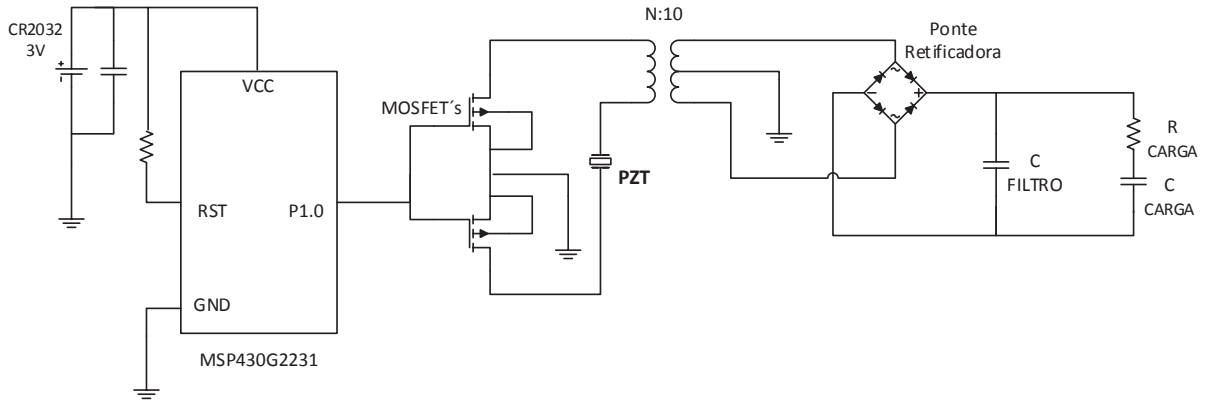


Figura 41 – Circuito de condicionamento do sinal gerado.
Fonte: Autoria Própria.

Este circuito foi utilizado para realização de todas as medições executadas e seus resultados são apresentados no próximo capítulo. Entretanto, ressalta-se que para os ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos: multímetro digital (ICEL) com datalogger, para realização das medições de corrente de saída, valores estes, na ordem de μA . Também foi utilizado osciloscópio digital (Tektronix) de 100 MHz e 2 Gs/s para cada um dos 2 canais, foram utilizadas pontas de prova x10 CAT II (300 Vrms). O equipamento também contava com interface USB, sendo útil para capturas das imagens e gravação dos dados medidos. Para as medições de aceleração, foi utilizado acelerômetro acoplado a base de fixação do sistema piezolétrico (mini-morsa) e ligado ao software DBF Suite para realização da leitura dos dados. Destaca-se também que todo o sistema eletromecânico foi ensaiado em uma bancada rígida isolada que não sofria interferência de vibrações externas.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos da caracterização do sistema piezelétrico de geração de energia. Serão apresentados os dados ensaiados e simulados, das curvas de resposta em frequência da aceleração do sistema piezelétrico, de tensão elétrica gerada, corrente e potência elétrica na saída V_{out} do circuito de condicionamento e também curva de tempo de carga de capacitores.

Em um primeiro momento é importante destacar que a escolha da pastilha do modelo PZT-4 foi devido às suas características de Fator de Qualidade Mecânica (Q_m), uma medida adimensional e é responsável pelas perdas mecânicas da pastilha, a Constante de Carga PZT (d), que informa qual é a proporção entre a geração de cargas elétricas (em Coulombs) e a força aplicada no material (em Newtons) e a Constante de Tensão PZT (g), que por definição é a proporção entre a diferença de potencial gerada (em Volts) e a força aplicada (em Newton) para uma cerâmica com comprimento de 1 metro. Todas estas características são adequadas a geração de energia elétrica e para este modelo PZT-4 tem um alto percentual, chegando a 100%, com relação aos outros modelos comerciais.

4.1 CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DO SISTEMA

Aplicando a Equação (39) do Anexo A, e utilizando o software Matlab (MathWorks – versão licenciada), foi possível determinar o comprimento ℓ da viga e a massa m na extremidade livre. Com estas grandezas definidas, foi notada a possibilidade de escolha da frequência de ressonância do sistema. A Tabela 5 apresenta os valores da variação de comprimento pela variação da massa.

Tabela 5 – Cálculo das frequências ressonantes do sistema gerador de energia.

Variação massa extremidade	Comprimento da chapa de latão com intervalo de 40 mm a 90 mm													
	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90			
10	35,87	30,06	25,66	22,24	19,52 Hz	17,31	15,49	13,97	12,68	11,58	10,63			
20	25,36	21,25	18,15	15,73	13,80	12,24	10,95	9,88	8,97	8,19	7,51			
30	20,71	17,35	14,82	12,84	11,27	10,00	8,94	8,07	7,32	6,68	6,14			
40	17,93	15,03	12,83	11,12	9,76	8,66	7,75	6,98	6,34	5,79	5,31			
50	16,04	13,44	11,48	9,95	8,73	7,74	6,93	6,25	5,67	5,18	4,75			
60	14,64	12,27	10,48	9,08	7,97	7,07	6,32	5,70	5,18	4,73	4,34			
70	13,56	11,36	9,70	8,41	7,38	6,54	5,86	5,28	4,79	4,38	4,02			
80	12,68	10,63	9,07	7,86	6,90	6,12	5,48	4,94	4,48	4,09	3,76			
90	11,96	10,02	8,55	7,41	6,51	5,77	5,16	4,66	4,23	3,86	3,54			
100	11,34	9,50	8,12	7,03	6,17	5,48	4,90	4,42	4,01	3,66	3,36			

Fonte: Autoria Própria.

Em virtude do sistema mecânico vibratório utilizado (came-seguidor – *shaker*), operar em uma faixa de frequências de excitação de 0 a 35 Hz, a escolha de uma frequência mediana e intermediária a este intervalo foi definida, 19,52 Hz. Portanto, dimensionou-se a chapa de latão com comprimento de 0,06 m e com adição de massa na extremidade livre de 0,01 Kg. As limitações do came foram determinantes na escolha desta frequência, pois frequências acima de 35 Hz poderiam causar problemas mecânicos e com possibilidade destrutiva ao *shaker*. Portanto, definiu-se o ponto médio da operação do came como sendo o ideal para este sistema.

4.2 DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS FREQUÊNCIAS DO SISTEMA

O sistema responsável pela geração das vibrações mecânicas necessárias à conversão de energia é composto por três equipamentos: Inversor de frequência, motor de indução trifásico, e o came-seguidor. Este último é um dispositivo que simula a mesma função de um *shaker*, onde por meio do controle (inversor de frequência) da rotação do motor, é possível controlar a frequência de oscilação do came-seguidor, e assim, excitar o sistema gerador com a frequência desejada. Para os ensaios realizados, foram feitas várias medições em um intervalo de 0 a 35 Hz.

Como foi observado no item 3.3.1, que trata da viga engastada, a determinação das frequências do sistema levou em consideração o comprimento da viga engastada e a massa na extremidade da mesma viga, conforme apresentados na Tabela 5. A frequência simulada (Matlab) e escolhida para os ensaios foi 19,52 Hz. Esta determinação foi tal que o sistema gerador de oscilação mecânica (came-seguidor) pudesse operar em uma faixa central de sua faixa de operação 0 a 35 Hz, para minimizar os efeitos mecanicamente destrutivos que a operação em frequências maiores poderia ocasionar ao came-seguidor (*shaker*). A Figura 42 apresenta a resposta em frequência do sistema para duas excitações 2,5 Hz e 19,5 Hz, e suas respectivas amplitudes de acelerações, em g (m/s^2).

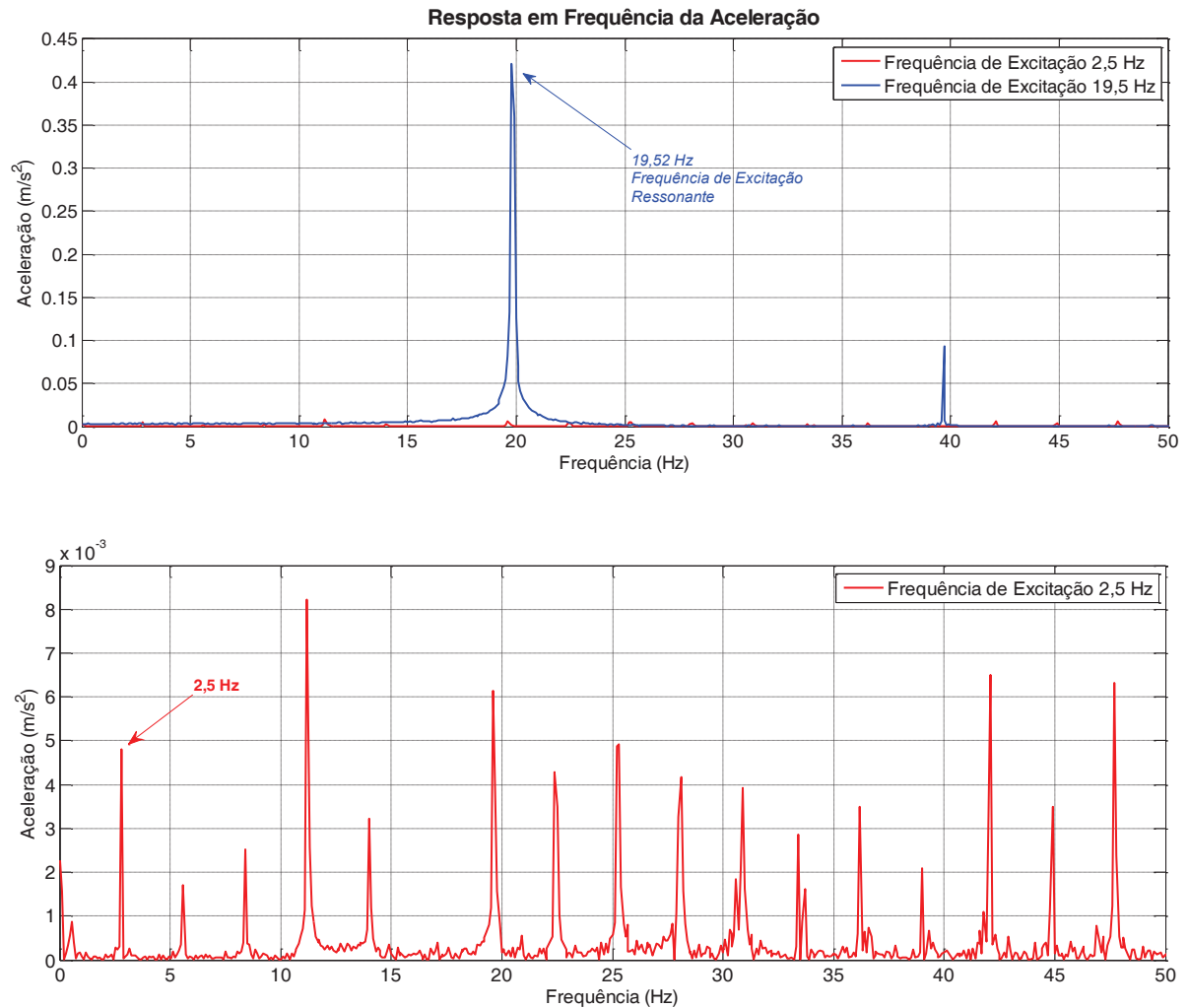


Figura 42 – Resposta em Frequências da Aceleração do Sistema Piezelétrico. Em (a) as duas frequências excitadoras (2,5 Hz e 19,5 Hz) e em (b) apenas a frequência de excitação 2,5 Hz. Fonte: Autoria Própria.

Nesta Figura 42 para uma excitação de 19,5 Hz, observa-se que a aceleração atingiu $0,42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, ponto de ressonância do sistema. Comparativamente pode-se observar nestes dados A relação da amplitude do sinal entre a frequência de excitação 19,5 Hz e 2,5 Hz é 87,5.

4.3 ACELERAÇÕES DO SISTEMA

Pode-se comparar a Figura 43(a) e (b) o comportamento da aceleração pelo tempo, produzida pelo sistema piezoeletrico na frequência ressonante tem amplitudes de movimento (aceleração) de 15 vezes maior do que fora dela ou especificamente com excitação

forçada de 2,5 Hz. Sabe-se da equação do movimento, apresentada pela Equação (41), Anexo B, e que pode ser reescrita pela Equação (2) (modelo elétrico), que quanto maior a força aplicada ou aceleração sofrida, maior será a carga gerada. Portanto, entende-se que da análise da Figura 43(a) e (b), que em modo ressonante, o sistema piezelétrico gerará maior quantidade de energia.

Por outro lado, levando-se em consideração puramente o conceito de extrair do meio a energia mecânica e transformá-la em energia elétrica, apresenta-se o comportamento das acelerações a qual o sistema foi submetido na Figura 43(a) e (b), com frequências de excitação de 2,5 Hz e 19,5 Hz, respectivamente. Evidencia-se novamente, que a amplitude da aceleração em frequência de excitação ressonante, representa que maiores forças mecânicas (aproximadamente 10x) estão atuando sobre o sistema piezelétrico.

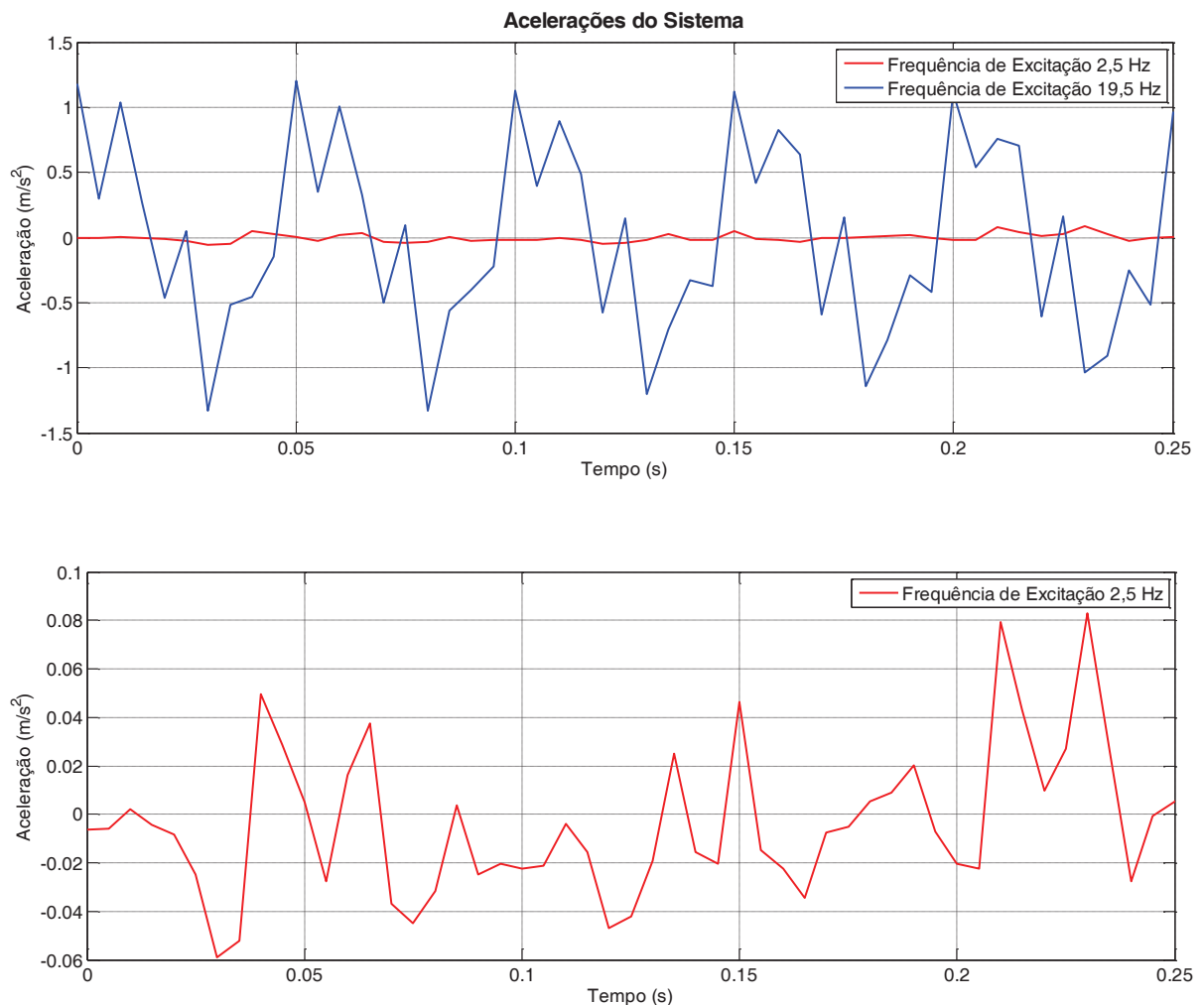


Figura 43 – Comportamento das acelerações do sistema com excitação 19,5 Hz e 2,5 Hz.
Fonte: Autoria Própria.

Entretanto, outro aspecto pode ser inferido neste momento, trabalhando com grandes forças (acelerações), o sistema mecânico sofre com danos estruturais (fissuras na cerâmica, ruptura dos contatos entre eletrodo e solda, desgaste ou desprendimento da cola epóxi, fissuras ou rompimento da chapa de metal, desgaste da fixação da massa na extremidade livre). Estes aspectos levam a ponderação entre quantidade de energia gerada e tempo de operação do sistema sem apresentar falhas mecânicas. Portanto, neste momento serão desconsiderados os dados da quantidade de energia gerada, e será avaliada apenas a qualidade da onda na saída do circuito (periodicidade, amplitude, semelhança com ondas elétricas “convencionais”). Na sequência, serão apresentados os resultados de tensão elétrica sem carga resistiva.

4.4 TENSÃO ELÉTRICA GERADA SEM CARGA RESISTIVA

Excitando o sistema com a frequência de $2,5 \text{ Hz}$ obtém-se uma tensão elétrica muito semelhante a uma onda senoidal, observada na Figura 44. A obtenção desta onda se deu, pelo fato da frequência de excitação se comportar como uma força aplicada na forma de impacto (característica da solução homogênea). Este modelo foi comentado no Anexo B e pode ser melhor visualizado na Figura 54. Este processo também pode ser visualizado pelo formato da curva gerada pelo sistema. É uma senoide clássica, adequada à utilização de circuitos eletrônicos. O processo de armazenamento da energia gerada se dá pela utilização de circuitos eletrônicos (que foi tratado no capítulo anterior), e é sabido que estes circuitos (retificador de onda completa, filtros, reguladores de tensão, armazenadores de energia, etc.) tem um comportamento linearizado ou adequado e pode-se considerar vários componentes de forma ideal.

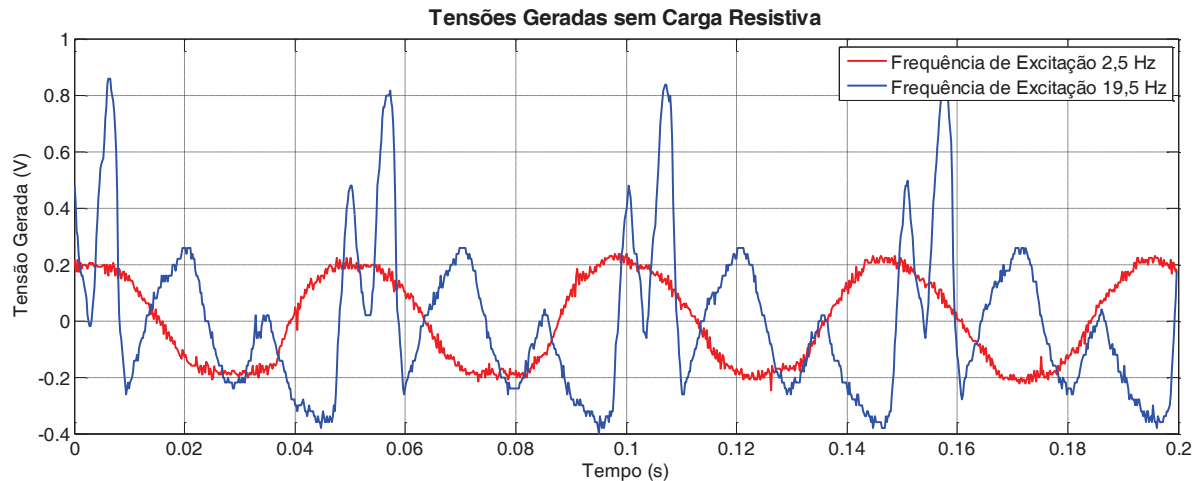


Figura 44 – Formas de onda da tensão elétrica gerada pela excitação mecânica do *shaker* em 2,5 Hz e 19,5 Hz. Comportamento senoidal da curva 2,5 Hz.

Fonte: Autoria Própria.

O sinal apresentado foi medido na saída do material piezelétrico. Realizando uma comparação das ondas apresentadas até agora, a resposta da aceleração para excitações de 2,5 Hz e 19,5 Hz havia uma diferença com variação de 15 vezes, mas como viu-se na Figura 44 esta diferença é reduzida, ficando em média 4 vezes maior em excitação ressonante para a tensão gerada na saída da pastilha PZT.

4.5 TEMPO DE CARGA DE CAPACITORES

Sabe-se que no tempo de $5 \cdot R \cdot C$ acontece a carga completa de um capacitor, mas há uma dificuldade de medição e de identificação desta *full charge*, a metodologia de identificação do tempo de carga completa dos capacitores ou baterias, segue o modelo proposto por Sodano *et al.* (2003), onde o tempo da carga completa é medido e verificado a 90% de sua carga total. Para os ensaios do tempo de carga foram utilizados capacitores eletrolíticos de 1000 nF e 47 μ F/16 V. Eles simulam o carregamento de uma bateria e seu respectivo tempo de carga. A Tabela 6 apresenta estes resultados.

Tabela 6 – Resultados obtidos para o tempo de carga de capacitores.

Capacitor	Tempo de Carga na Freq. de Excitação (19,5 Hz)	Tempo de Carga na Freq. de Excitação (2,5 Hz)
47 μ F	128 s	184 s
1000 nF	120 s	124 s

Fonte: Autoria Própria.

Analisando os dados da Tabela 6 verifica-se que não há uma correlação exata do valor da capacitância com o tempo necessário a carga completa (5.R.C) ou 90 % dela. Mas pode-se perceber que em ambas situações de excitação do sistema, o capacitor de 1000 nF carregou mais rápido que um de 47 μ F, situação esperada. Verificando o comportamento das curvas na Figura 45, nota-se que a curva de carregamento é semelhante para qualquer condição de excitação (descreve a resposta transitória de um capacitor) e que para a frequência de excitação de 19,5 Hz, a tensão elétrica tem uma maior amplitude. A relação da tensão e do tempo de carga do capacitor de 47 μ F entre a frequência de excitação 19,5 Hz e 2,5 Hz é respectivamente 1,67 e 0,69. O que se pode afirmar sobre o tempo de carregamento é que em frequência de excitação ressonante, o sistema mecânico sofre movimentos mais amplificados o que provoca movimentos oscilantes mais amplos, o que caracteriza que o material piezelétrico tenha tido mais deformação. Esse fato pode provar a diferença entre os tempos 128 s e 184 s, para capacitor de 47 μ F. Para o capacitor de 1000 nF os tempos obtidos são 120 s e 124 s. Para efeito de análise, podem ser considerados similares. Isto evidencia o fato que para gerar energia não é necessário estimular a cerâmica PZT em seu modo ressonante.

Após os tempos apresentados pela Tabela 6, pode-se afirmar que os capacitores estão com a sua carga completa. Para os capacitores estudados 47 μ F e 1000 nF, a carga Q é apresentada na Tabela 7. Sabe-se que a carga é dada pela capacitância vezes a tensão elétrica a que está submetido o capacitor.

Tabela 7 – Cálculo da carga Q dos capacitores.

Capacitor	Carga Q Freq. de Excitação (19,5 Hz)	Carga Q Freq. de Excitação (2,5 Hz)
47 μ F	6,58 μ C	3,76 μ C
1000 nF	0,14 μ C	0,08 μ C

Fonte: Autoria Própria.

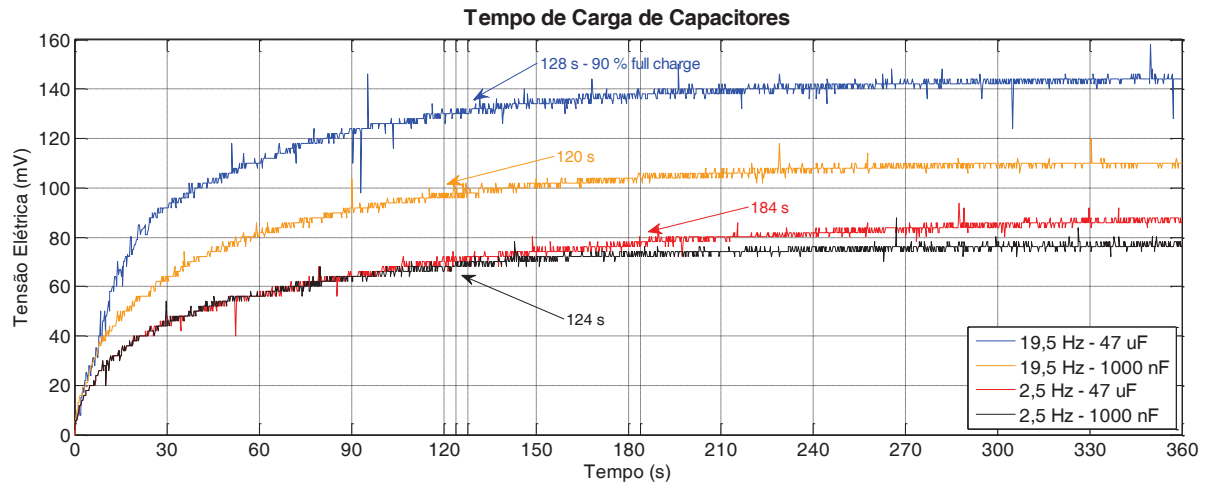


Figura 45 – Tempo de carga dos capacitores. Destaque para os pontos de 90% de full charge. Fonte: Autoria Própria.

Outra informação é tensão elétrica máxima de carga do capacitor. Na Figura 44 tem-se o sinal de tensão elétrica gerada no sistema e medida na saída da cerâmica PZT, para ambas excitações. Utilizando o sinal de 19,5 Hz, este foi retificado e apresentou uma tensão média de 200 mV (utilizou-se em série com o capacitor de carga, um resistor para uma aproximação ao funcionamento de uma bateria). Com as perdas no circuito de condicionamento, a máxima tensão de carga atingida pelo capacitor foi aproximadamente 140 mV. A Figura 46 e a Figura 47 apresentam os sinais, da tensão pelo tempo de carga do capacitor e também a corrente medida neste tempo. No caso da corrente elétrica, no tempo inicial da carga, ela é máxima e tende a zero ou próximo disto em virtude da condição de carga máxima do capacitor.

Esta figura apresenta a mesma condição de carga do capacitor de forma simulada (PTC Mathcad Express – versão livre) comparando com o resultado experimental. Na Figura 46 tem-se a tensão elétrica e na Figura 47 a corrente de carga que tende a zero a medida que o capacitor atinge sua carga máxima. As Equações (32) e (33) determinam o comportamento das curvas simuladas de tensão e corrente de carga de um capacitor.

$$V_c(f) = V \cdot e^{-\frac{t(f)}{R \cdot C}} \quad (30)$$

$$I_c(f) = V \cdot \frac{\left(1 - e^{-\frac{t(f)}{R \cdot C}}\right)}{R_L} \quad (31)$$

Admitindo-se uma tolerância na faixa de $\pm 40\%$ para os valores dos capacitores utilizados, simulou-se então com $65,8\ \mu F$ e $28,2\ \mu F$. As curvas simuladas e ensaiadas, de carga de tensão e corrente são apresentadas na

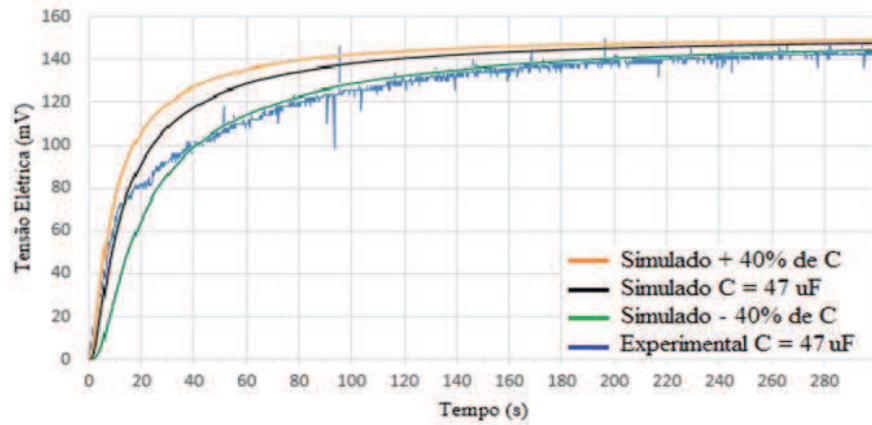


Figura 46 – Tensão de carga de capacitor (simulado e experimental).
Fonte: Autoria Própria.

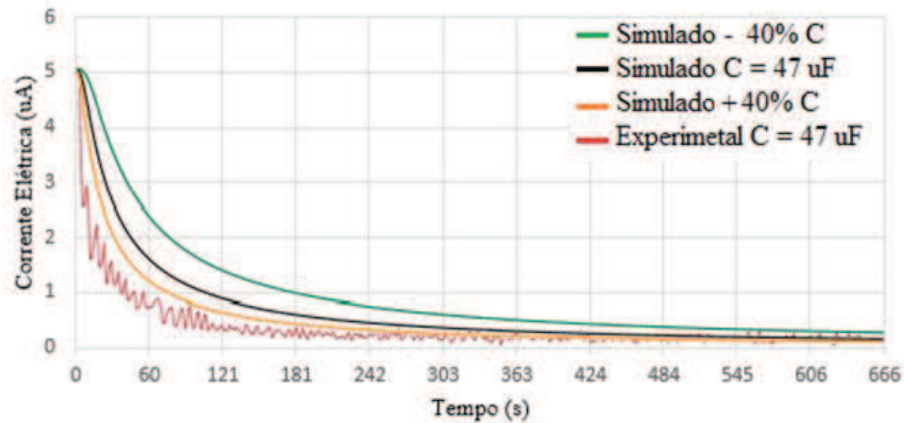


Figura 47 – Corrente de carga (simulado e experimental).
Fonte: Autoria Própria.

4.6 POTÊNCIA GERADA PELO SISTEMA

Para a medição da potência gerada pelo sistema, foi inserido à saída do circuito de condicionamento uma carga resistiva. A faixa de valores dos resistores utilizados foi de $10\ k\Omega$ a $5\ M\Omega$. Submeteu-se o sistema às duas frequências de excitação. Analisando a Figura

48, percebe-se que para valores mais baixos de carga, $10\text{ k}\Omega$ e $100\text{ k}\Omega$, a potência gerada atingiu valores em uma faixa que varia de 50 a 100 mW . A medida que se aumentou a carga resistiva na saída do circuito, houve um acréscimo de potência gerada chegando a valores na ordem de 200 a 300 mW . Nota-se ainda que mesmo em frequências de excitação distintas, a potência gerada teve um comportamento muito parecido. Para cargas de $3\text{ M}\Omega$ a $5\text{ M}\Omega$ o sinal da potência ficou linear, atingindo seus valores máximos de 300 mW , para ambas frequências de excitação.

Pelo Teorema da Máxima Transferência de Potência, quando a impedância da carga é igual a impedância do circuito, tem-se o ponto de máxima potência sendo transferida à saída do circuito. Medindo as impedâncias internas do material piezelétrico obteve-se uma faixa de valores que vão de $3,12\text{ M}\Omega$ até $4,5\text{ M}\Omega$ (impedâncias intrínsecas do material PZT). Deste teorema, percebe-se nas curvas da Figura 48 a relação exata da máxima potência gerada pelo sistema.

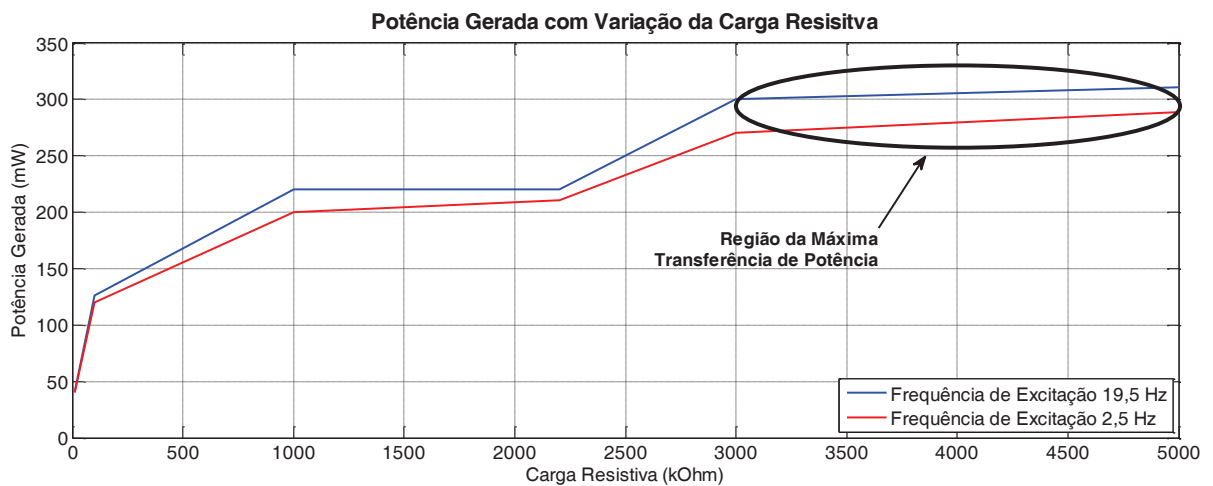


Figura 48 – Potência gerada com variação da carga resistiva R na saída do V_{out} do circuito. De $3\text{ M}\Omega$ a $5\text{ M}\Omega$ ocorre a máxima transferência de potência do sistema.

Fonte: Autoria Própria.

A corrente do circuito é mostrada na Figura 49 e apresenta uma resposta linear de valor aproximado de 10 mA , na mesma faixa de impedância de aproximadamente $2\text{ M}\Omega$ a $5\text{ M}\Omega$ onde o circuito tem a máxima transferência de potência.

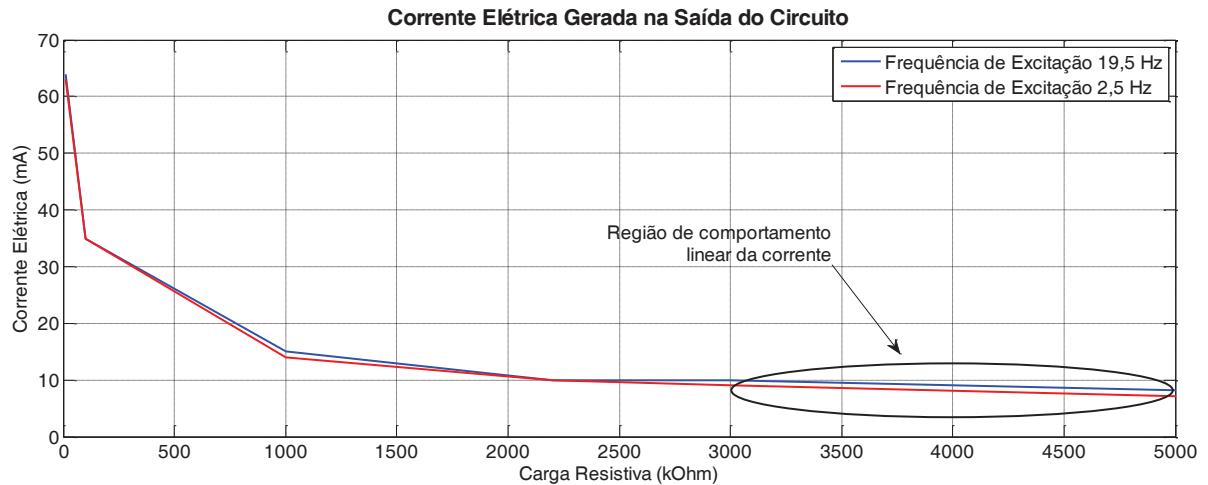


Figura 49 – Corrente elétrica na saída do circuito com variação da carga resistiva (impedância).
Fonte: Autoria Própria.

Para comparação dos resultados apresentados neste capítulo, será usada a mesma metodologia de apresentação realizada por outros autores já discutidos no capítulo 2. A Tabela 8 mostra estes resultados:

Tabela 8 – Resultados do sistema piezelétrico.

Referência	Material		d_{ij} (m/V)	V_{PZT} (mm ³)	f_{exc} (Hz)	R_L (Ω)	V_{OUT} média (V)	$P_{densidade}$ média (W/cm ³)
	Nome	Constante Carga PZT						
Kuhn, G. G.	PZT	d_{31}	$-11,5 * 10^{-12}$	50	19,5	$3,3 * 10^6$	$209 * 10^{-3}$	$26,47 * 10^{-6}$
	PZT	d_{31}	$-11,5 * 10^{-12}$	50	2,5	$3,3 * 10^6$	$141 * 10^{-3}$	$12,05 * 10^{-6}$

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados apresentados na Tabela 8 são coerentes com os resultados vistos em outros estudos científicos e já apresentados no Capítulo 2. Percebe-se uma menor geração de energia elétrica para a frequência de excitação de 2,5 Hz. O resultado era esperado, embora que o valor apresentado, $12,05 * 10^{-6} W/cm^3$, seja apenas 2,2 vezes menor que em excitação ressonante de 19,5 Hz, que teve o valor de $26,47 * 10^{-6} W/cm^3$. Desde o começo da apresentação dos resultados, tem-se várias curvas, todas realizando um comparativo entre excitação de 19,5 Hz e 2,5 Hz. Pode-se ver que a aceleração do sistema era 100 vezes maior para ressonância. A tensão sem carga era aproximadamente 4 vezes maior. A potência gerada em torno de 2,2 maior para 19,5 Hz. Este fato pode ser diferencial para novos estudos onde a

geração possa ocorrer em diferentes faixas de excitação mecânica, muito diferentes à ressonância do sistema e com efeitos menos destrutivos aos sistemas mecânicos envolvidos no projeto, a citar: problemas no engaste, fixação da pastilha à chapa metálica, fixação da massa na extremidade livre, solda dos fios aos eletrodos. Com isso, acredita-se que a vida útil dos sistemas geradores piezelétricos seja prolongada, e conseqüentemente baixando os custos de produção *versus* tempo de geração.

A Tabela 9 apresenta o comparativo da involução de todas as relações tratadas anteriormente. Todas as relações levam em consideração os valores alcançados de cada parâmetro em suas respectivas frequências de excitação de 2,5 Hz e 19,5 Hz.

Tabela 9 – Tabela comparativa da involução das relações dos parâmetros em função da frequência de excitação.

Parâmetro	Relação
Resposta em Frequência da Aceleração	87,50
Aceleração do Sistema	15,00
Tensão Elétrica Gerada sem Carga Resistiva na Saída do PZT	4,00
Tensão Elétrica de Carga no Capacitor de 47 μF	1,67
Tempo de Carga no Capacitor de 47 μF	0,69
Potência Elétrica Gerada	1,07

Fonte: A autoria Própria.

5 CONCLUSÃO

Os resultados encontrados apresentam o comportamento de um sistema gerador piezelétrico. A capacidade de geração elétrica de baixa potência em frequências de excitação naturais e ressonantes foi apresentada.

É importante destacar que na frequência de excitação (2,5 Hz) o sistema mecânico se torna menos suscetível a falhas e não destrutivo, devido a baixa frequência de operação. Comprovadamente o sistema tende a aumentar sua vida útil. O propósito do estudo não foi investigar a quantidade de tempo de sua vida útil, mas é um ponto importante para torná-lo aplicável comercialmente.

Foram submetidas diferentes acelerações ao sistema. Uma delas, em frequência de excitação mais baixa do que a ressonância do sistema e iguais a 2,5 Hz, a outra ressonante de 19,5 Hz. A densidade de potência (W/cm^3) gerada para a primeira frequência foi de $12,05 \mu W/cm^3$, como visto mais detalhado no capítulo anterior. Para a frequência de excitação ressonante de 19,5 Hz, a densidade da potência gerada foi de aproximadamente $26,54 \mu W/cm^3$. Para os valores alcançados, o sistema foi submetido a uma carga resistiva de $3,3 M\Omega$, valor em que ocorre a máxima transferência de potência. O sistema também apresentou tensões médias na faixa de $141 mV - 209 mV$, respectivamente para excitação de 2,5 Hz e 19,5 Hz, que comparados com resultados de outros autores, seria possível o carregamento baterias de 40 mAh a 1000 mAh.

Também foi possível identificar o tempo gasto para executar o carregamento completo em uma bateria (analogamente usou-se capacitores). O sistema foi capaz de carregar capacitores de valores $1000 nF$ e $47 \mu F$ com uma média de tempo total em aproximadamente 139 s, para ambas excitações externas. O sistema se mostra eficiente e suficiente ao carregamento de baterias de dispositivos eletrônicos portáteis. De qualquer modo, fica a indagação a estudos futuros para trabalhar com conjuntos de cerâmicas piezelétricas, com estruturas em paralelo ou até mesmo em pilhas de cerâmicas PZT, para que se tenha a possibilidade de uma maior capacidade de geração ou melhor rendimento.

A contribuição deste trabalho foi apresentar a viabilidade e possibilidade de geração de energia elétrica em frequências diferentes da ressonância do sistema, e que podem ser alteradas e controladas por meio da variação de alguns parâmetros do sistema massa-mola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEEBY, S. P.; TUDOR, M. J.; WHITE, N. M. **Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications**. Measurement Science and Technology. UK: IOPscience - Institute of Physics Publishing. 2006. p. 175-195.

BORTONI, E. C.; SANTOS, A. H. M. Conservação de Energia. In: _____ **Eficiência Energética de Equipamentos de Instalação**. Universidade Federal de Itajubá - Itajubá: Eletrobrás/PROCEL EDUCAÇÃO, 2006. Cap. Capítulo 11, p. 397-436.

CALIÒ, R. et al. Piezoelectric Energy Harvesting Solutions. **Sensors**, n. 14, p. 4755-4790, MARÇO 2014. ISSN 1424-8220.

CARDOSO, Adilson J. **Sistema de Aproveitamento de Energia Vibracional Baseado em Transdutores Acústicos Piezelétricos de Baixo Custo**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 124. 2006.

ERTURK, A.; INMAN, D. J. Issues in mathematical modeling of piezoelectric energy harvesters. **Smart Materials and Structure**, p. 14, 2008.

GOLDFARB, M.; JONES, L. D. **On the Efficiency of Electric Power Generation with Piezoelectric Ceramic**. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. [S.l.]: ASME. 1999. p. 566–571.

GUYOMAR, Daniel; LALLART, Michael. Recent Progress in Piezoelectric Conversion and Energy Harvesting Using Nonlinear Electronic Interfaces and Issues in Small Scale Implementation. **Micromachines**, Basel, Switzerland, n. 2, p. 274-294, 2011. ISSN 2072-666X.

HIRATA, H.; UEHA, S. **Design of a traveling wave type ultrasonic motor**. Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control. [S.l.]: IEEE. 1995. p. Vol 42, No 2.

IKEDA, T. **Fundamentals of Piezoelectricity**. New York: Oxford University Press, 1990.

KUHN, G. G. et al. **Piezoelectric Power Generation. A comparison of power generation between the resonant frequency and natural frequencies**. Renewable Energy & Power Quality Journal. Córdoba, Espanha: RE&PQJ. 2014. p. 385, v. 12.

KUHN, G. G.; RODRIGUES, C. R.; PIPPI, R. S. **Analysis of the rotation speed behavior of an USM in relation to the thickness changing of the PZT ceramic**. International Ultrasonic Symposium. New York: IEEE. 2007. p. 2551-2553.

MINAZARA, E.; VASIC, D.; COSTA, F. **Piezoelectric Generator Harvesting Bike Vibrations Energy to Supply Portable Devices**. International Conference on Renewable Energies and Power Quality '08. Santander, Espanha: ICREPQ. 12-14 Março 2008.

MORGAN ELECTRO CERAMICS. **Guide to Piezoelectric & Dielectric Ceramic**. Disponível em: <<http://www.morganelectroceramics.com/resources/guide-to-piezoelectric-dielectric-ceramic/>>. Acesso em: 06 novembro 2012.

MORGAN ELECTRO CERAMICS. **Technical Publications. TP-219 e TP-226**. Disponível em: <<http://www.morganelectroceramics.com/resources/technical-publications/>>. Acesso em: 07 novembro 2012.

PEREIRA, A. H. A. **Cerâmicas Piezoelétrica. Funcionamento e Propriedades, Application Note**. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/ultrason/ceramicas-piezoeltricas.html>>. Acesso em: 14 novembro 2012.

PERELLI, A. et al. **Design and performance analysis of the mechanical structure of a piezoelectric generator by Von Karman vortexes for underwater energy harvesting**. OCEANS. Bergen: MTS/IEEE. 2013. p. 1-8.

PIPPI, Rafael D. S. **Projeto e Construção de Motores Rotativos Ultrassônicos de Ondas Viajantes**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, p. 142. 2003.

RAO, Singiresu S. **Vibrações Mecânicas**. Tradução de Arlete Simille. 4^a. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, v. 1, 2008. 420 p.

ROCHA, J. G. et al. **Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear**. Transactions on Industrial Electronics. [S.l.]: IEEE Journals & Magazines. 03 março 2010. p. 813-819.

ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K. **A Piezoelectric Vibrations Based Generator for Wireless Eletronics**. Smart Materials and Structures. UK: IOPscience - Institute of Physics Publishing. 2004. p. 1131-1142.

SASHIDA, T.; KENJO, T. **An Introduction to Ultrasonic Motors**. Oxford: Clarendon Press, 1993.

SEPEHRY, N.; SHAMSHIRSAZ, M.; BASTANI, A. **Electromechanical Impedance Modeling of Cantilever Beams with Embedded PZT Transducers**. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Montreal, Canada: IEEE. 2010. p. 569-574.

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

SODANO, H. A. et al. **Use of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Charging Batteries**. 10th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials. San Diego, CA: Proceedings of SPIE. 2003. p. 101-108.

SODANO, H. A.; INMAN, D. J. Estimation of Electric Charge output for Piezoelectric Energy Harvesting. **Strain Journal**, p. p. 49-58, 2004.

SODANO, Henry A.; INMAN, Daniel J.; PARK, Gyuhae. **A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials**. The Shock and Vibration Digest. [S.l.]: Sage Publications. Maio 2004. p. 197–205.

SOEIRO, Newton S. **Universidade Federal do Pará - Instituto de Tecnologia - ITEC**. Disponível em: <<http://www.ufpa.br/gva/Apostilas/Fundamentos%20de%20%20Vibracao.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2014.

SWEE-LEONG, KOK; AB RAHMAN, MOHD FAUZI. **Design Considerations of MEMS Based Piezoelectric Cantilever for Harvesting Energy**. IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics. Melaka, Malaysia: IEEE. 2012. p. 238-242.

UMEDA, M.; NAKAMURA, K.; UEHA, S. **Analysis of Transformation of Mechanical Impact Energy to Electrical Energy Using a Piezoelectric Vibrator**. [S.l.]: Japanese Journal of Applied Physics. 1996. p. 3267–3273.

WISCHKE, M.; GOLDSCHMIDTBOEING, F.; WOIAS, P. **A Low Cost Generator Concept for Energy Harvesting Applications**. IEEE Transducers & Eurosensors'07. The 14th

International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Lyon, França: IEEE Journals & Magazines. 10-14 junho 2007. p. 875-878.

WU, W. J. et al. **Modeling and experimental verification of synchronized discharging techniques for boosting power harvesting from piezoelectric transducers.** Smart Materials and Structures. [S.l.]: IOP Publishing. 2009. p. 1-14.

YANG, B.; YUN, K. S. **Efficient Energy Harvesting From Human Motion Using Wearable Piezoelectric Shell Structures.** IEEE Transducers'11. Beijing, China: IEEE Journals & Magazines. 5-9 junho 2011. p. 2646-2649.

ANEXOS

ANEXO A – Cálculo da viga engastada com uma extremidade livre.

Para a determinação da viga engastada serão apresentadas a sequência de fórmulas vista em Rao (2008).

Para o elemento de mola mostrado na Figura 50, uma força é desenvolvida na mola sempre que houver um movimento relativo entre suas duas extremidades. A força da mola é proporcional à quantidade de deformação e é dada pela Equação (32), usando a Lei de Hooke:

$$F = k \cdot x \quad (32)$$

onde F é a força da mola, x é a deformação (deslocamento de uma extremidade em relação à outra) e k é a rigidez da mola ou constante elástica. O trabalho U realizado na deformação de uma mola é armazenado como deformação ou energia potencial na mola, e é dado pela Equação (33):

$$U = \frac{1}{2} k \cdot x^2 \quad (33)$$

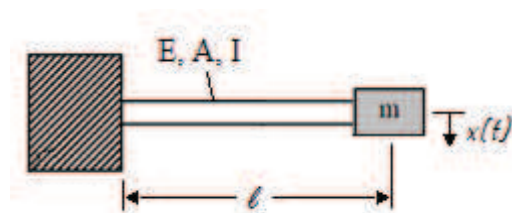


Figura 50 – Modelo de elemento de mola. Viga engastada com massa na extremidade livre.
Fonte: Rao (2008).

Segundo Rao (2008), molas reais são não lineares e seguem a Equação (32) apenas até certa deformação. Quando a deformação ultrapassa certo valor, diz-se que ultrapassou o limite de escoamento e a relação força/deformação torna-se não linear. Como para esta aplicação a deformação é definida como pequena, tende-se a um processo de linearização.

Para ilustrar este processo, admitir-se-á que a carga de equilíbrio estático F que age sobre a mola causa uma deflexão de x^* . Se uma força incremental ΔF for adicionada a F , a mola sofre uma deflexão equivalente a uma quantidade adicional Δx . A nova força da mola $F + \Delta F$ pode ser expressa usando expansão em série de Taylor ao redor da posição de equilíbrio estático x^* , e é mostrado no Equação (34):

$$\begin{aligned} F + \Delta F &= F(x^* + \Delta x) \\ &= F(x^*) + \left. \frac{dF}{dx} \right|_{x^*} (\Delta x) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 F}{dx^2} \right|_{x^*} (\Delta x)^2 + \dots \end{aligned} \quad (34)$$

Para valores pequenos de Δx , os termos de derivadas de ordem superior podem ser desprezados, onde se obtém a Equação (35):

$$F + \Delta F = F(x^*) + \left. \frac{dF}{dx} \right|_{x^*} (\Delta x) \quad (35)$$

Visto que $F = F(x^*)$, pode-se expressar ΔF como mostra a Equação (36):

$$\Delta F = k \cdot \Delta x \quad (36)$$

onde k é a constante elástica linearizada em x^* dada pela Equação (37):

$$k = \left. \frac{dF}{dx} \right|_{x^*} \quad (37)$$

A Equação (36) pode ser usada por simplicidade, porém o erro nas aproximações pode ser muito grande.

Elementos elásticos como vigas também comportam-se como molas. Considera-se uma viga em balanço com uma massa m na extremidade, que pode ser visto na Figura 50. Por simplicidade admite-se que a massa M da viga é desprezível em comparação com a massa m da extremidade. Pela resistência dos materiais, sabe-se que a deflexão estática da viga na extremidade é dada pela Equação (38):

$$\delta_{st} = \frac{W \ell^3}{3EI} \quad (38)$$

Onde $W = mg$ é o peso da massa m , E é o módulo de Young, e I é o momento de inércia da seção transversal da viga. Obtém-se então, a constante elástica, que é mostrada na Equação (39):

$$k = \frac{W}{\delta_{st}} = \frac{3EI}{\ell^3} \quad (39)$$

ANEXO B – Cálculo da resposta forçada de um sistema mecânico quando submetido a uma força harmônica que atua livremente sobre a massa.

Pelo movimento harmônico apresentado pelo came-seguidor, para fins de análise dos cálculos, sempre será usada a Equação (40).

$$F(t) = F_0 \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (40)$$

Onde F_0 é a amplitude da força (é o valor da força quando esta é aplicada estaticamente), ω é a frequência com que a força é aplicada (igual a zero quando estática), e φ é o ângulo de fase em relação ao referencial de tempo.

A Figura 51(a) mostra o sistema massa mola com um grau de liberdade e seu respectivo diagrama de corpo livre. O diagrama de corpo livre ilustrado na Figura 51(b) apresenta as forças aplicadas ao corpo de massa m_{eq} . Pela a 2ª Lei de Newton, a equação diferencial (EDO) do movimento é apresentada na Equação (41):

$$m_{eq}\ddot{x} + c_{eq}\dot{x} + k_{eq}x = F(t) \quad (41)$$

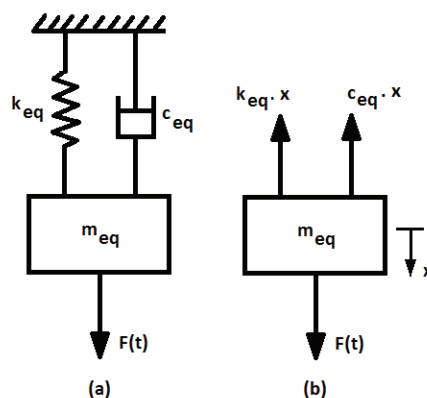


Figura 51 – Em (a) sistema massa mola amortecido e em (b) diagrama do corpo livre.

Fonte: Soeiro (2008, p. 61)

Para a EDO do movimento existe uma solução geral, constituída de uma solução homogênea associada a uma solução particular. A Equação (42) mostra a solução geral:

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \quad (42)$$

A solução homogênea é obtida fazendo $F(t) = 0$ resultando na vibração livre e que é dependente das condições iniciais. A solução particular representa a **vibração de regime permanente** do sistema, que persiste até cessar a força externa do mesmo. A parcela do movimento que diminui com o tempo, devido ao amortecimento do sistema é chamada de transiente, que é a velocidade com que ocorre esta diminuição, e é dependente dos parâmetros m_{eq} , c_{eq} , k_{eq} . A Figura 52 ilustra a composição da solução da Equação (41) do movimento.

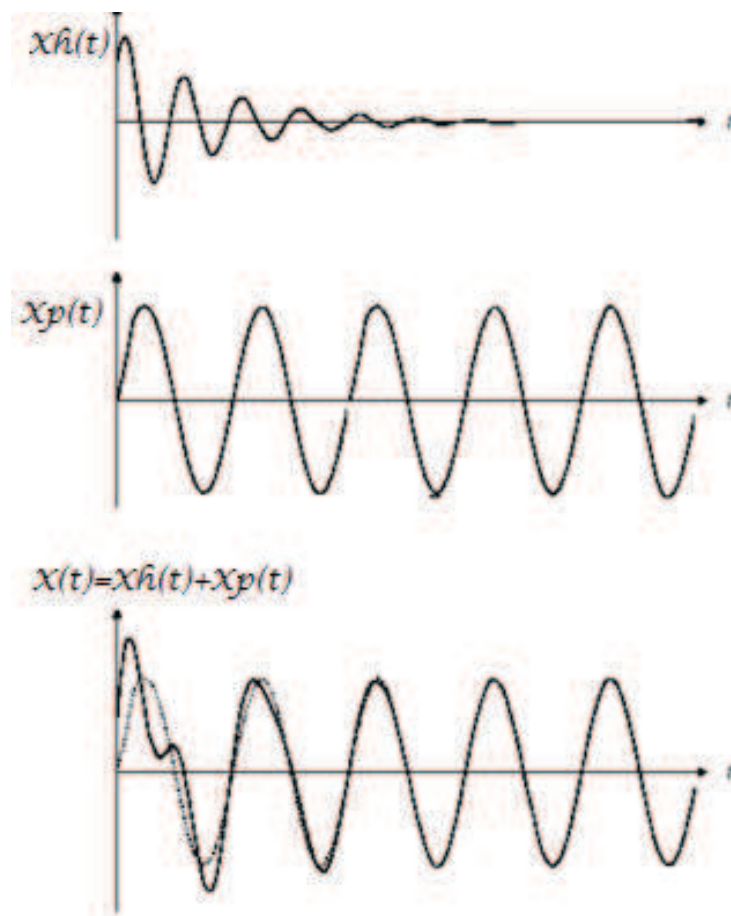


Figura 52 – Solução homogênea, particular e geral.
 Fonte: Soeiro (2008, p. 62)

Por conveniência e similaridade ao sistema em estudo, será realizada a análise da resposta forçada para uma solução particular, que é uma força externa harmônica atuando em um sistema amortecido.

A solução particular $x_p(t)$, que representa a resposta permanente no tempo, tomando $F(t) = F_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$, ângulo de fase $\phi = 0$, tem a forma:

$$F(t) = X \cdot \text{sen}(\omega t - \phi) \quad (43)$$

Onde X é a amplitude de oscilação e ϕ é o ângulo de fase que representa o atraso na resposta em relação a excitação.

Derivando duas vezes a Equação (43), substituindo $x_p(t)$ e suas derivadas na Equação (41) e colocando todos os termos na forma de senos, tem-se a Equação (44):

$$m_{eq}X\omega^2 \text{sen}(\omega t - \phi + \pi) + c_{eq}X\omega \text{sen}\left(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2}\right) + k_{eq}X \text{sen}(\omega t - \phi) = F_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (44)$$

Onde cada um dos termos representa as forças atuantes: no membro esquerdo da equação, na ordem, tem-se a força de inércia, a força de amortecimento e a força restauradora (da mola). E no lado direito da equação, tem-se a força de excitação harmônica. A partir desta equação, pode-se criar o diagrama vetorial das forças, visto na Figura 53 e pode-se extrair a Equação (45). Aplicando o Teorema de Pitágoras:

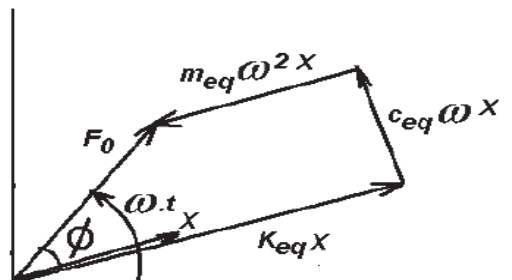


Figura 53 – Diagrama vetorial das forças que atuam em um corpo livre de massa m_{eq} .
Fonte: Soeiro (2008, p. 70)

$$F_0^2 = (k_{eq}X - m_{eq}\omega^2 X)^2 + (c_{eq}\omega X)^2 \quad (45)$$

Donde chegamos a expressão da amplitude da resposta permanente e do ângulo de fase:

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k_{eq} - m_{eq}\omega^2)^2 + (c_{eq}\omega)^2}} \quad (46)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{c_{eq}\omega}{k_{eq} - m_{eq}\omega^2}\right) \quad (47)$$

Portanto, a resposta permanente tem a mesma forma de excitação (função harmônica), a mesma frequência de excitação ω , porém está atrasada em relação a excitação por meio de um ângulo de fase ϕ , conforme é apresentado na Figura 54:

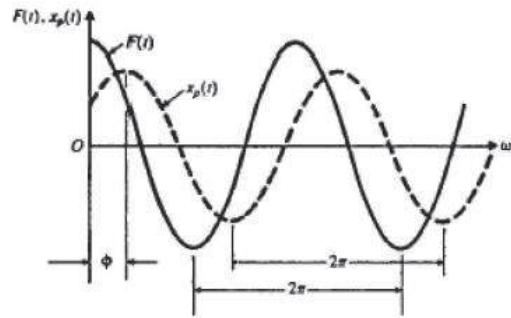


Figura 54 – Atraso na resposta em relação a excitação.
Fonte: Soeiro (2008, p. 71)

As Equações (48) e (49) compõem a chamada resposta em frequência, pois a amplitude do movimento e ângulo de fase aparece em função da frequência de excitação harmônica. Normalmente apresenta-se estas duas equações de forma adimensional, portanto, serão divididas as duas equações no numerador e denominador pela constante da mola k_{eq} .

$$X = \frac{\frac{F_0}{k_{eq}}}{\sqrt{\left(1 - \frac{m_{eq}\omega^2}{k_{eq}}\right)^2 + \left(\frac{c_{eq}\omega}{k_{eq}}\right)^2}} \quad (48)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{c_{eq}\omega}{k_{eq} - m_{eq}\omega^2}\right) \quad (49)$$

Considerando que:

- Relação de Frequência:

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (50)$$

- Fator de Amplificação:

$$R = \frac{X}{X_0} \therefore \frac{X}{F_0/k_{eq}} \quad (51)$$

- Frequência Natural:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \therefore k_{eq} = m_{eq} \cdot \omega_n^2 \quad (52)$$

- Fator de Amortecimento:

$$\zeta = \frac{c_{eq}}{2m_{eq}\omega_n} \therefore c_{eq} = 2\zeta m_{eq}\omega_n \quad (53)$$

Fazendo as devidas substituições nas Equações (48) e (49), tem-se:

$$R = \frac{X}{F_0/k_{eq}} = \frac{1}{\sqrt{(1-r)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (54)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{2\zeta r}{1-r^2}\right) \quad (55)$$

A Equação (54) indica que o fator de amplificação é uma relação entre a amplitude da vibração no regime permanente X , e o deslocamento devido à aplicação estática da mesma amplitude dessa mesma força, F_0/k_{eq} . Em outras palavras, é a relação entre o efeito dinâmico da aplicação da força harmônica $F(t)$ e o efeito estático da aplicação da amplitude dessa mesma força.

ANEXO C – Propriedades piezelétricas de cerâmicas comerciais.

A Tabela 10 apresenta os principais materiais piezelétricos comerciais e as respectivas propriedades. Para o gerador proposto, ficou definido a utilização do modelo PZT- 4, conforme definição de cada propriedade que interfere na capacidade de geração de energia elétrica.

Tabela 10 – Principais materiais piezelétricos comerciais e as respectivas constantes.

Material	PZT-4	PZT-8	PZT-5A	PZT-5J	PZT-5H
k_p	0,6	0,5	0,61	0,6	0,63
k_{33}	0,68	0,63	0,7	0,71	0,73
d_{33} (10^{-12} C/N)	300	215	400	460	550
d_{31} (10^{-12} C/N)	-11,5	-9,5	-170	-210	-265
g_{33} ($\times 10^{-3}$ V _m /N)	26	25	25	22	19
g_{31} ($\times 10^{-3}$ V _m /N)	-11	-11	-11	-9	-9
K^T_3 Const. Dielétrica Relativa	1250	1000	1750	2450	3100
Fator de dissipação $\tan \delta$	0,004	0,004	0,02	0,02	0,02
Densidade (Kg/m ³)	7600	7600	7650	7500	7500
Temperatura de Curie (°C)	325	330	360	260	190
Fator de Qualidade Q_m	500	1000	75	70	65
s^E_{11} ($\times 10^{-12}$ m ² /N)	12	11	19	23	21
s^E_{33} ($\times 10^{-12}$ m ² /N)	16	14	16	16	15
N_t (Hz-m) (modo espessura)	1905	2032	1800	1950	2000

Fonte: ATCP Engenharia Física

A seguir são apresentadas as definições das principais propriedades piezelétricas envolvidas na escolha do modelo do material PZT utilizado no projeto, conforme Pippi (2003) e Pereira (2012):

- **Constante de carga piezoelétrica d**

Unidade: m/V (metros/Volt) ou C/N (Coulombs/Newton) Informa qual é a proporção entre a variação dimensional (Δl) do material piezoelétrico (em metros) e a diferença de potencial

aplicada (em Volts), e entre a geração de cargas elétricas (em Coulombs) e a força aplicada no material (em Newtons). Valores típicos: De 0,2 a 8 Angstroms por Volt aplicado, e de 20 a 800 pico Coulomb por Newton aplicado, para cerâmicas piezoelétricas de PZT. Aplicações: No projeto de posicionadores piezoelétricos e sensores de força/deformação.

- **Constante de tensão piezoelétrica g**

Unidade: Vm/N (Volts x metros/Newton) Informa qual é a proporção entre a diferença de potencial gerada (em Volts) e a força aplicada (em Newton) para uma cerâmica com comprimento de 1 metro. Valores típicos: De -1 a 60 Volts para cada Newton aplicado (considerando a dimensão do eixo em questão de 1 metro), para cerâmicas piezoelétricas de PZT. Diminuindo-se a dimensão da cerâmica ou aumentando a força, o módulo da tensão gerada também aumenta. Aplicações: No projeto de detonadores de impacto e “*magic clicks*”.

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}^T} \quad (56)$$

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_{31}^T} \quad (57)$$

Onde ϵ_{33}^T e ϵ_{31}^T representam a permissividade no PZT nas diferentes direções. A constante g tem como unidade $V \cdot m/N$

- **Coefficiente de acoplamento k**

Unidade: Adimensional. Eficiência do material na transdução/conversão de energia elétrica em mecânica e vice versa. Valores típicos: De 0.02 (equivalente a 2% de eficiência) a 0.75 (equivalente a 75% de eficiência), para cerâmicas piezoelétricas de PZT. Aplicações: No controle de qualidade das cerâmicas piezoelétricas e no projeto de dispositivos em que não se deseja a conversão cruzada de energia, ou seja, que uma vibração ou deformação em um eixo não gere cargas elétricas ou diferença de potencial em outro eixo. Neste caso, quanto menor o respectivo fator de acoplamento melhor.

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (58)$$

- **Fator de qualidade mecânico Q_m**

Unidade: Adimensional. É uma medida das perdas mecânicas (amortecimento) do material. Valores típicos: De 50 a 1500, para cerâmicas piezoelétricas de PZT. Aplicações: No projeto de dispositivos dinâmicos de alta potência.

- **Fator de dissipação dielétrica $\tan \delta$**

Unidade: Adimensional. É uma medida das perdas dielétricas do material. Valores típicos: De 2×10^{-3} a 25×10^{-3} para cerâmicas piezoelétricas de PZT (sob baixo campo). Aplicações: No projeto de dispositivos dinâmicos de alta potência e/ou submetidos a altos campos elétricos.

- **Temperatura de Curie T_C**

Unidade: Graus Celsius. É a temperatura na qual a estrutura cristalina do material sofre uma transição de fase e o mesmo deixa de apresentar propriedades piezoelétricas. Depois de ultrapassada esta temperatura, o material perde a polarização remanescente induzida tornando-se inútil para a utilização como elemento transdutor de energia elétrica em mecânica. Valores típicos: De 150 a 350 °C, para cerâmicas piezoelétricas de PZT. Aplicações: No projeto de dispositivos que deverão operar em altas temperaturas e de alta potência.

- **Constantes de frequência N**

Unidade: Hz m (Hertz x metro). Significa qual seria a frequência de ressonância de uma cerâmica, com a simetria do índice em questão, com sua dimensão principal com 1 metro. Equivale a aproximadamente a metade da velocidade do som no material. É um fator importante, pois permite a estimativa de frequência de ressonância de dispositivos piezoelétricos. Valores típicos: De 800 a 3000 Hz.m, para cerâmicas piezoelétricas de PZT. Aplicações: No projeto de dispositivos que operarão em ressonância.

- **Constante de Deformação Piezoelétrica:**

Esta constante, chamada de d , relaciona o campo elétrico U aplicado em um PZT polarizado com a deformação sofrida por ele. Sua unidade é expressa em m/V .

Com polarização positiva:

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = d \cdot U \quad (59)$$

Com polarização negativa:

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = -d \cdot U \quad (60)$$

- **Coefficiente de Poisson:**

É o parâmetro que indica a deformação relativa entre as direções transversal e longitudinal. Ou seja, é a razão entre a contração longitudinal e a expansão transversal quando o material é submetido a pressão com campo elétrico constante.

$$v = \frac{S_{31}}{S_{33}} \quad (61)$$

Onde, S_{33} é a deformação $\Delta z/z$ causada pela aplicação de uma pressão na direção z e S_{31} representa a deformação ocorrida em x causada pela mesma pressão em z .

- **Direção da Constante de Deformação:**

Quando os fenômenos de deformações relativas forem causados por campos elétricos ao invés de pressões externas, não é possível utilizar o Coeficiente de Poisson para quantificar as relações de deformação. O princípio de geração da deformação neste caso é eletromecânico e não apenas mecânico, como dito no item anterior, tornando os princípios de deformação diferentes. Todavia, utilizam-se os coeficientes de deformação piezelétricas agregadas aos subscritos de direcionalidade para expressar as deformações relativas.

A constante de deformação na direção z (efeito longitudinal) é dado por d_{33} , ou seja:

$$\frac{\Delta z}{z} = d_{33} \cdot E_z \quad (62)$$

A expansão na direção x (efeito transversal) é dado por d_{31} e tomando o exemplo da Figura 3 onde as dimensões x e y são iguais tem-se:

$$\frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta y}{y} = d_{31} \cdot E_z \quad (63)$$

- **Coeficiente de Tensão Elétrica de Saída:**

O efeito piezelétrico reverso é dado pelas seguintes expressões sintetizadas:

$$V_z = -g_{33} \cdot T_z \quad (64)$$

$$V_z = -g_{31} \cdot T_{x,y} \quad (65)$$

Onde T é pressão aplicada e V_z é a tensão elétrica gerada no PZT.

- **Módulo de Young:**

Também chamado de módulo de elasticidade E , é a razão de pressão aplicada pela deformação produzida.

$$E = \frac{T}{S_{31}} \quad (66)$$

A unidade é N/m^2 . O sentido da deformação S_{zx} depende das direções da aplicação de pressão.