



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Mestrado - Doutorado

**DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE UM
GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO A ENERGIA
VIBRATÓRIA DE SISTEMAS MECÂNICOS COM BASE NOS
MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS**

por

Renato Franklin Rangel

Trabalho de Tese apresentado à Universidade Federal da Paraíba como
requisito para obtenção do grau de Doutor.

RENATO FRANKLIN RANGEL

**DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE UM
GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO A ENERGIA
VIBRATÓRIA DE SISTEMAS MECÂNICOS COM BASE NOS
MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS**

Trabalho de Tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Doutor.

Orientador: Cícero da Rocha Souto

**Catálogo na publicação Seção de
Catálogo e Classificação**

R196d Rangel, Renato Franklin.

Desenvolvimento Teórico e Experimental de um Gerador de
Energia Elétrica Utilizando a Energia Vibratória de
Sistemas Mecânicos com Base nos Materiais

Piezoelétricos / Renato Franklin Rangel. - João Pessoa,
2019.

94 f. : il.

Orientação: Cícero da Rocha Souto.

Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Vibração mecânica. 2. energia alternativa. 3.
materiais piezoelétricos. 4. gerador de energia
elétrica. I. Souto, Cícero da Rocha. II. Título.

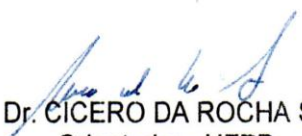
UFPB/BC

DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE UM GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO A ENERGIA VIBRATÓRIA DE SISTEMAS MECÂNICOS COM BASE NOS MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

por

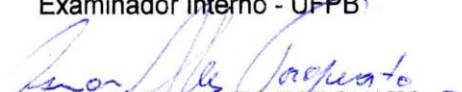
RENATO FRANKLIN RANGEL

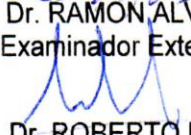
Tese aprovada em 31 de maio de 2019

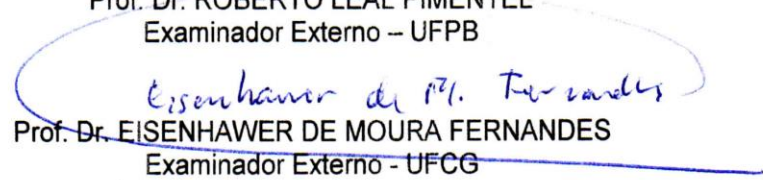

Prof. Dr. CICERO DA ROCHA SOUTO
Orientador - UFPB


Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO
Examinador Interno - UFPB


Prof. Dr. SIMPLICIO ARNAUD DA SILVA
Examinador Interno - UFPB


Prof. Dr. RAMON ALVES TORQUATO -
Examinador Externo - UFPB


Prof. Dr. ROBERTO LEAL PIMENTEL
Examinador Externo - UFPB


Prof. Dr. EISENHAWER DE MOURA FERNANDES
Examinador Externo - UFCG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais José Renato Rangel e Maria Iêda G. Rangel. Aos meus irmãos Rubens Rangel e Igor Rangel, pelo tempo que deixamos de estar juntos.

Dedico também à minha esposa Lídia Rangel, pelo companheirismo e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Dr. Cícero da Rocha Souto e Dr. Simplício Arnaud da Silva pela dedicação nas correções e orientações neste período de aprendizado.

Aos meus colegas de laboratório e de pós-graduação, em especial ao José Marques e ao Alan Gonçalves.

Ao Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas (LaSEA) da Universidade Federal da Paraíba, pelo apoio técnico e estrutural.

DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E EXPERIMENTAL DE UM GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO A ENERGIA VIBRATÓRIA DE SISTEMAS MECÂNICOS COM BASE NOS MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

RESUMO

A colheita de energia presente no ambiente é uma técnica promissora e de grande potencial que pode contribuir com a geração de energia elétrica, de forma limpa, a partir de fontes renováveis, viabilizando o funcionamento de dispositivos eletrônicos de baixa potência autoalimentados. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a avaliação do desempenho de um dispositivo que transforma as vibrações mecânicas presentes no ambiente em energia elétrica, utilizando cerâmicas piezoelétricas a base de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT). O gerador foi construído como uma estrutura mecânica capaz de fornecer deformações cíclicas a oito células piezelétricas, através de cargas de tração/compressão. Antes da construção do dispositivo, suas dimensões geométricas foram estabelecidas por meio de uma análise utilizando elementos finitos. Para aquisição dos resultados experimentais foi utilizado um sistema de medição devidamente instrumentado, onde foi possível obter os dados referentes a aceleração, a tensão e a potência elétrica geradas pelo dispositivo. Os resultados obtidos através das análises numéricas e experimentais - relativos à dinâmica do dispositivo e à tensão elétrica gerada, são apresentados e comparados. O gerador foi avaliado para diferentes valores de amplitude de vibração e gerou uma potência máxima de 9,6 mW quando operando em sua primeira frequência natural (60 Hz), considerando uma carga resistiva de 15 k Ω . Por fim, o desempenho do gerador foi avaliado sob duas condições diferentes de excitação ambiente, quando acoplado a um condensador de ar condicionado e quando acoplado a um motor de indução trifásico.

Palavras chave – Vibração mecânica, energia alternativa, materiais piezoelétricos, gerador de energia elétrica.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL DEVELOPMENT OF A POWER GENERATOR USING THE VIBRATING ENERGY OF A MECHANICAL SYSTEMS BASED ON PIEZOELECTRIC MATERIALS

ABSTRACT

Energy harvesting from environmental sources is a promising technique with great potential that can contribute to the generation of clean electric energy from renewable sources, suitable for the operation of self-powered, low-power electronic devices. In this sense, this work aims to develop and evaluate the performance of a device that transforms mechanical vibrations present in the environment into electric energy using Lead Zirconium Titanate (PZT) piezoelectric ceramics. The generator was constructed as a mechanical structure capable of providing cyclic deformations to eight piezoelectric cells, through tensile/compressive loads. Prior to the construction of the device, its geometric dimensions were established through a finite element analysis. For the acquisition of the experimental results a duly instrumented measurement system was used, where it was possible to obtain data regarding the acceleration, voltage and electric power generated by the device. The results from numerical and experimental analyses - related to the dynamics of the device and the generated electric voltage, are presented and compared. The generator was evaluated for different vibration amplitudes and generated a maximum power of 9.6 mW when operating at its first natural frequency (60 Hz), considering a resistive load of 15 k Ω . Finally, the performance of the generator was evaluated under two different ambient excitation conditions, when coupled to an air condition condenser and when coupled to a three phase induction motor.

Keywords – Mechanical vibration, alternative energy, piezoelectric materials, electric power generator.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	OBJETIVO	15
1.2	CONTRIBUIÇÕES	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	CAPTAÇÃO DE ENERGIA.....	17
2.1.1	Algumas Fontes e Configurações para Captação de Energia.....	18
2.1.2	Captação de Energia Utilizando Materiais Piezoelétricos	23
2.2	PIEZOELÉTRICIDADE.....	33
2.2.1	Piezoelétricidade Linear	38
2.2.2	Elemento Piezoelétrico como Sensor ou Atuador	40
2.2.3	Modos de Operação de um Transdutor Piezoelétrico	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1	SELEÇÃO DO MATERIAL PIEZOELÉTRICO	45
3.1.1	Teste Experimental.....	47
3.2	MODELAGEM NUMÉRICA.....	47
3.2.1	Desenvolvimento das Simulações via <i>Software</i>	48
3.3	DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	54
3.3.1	Estrutura Experimental.....	54
3.4	TESTE DE APLICAÇÃO	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1	INTRODUÇÃO.....	62
4.2	MATERIAL PIEZOELÉTRICO SELECIONADO	63
4.3	MODELAGEM NUMÉRICA.....	64
4.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	67
4.5	TESTE DE APLICAÇÃO	76
4.5.1	Validação do Dispositivo em Aplicações Reais.....	78
4.5.2	Consumo do Nó Sensor.....	81
5	CONCLUSÕES	83
	REFERÊNCIAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mini turbina eólica (HOWEY <i>et al.</i> , 2011).....	19
Figura 2.2 – Dispositivo de captação de energia eólica (QIU <i>et al.</i> , 2011).....	20
Figura 2.3 – Modelo de microgerador híbrido (BEKER <i>et al.</i> , 2011).....	22
Figura 2.4 – Configuração básica para captação de energia piezoelétrica a partir de vigas em balanço (a); unimorph (b); bimorph (c) (RAMADASS <i>et al.</i> , 2010).....	24
Figura 2.5 – Cauda artificial de peixe hospedando dois compósitos piezoelétricos (CHA <i>et al.</i> , 2016).	25
Figura 2.6 – Protótipo do pehd fixado no <i>shaker</i> através do suporte de alumínio (ZHU <i>et al.</i> , 2009)	27
Figura 2.7 - a) Esquemático da captação de energia por impacto mecânico; b) imagem do dispositivo de colheita montado sobre a caixa de engrenagens (JANPHUANG <i>et al.</i> , 2011).	28
Figura 2.8 – Dispositivo construído com multicamada uniforme (a) e variável (b) (SRIRAMDAS <i>et al.</i> , 2015).....	28
Figura 2.9 – Retirada de material piezoelétrico nas linhas de inflexão. (a) unimodal (primeiro modo); (b) multimodal (primeiro e segundo modo) (LEE <i>et al.</i> 2011).....	29
Figura 2.10 – a) e b) – transdutor de ponte. C) e d) – modulo de captação de energia contendo 64 transdutores conectados em paralelo (YESNER, 2018).....	30
Figura 2.11 – a) modelo de proposta do amortecedor de choques alto-gerador; b) módulo de uma roda para simulação em estrada de teste (FENG <i>et al.</i> , 2011)	30
Figura 2.12 – Captador de energia a partir da deformação da parede arterial. Princípio de funcionamento (a); estrutura do gerador (b); implante (c) (ZHANG <i>et al.</i> , 2015).....	31
Figura 2.13 – Dispositivo gerador (DANIELS <i>et al.</i> , 2013)	32
Figura 2.14 – Representação do acoplamento entre domínios físicos.)	33
Figura 2.15 – Célula unitária de perovskita (DATTA, 2014)..	34
Figura 2.16 - Estrutura atômica do pzt. (a) estado tetragonal distorcido; (b) estado cúbico (SAKAMOTO, 2006).....	36
Figura 2.17 - Polarização de uma cerâmica ferroelétrica. (a) material sem polarização; (b) aplicação de campo elétrico; (c) após a polarização (SAKAMOTO, 2006)	37
Figura 2.18 - Curva de histerese da polarização de uma cerâmica piezoelétrica (PI, 2018)	37
Figura 2.19 - Esquema representativo do efeito piezoelétrico direto (CASIMIRO <i>et al.</i> , 2009)	40

Figura 2.20 - Direções de deformação e de polarização de uma placa piezoelétrica (SOUTO, 2008).....	42
Figura 2.21 - Piezocerâmica polarizada. (a) campo elétrico com sentido oposto à polarização elétrica; (b) campo elétrico com o mesmo sentido da polarização elétrica (SAKAMOTO, 2006).....	42
Figura 2.22 – Modos de operação de um elemento piezoelétrico. (a) modo 33; (b) modo 31 (PRIYA e INMAN, 2009).....	43
Figura 3.1 – Vigas com os pzs acoplados (a). Estrutura de teste montada (b).....	47
Figura 3.2 – Elemento de casca shell 93 para simulação das vigas (ANSYS 11, 2006).....	49
Figura 3.3 – Elemento sólido solid 45 para simulação das massas (ANSYS 14, 2011)..	49
Figura 3.4 - Elemento sólido solid226 para simulação do piezoelétrico (ANSYS 14, 2011)....	52
Figura 3.5 – Forma geométrica e malha de elementos finitos do gerador em desenvolvimeto	53
Figura 3.6 – Estrutura submetida à análise estática.....	53
Figura 3.7 – Gerador submetido à análise harmônica.	54
Figura 3.8 – Esquema do gerador piezoelétrico com duas vigas e 8 pzs..	55
Figura 3.9 – Modo de vibrar esperado para a estrutura..	55
Figura 3.10 – Esquema do aparato mecânico montado para o estudo do gerador...	56
Figura 3.11 – Gerador piezoelétrico e sua base de acomodação e engaste (a). Montagem experimental para estudo do pzt(b).....	56
Figura 3.12 – Esquemático da montagem experimental.....	57
Figura 3.13 – Bancada de trabalho experimental... ..	58
Figura 3.14 – ez430-rf2500. Ponto de acesso (a); dispositivo fina (b) (TI, 2007)....	58
Figura 3.15 – Esquema de funcionamento do teste de aplicação... ..	61
Figura 3.16 – Princípio de operação do módulo de armazenamento eh300a....	61
Figura 4.1 – Deformação ao longo da viga....	64
Figura 4.2 – Primeiro modo de vibração (60,1 hz).....	64
Figura 4.3 – Segundo modo de vibração (622,3 hz).....	65
Figura 4.4 – Terceiro modo de vibração (633 hz)... ..	66
Figura 4.5 – Deslocamento na direção y referente à excitação na frequência de 60 hz....	66
Figura 4.6 – Deslocamento do nó 14111 na frequência natural....	66

Figura 4.7 – Tensão elétrica gerada em 60,5 Hz.....	67
Figura 4.8 – Tensão elétrica em função da frequência.....	68
Figura 4.9 – Espéctro com as frequências naturais da estrutura experimental.....	69
Figura 4.10 –Tensão elétrica gerada em cada pzt em função frequência.....	70
Figura 4.11 – Tensão elétrica em função do tempo e da frequência em 60 Hz (pzts em paralelo).	71
Figura 4.12 – Tensão elétrica e aceleração em função da frequência (pzts em paralelo).....	71
Figura 4.13 – Gerador piezoelétrico com impedância interna ‘z’ alimentando uma carga de impedância ‘z’.....	72
Figura 4.14 –Tensão elétrica e impedância resistiva em função da frequência....	73
Figura 4.15 – Tensão e potência elétrica em função da frequência.....	74
Figura 4.16 – Tensão no capacitor e no transceptor quando o gerador foi excitado em 0,5 g a 60 hz....	77
Figura 4.17 – Gerador acoplado as fontes de vibrações. Condensador do ar condicionado (a). Motor elétrico (b).....	78
Figura 4.18 – Perfil de aceleração e transformada rápida de fourier (fft) das vibrações. (a) e (c) referem-se à vibração no motor. (b) e (d) referem-se à vibração no condensador.....	79
Figura 4.19 –Tensão elétrica através de capacitor e da carga. Gerador montado no condensador... ..	80
Figura 4.20 – Tensão elétrica através de capacitor e da carga. Gerador montado no motor.....	80
Figura 4.21 – Esquema para o teste de consumo.....	82
Figura 4.22 – Forma de onda no momento da leitura e transmissão de dados.....	82
Figura 5.1 – Esboço de um transdutor piezoelétrico multimodal.....	84

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A convicção de que a eletricidade é um insumo relevante para o desenvolvimento econômico e social de um país, frente as preocupações ambientais relacionadas à dependência mundial, na exploração de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, somadas ao crescente consumo energético mundial, promoveram a necessidade da diversificação da matriz energética por meio de diferentes fontes alternativas e renováveis. Diante disso, passou-se a explorar o conceito de *Energy Harvesting*, que consiste na ideia de produzir energia elétrica a partir da captação de algum tipo de energia disponível no ambiente, como por exemplo, a energia cinética (vento), energia térmica (solar-térmica, geotérmica) e energia eletromagnética (fotovoltaica). Diversas aplicações a larga escala fazem uso deste conceito, como a produção de energia elétrica por parques eólicos e fotovoltaicos.

Mais recentemente, estudos acerca da possibilidade de gerar energia elétrica a partir de fontes disponíveis no ambiente têm sido realizados com o intuito de atender aplicações que demandam baixo consumo de energia (CHANG, 2011). Essas pesquisas foram impulsionadas pelos recentes avanços tecnológicos, que têm promovido importantes desenvolvimentos aos dispositivos eletrônicos, como redução no tamanho e no consumo de energia, considerável variedade de dispositivos sem fio e um aumento na demanda por sistemas eletrônicos autoalimentados, como por exemplo, as aplicações em meios industriais, monitoramentos ambientais, dispositivos médicos implantáveis e redes de sensores sem fio (PRATHIBHA *et al.*, 2014), os quais, necessitam de fontes de energia com a vida útil mais longa possível (ZHU *et al.*, 2009a, JORNET *et al.*, 2012, YANG *et*

al., 2018). Além dos diversos dispositivos interconectados por meio de infraestruturas inteligentes como a Internet das Coisas – *Internet of Things* (IoT), que é considerada uma das plataformas tecnológicas que mais crescem atualmente.

Segundo MALLICK (2018), a previsão é que em poucos anos, cerca de 25 bilhões de dispositivos estarão conectados em rede através da IoT. No entanto, uma questão crítica que restringe a consolidação dessa tecnologia é a alimentação de dispositivos de comunicação sem fio, problema já enfatizada em (OTIS, 2005). Atualmente, sistemas dessa natureza utilizam acumuladores eletroquímicos convencionais (pilhas ou baterias) como fonte de alimentação, que por possuírem tempo de vida limitado necessitam de substituição (quando possível), procedimento que pode tornar-se muito caro e por vezes arriscado, especialmente no caso dos dispositivos implantáveis. Para contornar tais problemas, os sistemas captadores de energia do ambiente apresentam-se como fontes de energia elétrica descentralizadas e independentes, promissoras para alimentação de dispositivos eletrônicos de baixa potência e com potencial para que, no futuro, venham a operar de forma realmente autônoma (ROSELLI *et al.*, 2014, GORLATOVA *et al.*, 2015, KAMALINEJAD *et al.*, 2015, NIYATO *et al.*, 2016, IANNACCI *et al.*, 2018).

Uma fonte de energia ambiente que tem recebido uma grande atenção por pesquisadores nos últimos anos é a cinética, na forma de vibração mecânica presente em máquinas e sistemas biológicos assim como em bens domésticos, fluxos de ar ou água, estruturas em movimento (carros e aviões), e outros como prédios (MATIKO *et al.*, 2014), pontes e pisos (KHALIGH *et al.*, 2010), enfim, estruturas sujeitas a tensões e/ou deformações mecânicas. Alguns mecanismos incluindo eletrostáticos (MITCHESON *et al.*, 2004), eletromagnéticos (CHO e KIM, 2017) e piezoelétricos têm sido investigados para a produção de energia elétrica a partir da vibração mecânica (HARB, 2011).

Os métodos de transdução eletromagnética e piezoelétrica são as duas abordagens mais promissoras para captação de energia cinética (KHALIGH *et al.*, 2010). Consequentemente, os transdutores de vibração com tecnologia piezoelétrica têm sido estudados de forma mais intensa (MARTÍNEZ *et al.*, 2015), se caracterizando como uma tecnologia mais desenvolvida, com um considerável número de pesquisas em andamento e publicações realizadas (RANGEL *et al.*, 2015, EDDIAI *et al.*, 2018, ILIK *et al.*, 2018, LI L. *et al.*, 2018, YESNER *et al.*, 2018), que revelam que os materiais piezoelétricos são candidatos mais adequados para converter de forma eficiente deformação mecânica em energia elétrica, sem qualquer fonte adicional, podendo suportar uma certa quantidade de

deformação além de possuir flexibilidade quanto ao tipo de material piezoelétrico a ser utilizado.

Partindo dessas informações, o principal objetivo desse trabalho é o desenvolvimento e a avaliação do desempenho de um gerador de energia elétrica baseado em uma estrutura mecânica dinâmica na qual são acopladas oito células piezoelétricas. Baseado no efeito piezoelétrico direto, o gerador produzirá, como consequência da ação da vibração sobre o mesmo, uma quantidade de energia elétrica proporcional à deformação mecânica sofrida pelas células. O gerador proposto teve seu desenvolvimento fundamentado a partir de análises numéricas computacionais e experimentais, considerando as variações nos parâmetros geométricos, tendo em vista, determinar a condição com maior capacidade de geração de energia elétrica. Tais análises são substancialmente importantes, não só para determinar a produção de energia, mas também como base para aperfeiçoar os parâmetros de concepção geométrica do protótipo, partindo da compreensão de como a variação de cada parâmetro afeta a quantidade de energia elétrica gerada.

Além da atenção à geometria, o tipo de material piezoelétrico selecionado também tem grande influência sobre a funcionalidade e o desempenho do dispositivo gerador. Por isso, uma das primeiras ações, a partir da observação dos parâmetros do material e por meio de experimentações práticas de desempenho, foi avaliar qual o tipo de material piezoelétrico mais se adequava ao gerador proposto.

Pensando em possíveis aplicações, o dispositivo foi projetado para que a sua primeira frequência natural seja de 60 Hz. Nessa frequência, podemos dispor de diferentes fontes de vibração para o gerador, normalmente equipamentos alimentados por uma rede elétrica de 60 Hz, como exemplos, aparelhos de ar-condicionado (LEE, 2010), motores elétricos ou transformadores de alta tensão (CHO, 2017). Dependendo do potencial de geração, a energia elétrica pode ser inicialmente armazenada ou diretamente utilizada para alimentar circuitos de monitoramento local de temperatura, umidade, vibração, etc.

Para avaliar o seu desempenho, foram analisados os valores de tensão elétrica em circuito aberto assim como os de potência elétrica gerada considerando uma carga resistiva ótima, para vários níveis de frequência e amplitude de vibração. Em seguida, o experimento foi repetido com o gerador piezoelétrico conectado a um circuito de armazenamento de energia, que alimenta um dispositivo sem fio capaz de ler e enviar a

temperatura do ambiente via rádio frequência (RF). Também foram realizadas verificações fora do laboratório, utilizando fontes de vibração presentes no ambiente.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho objetiva o estudo, desenvolvimento e avaliação do desempenho de um gerador, baseado em vibração mecânica/deformação para geração de energia elétrica alternativa utilizando materiais piezoelétricos.

Como objetivos específicos têm-se:

- Estudar as formas de captação de energia e os diferentes tipos de materiais piezoelétricos utilizados na geração de energia elétrica;
- Desenvolver simulações relacionados ao gerador piezoelétrico a ser concebido;
- Selecionar o material piezoelétrico adequado a estrutura proposta;
- Desenvolver um gerador de energia elétrica constituído por elementos piezoelétricos;
- Determinar os valores de potência elétrica proporcionada pelo gerador;
- Apresentar aplicação prática para o transdutor piezoelétrico desenvolvido.

1.2 CONTRIBUIÇÕES

Diferentes configurações geométricas para dispositivos de captação utilizando elementos piezoelétricos têm sido apresentados na literatura como meio de gerar energia elétrica a partir da vibração mecânica. A maioria, baseia-se em vigas ou placas contendo até dois elementos piezoelétricos, fixadas em estruturas sujeitas a movimentos vibratórios. Do ponto de vista prático, esses mecanismos têm desvantagens por apresentarem apenas uma região sujeita a níveis aproveitáveis de deformação mecânica, assim, quando é necessário elevar a geração de energia elétrica os dispositivos se tornam grandes e passam a ocupar um espaço considerável. Em alguns casos, os níveis de energia elétrica gerados são inferiores aos níveis exigidos por circuitos eletrônicos necessários para transferi-la até uma bateria, por exemplo. Por outro lado, o potencial de aplicação existe, principalmente para a alimentação de dispositivos portáteis e remotos de baixo consumo próximos a fontes de vibrações como motores, transformadores, autoestradas e ferrovias.

A contribuição do trabalho, que se mostrou mais evidente, comparada com o estado da arte foi a concepção do gerador com geometria diferente dos demais e a demonstração do resultado de geração de energia elétrica na alimentação de um circuito transmissor de rádio frequência comercial. De maneira secundária contribuiu demonstrando que a potência elétrica produzida com essa geometria de gerador piezoelétrico se enquadra dentro das potências produzidas pelos trabalhos mais recentes. O gerador proposto contribui também demonstrando que a densidade de potência em função do volume dos piezoelétricos é superior aos apresentados na literatura científica até o momento.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CAPTAÇÃO DE ENERGIA.

A energia renovável tem recebido crescente atenção nos últimos anos e a busca por fontes alternativas de energia continua em muitas frentes, em particular, estudos acerca do conceito de captação ou colheita de energia (*Energy Harvesting*), que já vem sendo utilizado tanto para aplicações em larga escala - como opção para minimizar a exploração de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, por trazerem grandes consequências ambientais, quanto para aplicações em microescala – buscando alimentar dispositivos eletrônicos de baixo consumo, pois, com a redução simultânea do tamanho e requisitos de energia para microeletrônica, é concebível que alguns circuitos poderiam ser diretamente alimentados com energia extraída a partir do ambiente no qual o circuito opera. (CHANG *et al.*, 2011, MACIAS, 2012, ALRASHDAN *et al.*, 2013).

Em OTIS (2005), trabalho que trata do desenvolvimento de tecnologias para redes de sensores sem fio (RSSF) de ultrabaixa potência, o autor enfatiza a curiosidade secular da humanidade em quantificar parâmetros ambientais (como a temperatura, por exemplo). Dentre os parâmetros requeridos atualmente incluem-se umidade, atividade sísmica, monitoramento de edifícios, fluxo de ar, detecção de partículas e muitos outros. Um sensor sem fio pode monitorar um ou mais destes parâmetros e transmiti-los para a avaliação humana, por exemplo. Na realidade, décadas de avanços tecnológicos tornaram possível construir e implantar redes formadas por vários nós sensores autônomos sem fio, coletando e disseminando amplas faixas de dados ambientais. Segundo os pesquisadores, para que a implantação de RSSF sejam bem-sucedidas e a tecnologia seja consolidada, exige-se ainda, progressos nas pesquisas de dispositivos de ultrabaixo consumo e, principalmente, no

aproveitamento da energia presente no ambiente para alimentação local e descentralizada dos nós sensores.

2.1.1 Algumas Fontes e Configurações para Captação de Energia

Até o momento, diversas fontes e formas para captação de energia têm sido estudadas e apresentadas como alternativas para a geração de energia em pequena escala, incluindo: eletromagnético (campo magnético) (TASHIRO *et al.*, 2011, MORAES, 2012), rádio frequência (ELANZEERY *et al.*, 2012), vento (QIU *et al.*, 2011), radiação solar KUMAR *et al.*, 2011, RAHMAN *et al.*, 2012), e fontes biológicas (MHETRE *et al.*, 2011, JIA *et al.* 2013), proporcionando diferentes níveis de energia, respectivamente.

Pesquisadores como TASHIRO *et al.* (2011), ZHAO *et al.* (2012) e HOSEONG *et al.* (2014), têm realizado estudos sobre a captação de energia por indução magnética de linhas de transmissão de energia elétrica a qual tem sido considerada como uma alternativa viável para alimentação de nós sensores. MORAIS (2013) propôs um sistema de captação por dispersão magnética em linha de potência de uma rede elétrica. Neste trabalho, utilizando-se de um captador (núcleo magnético) de ferrite, o sistema proposto foi capaz de fornecer uma potência máxima de até 315 mW com tensão de 5 Vcc para uma carga de 80 Ω com o uso de um retificador e um capacitor de filtro. Para cargas conectadas diretamente no terminal secundário do captador foi possível obter uma potência de até 564,5 mW com tensão 4,75 V_{RMS} para uma carga de 40 Ω . Resultados obtidos a partir da captação da dispersão magnética causada por uma corrente elétrica de 15 A na linha de potência. Este tipo de sistema tem como desvantagem, o fato de ter sua aplicação limitada a ambientes onde existam redes de energia elétrica.

A captação de energia por RF, também está entre os recentes métodos estudados para extração de pequenas quantidades de energia elétrica a partir de fontes já existentes no ambiente. ELANZEERY *et al.* (2012a) apresentaram um modelo para a colheita de energia de ondas de RF, o qual é direcionado a aplicações de *Radio Frequency Identification* (RFID), trabalhando numa faixa de 2,10 a 2,45 GHz. Em outro trabalho, ELANZEERY *et al.* (2012b) apresentaram um estudo baseado em simulações, trazendo informações do efeito de diferentes frequências de RF sobre a eficiência da potência de saída.

Em determinadas situações, onde a aplicação se encontra em lugares remotos e/ou ao ar livre, a captura de energia através da radiação solar ou do vento, tornam-se

alternativas atraentes para alimentação de nós sensores sem fio direcionados a monitoramento ambiental por exemplo. BORAGNO *et al.* (2012) apresentaram o estudo de um dispositivo captador de energia baseado em uma asa elasticamente engastada em um suporte fixo. Após a definição de alguns parâmetros, na presença do vento, o dispositivo passa a oscilar periodicamente em grande amplitude. Diferentes métodos podem ser considerados a fim de colher energia através da utilização deste sistema. Segundo os autores, o dispositivo gerou 720 μW em uma carga de 80 Ω com a velocidade do vento em 2,6 m/s.

HOWEY *et al.* (2011) desenvolveram uma turbina em miniatura com diâmetro externo de 3,2 cm, Figura 2.1, destinada a captação e conversão de energia eólica em elétrica. Segundo os autores o dispositivo pode gerar uma potência entre 80 μW e 2,5 mW com a velocidade do ar variando entre 3 e 7 m/s.

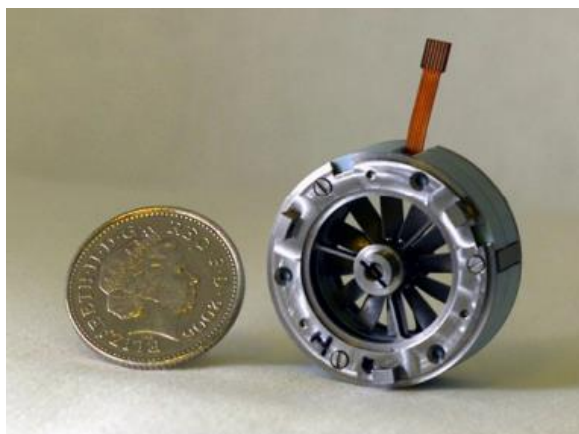


Figura 2.1 – Mini turbina eólica (HOWEY *et al.*, 2011).

QIU *et al.* (2011) desenvolveram um sistema de Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), que utiliza a energia eólica como fonte de captação de energia a partir de pequenas hélices acopladas a microturbinas, ilustrado na Figura 2.2, e ultra capacitor para armazenamento e alimentação do sistema, o qual, foi utilizado para vigilância do padrão de uso de condicionadores de ar e o monitoramento da temperatura externa em um edifício.

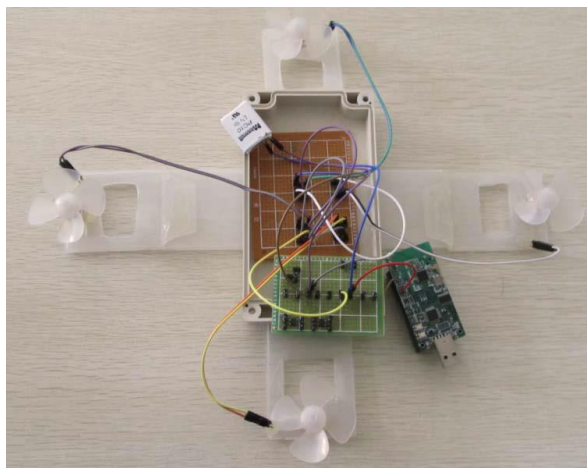


Figura 2.2 – Dispositivo de captação de energia eólica (QIU *et al.*, 2011).

Diversas implementações relacionadas à captação de energia solar têm sido verificadas por KUMAR *et al.* (2011) e RAHMAN *et al.* (2012). Uma forma, baseada em simulações, de dimensionar sistemas captadores de energia por radiação solar foi apresentado por BADER *et al.* (2010a) e em um outro trabalho, BADER *et al.* (2010b) abordaram a viabilidade de operação de nós de sensores sem fio, sem a utilização de baterias, em locais onde a quantidade de radiação solar é severamente limitada e as variações sazonais são grandes.

Mecanismos convencionais de colheita de energia eólica e solar ainda enfrentam problemas de eficiência e viabilidade quando se trata de pequenos geradores. Por exemplo, a eficiência das micro e nano células fotovoltaicas para captação de energia solar é muito baixa, mesmo se nano-componentes como nano-tubos de carbono são usadas para melhorar a sua sensibilidade (KAMAT, 2006). Além disso, em muitas das aplicações em microescala a luz solar não está disponível. Os mecanismos clássicos de coletar a energia cinética do vento ainda não são viáveis para micro-aerogeradores, devido às limitações tecnológicas (JORNET *et al.*, 2012).

Fontes biológicas como o corpo humano também tem sido alvo de pesquisas (JIA *et al.*, 2013), sendo consideradas fontes promissoras para atuação de pequenos transdutores de energia. MHETRE *et al.* (2011) abordaram algumas técnicas, existentes até então, de colheita de energia a partir de seres humanos para alimentação de dispositivos biomédicos implantáveis ou portáteis. Concluíram que as quantidades de energia extraídas do corpo humano são muito baixas (na ordem de poucos μW), e o grande desafio é aumentar a densidade de potência e melhorar os circuitos de gestão de energia. Além disso, mais

avanços são necessários para colher energia a partir de parâmetros biológicos como a temperatura corporal e a respiração, de modo que o dispositivo possa ser utilizado como um gerador de energia elétrica local.

De acordo com MITCHESON (2010), dispositivos de captação baseados no movimento e dispositivos termelétricos podem seguramente ser utilizados como fontes de alimentação hermeticamente fechadas para bio-sensores sem fio e portáteis. As densidades de potência de cerca de $300 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ e $20 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ são limites para transdutores de energia cinética e térmica respectivamente. Uma das principais barreiras para a obtenção de uma média mais elevada de densidade de potência de ambos os dispositivos, térmico ou cinético, a partir do corpo humano, é serem capazes de atingir características de adaptabilidade. Ou seja, um captador de energia cinética deve ser capaz de modificar sua frequência ressonante, a fim de operar na faixa máxima de densidade de potência mesmo sob mudanças entre caminhada e corrida por exemplo, e um dispositivo termoelétrico, idealmente, deve ser capaz de alterar a sua resistência térmica para operar com eficiência em cenários distintos. Essas características são difíceis de se conseguir em ambos, e é um campo ativo de pesquisa na área de colhedoras de energia.

Dentre várias, a captação de energia cinética sob a forma de vibração é a que possui o maior número de publicações e aplicações atualmente, se mantendo como uma tecnologia promissora para alimentação de dispositivos eletrônicos de baixo consumo.

Três possíveis mecanismos para converter vibração em energia elétrica são: transdutores eletromagnéticos, eletrostáticos e piezoelétricos (LUO *et al.*, 2010). O tipo de gerador mais eficaz depende, em certa medida, das condições de operação específicas.

Segundo LELAND *et al.*, (2005), os transdutores eletrostáticos necessitam de uma fonte de tensão separada (por exemplo, uma bateria) para iniciar o ciclo de conversão. Em transdutores eletromagnéticos a bobina é composta por um número de espiras limitadas para aplicações em microescala resultando em uma magnitude de tensão de saída muito baixa (< 1 volt) (MITCHESON *et al.*, 2008, KHALIGH *et al.*, 2010).

Para superar as limitações impostas por algumas técnicas e aumentar a eficiência de transdução, pesquisadores como HE *et al.* (2017), LI Z. *et al.* (2018) e TOYABUR *et al.*, (2018), têm se empenhado no desenvolvimento de sistemas híbridos de colheita de energia. DAYAL *et al.* (2012) apresentaram como estratégia para inicialização de sistemas eletromagnéticos de baixa tensão, a utilização de um mecanismo híbrido com piezoelétrico. A configuração *piezo-based* proporciona um sistema de captação de auto

partida e autossustentável, sem a necessidade de utilização de bateria para iniciar o processo. BEKER *et al.* (2011) também apresentam um captador de energia híbrido, que combina mecanismos de transdução eletromagnética e piezoelétrica para captar energia de vibração de um teclado de computador. A partir do modelo estudado, ilustrado na Figura 2.3, pôde ser obtido um total de $19,76 \mu\text{W}$, como consequência dessa integração.

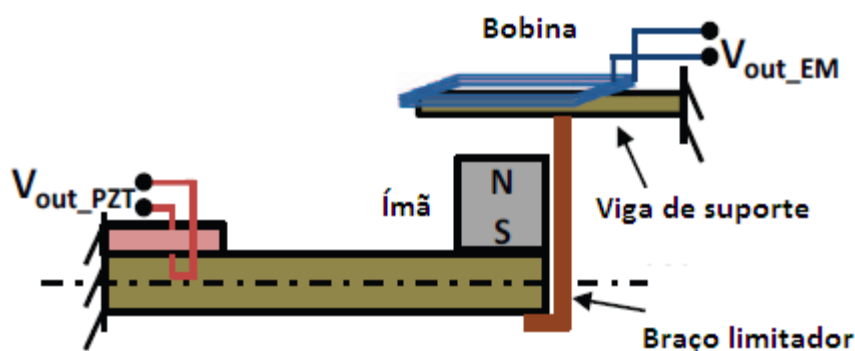


Figura 2.3 – Modelo de microgerador híbrido (BEKER *et al.*, 2011)

Ideias para gerar energia a partir de fontes ambientais estão em alta. Nos últimos anos, um vasto acervo de trabalhos acerca do conceito de colheita de energia tem sido publicado. Diversos são os materiais estudados e diferentes configurações mecânicas e elétricas são implementadas e testadas na busca da concepção de dispositivos de captação de energia eficientes e viáveis. Contudo, a quantidade de energia que pode ser gerada costuma ser sobre-estimada e os custos envolvidos subestimados. A potência insuficiente e a sensibilidade às variações ambientais são as principais barreiras que impedem que algumas tecnologias de colhedores de energia sejam amplamente adotadas na prática de engenharia (YANG *et al.*, 2018).

Nesse contexto, HU *et al.* (2010) e M'BOUNGUI *et al.* (2015) destacaram que os dispositivos de recuperação de energia que fazem uso dos materiais piezoelétricos, apresentam vantagens devido sua capacidade de converter diretamente uma tensão mecânica sofrida em energia elétrica além de uma relativa simplicidade de integração aos sistemas, fatos que contribuem para que esses transdutores possam ser utilizados como fontes de alimentação em aplicações que requeiram baixas quantidades de energia elétrica.

2.1.2 Captação de Energia Utilizando Materiais Piezoelétricos

Os materiais piezoelétricos têm propriedades que lhes permitem gerar energia elétrica (efeito direto) ou mecânica (efeito inverso), por alteração do seu estado mecânico ou elétrico respectivamente. Ou seja, o efeito direto corresponde à geração de energia elétrica como consequência da aplicação de uma força mecânica (estado de tensão), enquanto o efeito piezoelétrico inverso corresponde a uma alteração mecânica sempre que o material é submetido a uma carga elétrica (GONÇALVES, 2011, LUO *et al.*, 2010, TABESH *et al.*, 2010). Tais efeitos são explorados para o desenvolvimento de muitos produtos do dia a dia, como isqueiros, alto-falantes e transdutores de sinal. Segundo PI (2018), estes efeitos também despertam interesse dos desenvolvedores de tecnologias automotivas, pois, as válvulas de injeção piezo-controladas, utilizadas nos motores de combustão, reduzem e suavizam os tempos de transição e melhoram significativamente a eficiência da combustão, diminuindo o consumo de combustível e melhorando a qualidade dos gases de escape.

O efeito direto é a base para o funcionamento dos captadores piezoelétricos. Quando uma força externa é aplicada, uma parte do trabalho mecânico realizado é armazenado como energia de deformação elástica, e outra parte é associada ao campo elétrico induzido com a polarização do material (MITCHESON *et al.*, 2008). Se um caminho de condução é fornecido até uma carga externa, uma corrente resultante circulará pela mesma.

Diferentes formas e configurações dos dispositivos de captação, assim como diferentes tipos de elementos piezoelétricos, têm sido propostos pela literatura. O tipo de material piezoelétrico mais utilizado para converter vibrações mecânicas em energia elétrica é a cerâmica de titanato zirconato de chumbo (PZT), que, segundo PARES (2006), apresenta como principal característica alto coeficiente piezoelétrico. No entanto, por ser um material cerâmico, o PZT apresenta limitações às deformações. Além disso, quando submetidos a movimentos de alta frequência são susceptíveis a trincas por fadiga, podendo ser danificados. Como alternativa para aplicações onde o elemento piezoelétrico esteja exposto a grandes deformações e/ou altas frequências, pesquisadores têm utilizado elementos piezoelétricos poliméricos (ABDELKFI, 2012, EDDIAI, *et al.*, 2018), como o *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF), que traz como principal característica grande poder de flexão, mas, menor coeficiente piezoelétrico que o PZT.

As piezocerâmicas não são capazes de capturar muita energia mecânica se estiverem diretamente ligadas a uma fonte de vibração. A solução clássica é conectar um elemento piezelétrico a uma estrutura mecânica flexível. Quanto a geometria dessa estrutura, M'BOUNGUI *et al.* (2015), após terem realizado um amplo estudo da literatura sobre micro geradores de energia piezoelétrica, considerando que a fonte de energia a ser explorada seja a vibração, observaram que os dispositivos geradores baseados em estruturas de vigas em balanço ou *cantilever*, dominavam a maioria dos trabalhos. Segundo LI L. *et al.*, (2018), 89,54 % das pesquisas publicadas na área entre os anos de 2000 e 2016, baseiam-se nesse tipo de estrutura. Os autores informaram ainda, com base nos resultados dos trabalhos investigados, que conceber geradores a partir de vigas continua sendo a forma mais simples e eficiente para captar e converter energia mecânica em elétrica.

Na Figura 2.4 (a) é ilustrado uma configuração de *cantilever* em sua forma mais comum. Trata-se de uma viga metálica retangular onde uma de suas extremidades pode se encontrar fixa ou, em alguns casos, conectada a uma fonte de vibração, enquanto a outra extremidade permanece livre.

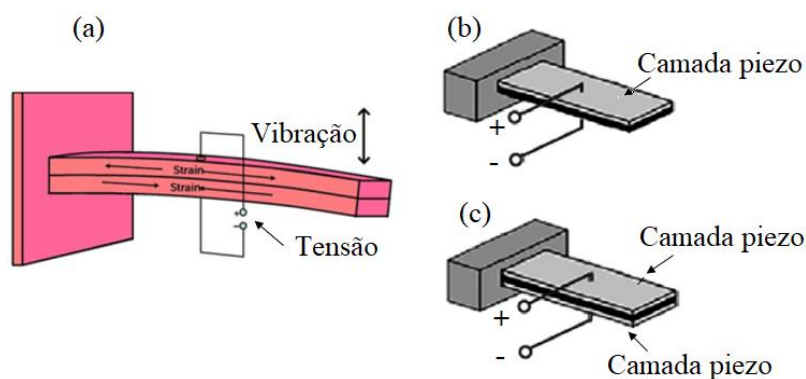


Figura 2.4 – Configuração básica para captação de energia piezoelétrica a partir de vigas em balanço (a); *unimorph* (b); *bimorph* (c) (RAMADASS *et al.*, 2010).

Também pode ser composta por uma fina camada piezoelétrica, conhecida como *piezoelectric unimorph*, Figura 2.4 (b), ou uma configuração designada como *bimorph cantilever beams*, Figura 2.4 (c) constituído por duas camadas de material piezoelétrico que possibilita o alcance de maiores níveis de energia de saída. Outra possibilidade, é a adição de uma massa presa à extremidade livre da viga com a finalidade de diminuir a frequência natural da estrutura para aplicações de baixa frequência de vibração, visto que,

a máxima capacidade de geração está vinculada com a frequência ressonante da estrutura a qual o elemento piezoelétrico está acoplado.

Os motivos que levaram a maioria dos pesquisadores a utilizarem configurações baseadas em vigas para conversores piezoelétricos, são vantagens como: a energia convertida está intimamente relacionada com a deformação média da viga, frequências naturais relativamente baixas, deformação média relativamente alta para uma dada entrada de força e um simples processo para fabricação de dispositivos de tamanho reduzido.

ILIK *et al.* (2018), desenvolveram um dispositivo multimodal baseado em oito micro-vigas em balanço dotadas de um filme fino de PDL-PZT, capaz de converter a vibração sonora do ambiente em energia elétrica para alimentação de uma cóclea artificial (dispositivo eletrônico que pode auxiliar deficientes auditivos a detectar sons). Cada uma das vigas ressoa em uma frequência específica, dentro da faixa acústica predeterminada (250–5000 Hz). Os autores informam que a tensão elétrica de 114 mVpp gerada a partir de uma pressão sonora de 110 dB a 1325 Hz, é suficiente para alimentação de um circuito de implante de cóclea.

CHA *et al.* (2016) investigaram a possibilidade de captar energia elétrica por meio do movimento de uma cauda de peixe, fazendo uso de compósitos piezoelétricos, e alimentar um módulo de comunicação sem fio utilizando-se dessa energia. A cauda, mostrada na Figura 2.5, projetada a partir de dados morfométricos de um tubarão, possui dimensões de 250 x 100 x 15 mm³. A mesma foi produzida a partir da injeção de silicone em um molde, onde, também foi inserida uma viga de aço no intuito de aumentar a rigidez do sistema. O movimento da cauda é proveniente de um servo motor controlado por um arduino.

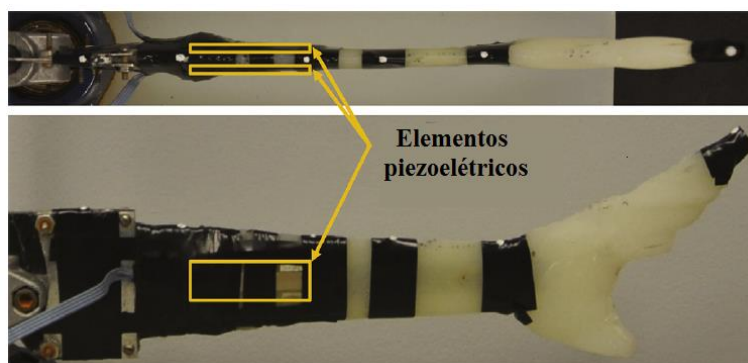


Figura 2.5 – Cauda artificial de peixe hospedando dois compósitos piezoelétricos (CHA *et al.*, 2016).

A energia elétrica gerada durante a ondulação da cauda foi inicialmente armazenada, e, após atingir um valor preestabelecido de tensão de saída (2,5 V), alimentou o módulo de comunicação. Para que a tensão de saída do módulo de armazenamento chegasse a 2.5 V, o sistema experimental permaneceu em execução durante 14,7 h com uma excitação de base de 0,085 rad em uma frequência de 1,6 Hz. Desse modo, o persistente movimento da cauda permitiu (por cerca de 3 segundos) a medição e a comunicação sem fio dos dados da temperatura utilizando apenas a energia elétrica convertida pelos piezoelétricos. Especificamente, a potência elétrica colhida durante o tempo de execução foi de aproximadamente 0,18 μ W. Segundo os autores, este teste preliminar oferece evidências convincentes para futuros avanços tecnológicos em sistemas autoalimentados aplicados ao monitoramento dos movimentos migratórios de peixes.

O desempenho dos dispositivos de captação de energia determina em quais aplicações específicas os geradores encontram-se adequados para atuar, quanto maior a quantidade de energia colhida e convertida, maior será o potencial de aplicação do gerador. Os parâmetros geométricos e as cargas a eles conectadas podem influenciar de forma significativa o desempenho da geração de energia elétrica.

ZHU *et al.* (2009a) desenvolveram um circuito piezoelétrico com o modelo de elementos finitos (CPC-FEM – *Coupled Piezoelectric-Circuit Finite Element Model*) para modelar um DHE (*Energy Harvesting Devices* – Dispositivo de Colheita de energia) piezoelétrico baseado em vibração que está diretamente ligado a uma resistência de carga. O CPC-FEM foi utilizado para prever saídas elétricas de corrente, tensão e potência do dispositivo de captação ligado a diferentes valores de resistência de carga, além dos valores de amplitude de deslocamento da ponta da viga e deslocamento da frequência ressonante nessas condições. Em outro trabalho, ZHU *et al.* (2009b) utilizaram o CPC-FEM para auxiliar na compreensão da influência dos parâmetros geométricos no desempenho elétrico de saída, necessária para concepção do PEHD (*Piezoelectric Energy Harvesting Device* – Dispositivo de Colheita de Energia Piezoelétrica) eficiente. Por fim, ZHU *et al.* (2010) apresentaram um estudo experimental sobre o desempenho de saída de energia elétrica do PEHD já, mostrado na Figura 2.6. Quando excitado com uma frequência de operação de 87 Hz e uma aceleração de 0,23 g, foram gerados os valores máximos de 370 μ W e 15,5 V respectivamente, conectado a uma carga de 325 k Ω . Analisando a Figura 2.6 temos: 1) PEHP formado por duas camadas piezoelétricas de 0,278 mm de espessura cada e uma

camada de metal de 0,102 mm de espessura. 2) Suporte de alumínio, 3) Acelerômetro e 4) *Shaker*.

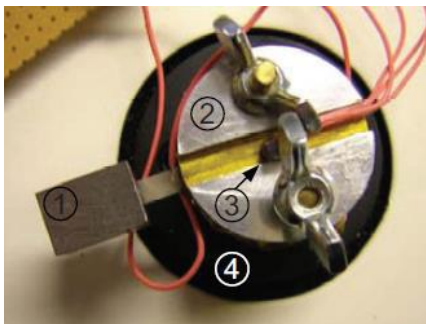


Figura 2.6 – Protótipo do PEHD fixado no *shaker* através do suporte de alumínio (ZHU *et al.*, 2009).

JANPHUANG *et al.* (2011) apresentaram as características e o desempenho de um captador de energia baseado na tecnologia de dispositivos MEMS a partir do impacto mecânico. A energia elétrica é gerada pelo impacto direto de uma engrenagem rotativa no transdutor piezoelétrico, como mostrado na Figura 2.7.

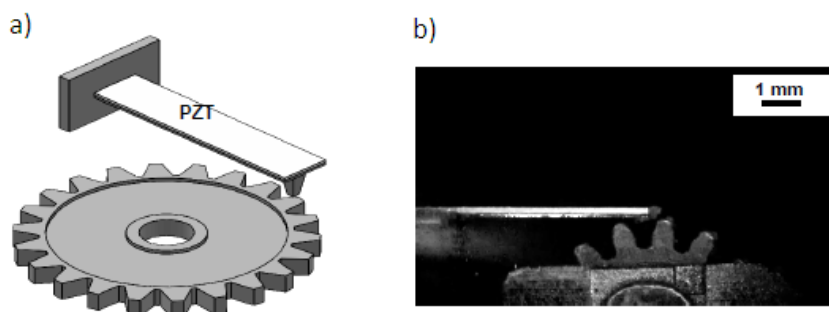


Figura 2.7 - a) Esquemático da captação de energia por impacto mecânico; b) Imagem do dispositivo de colheita montado sobre a caixa de engrenagens (JANPHUANG *et al.*, 2011).

O dispositivo MEMS piezoelétrico é constituído de uma película de PZT com 135 μm de espessura colado em uma viga de silício. A tensão gerada pelo impacto no transdutor de PZT foi avaliada analiticamente e experimentalmente e uma potência média de saída de 1,26 μW foi medida através de uma resistência de carga de 2,7 $\text{M}\Omega$, valores obtidos por um dispositivo colocado sobre a caixa de engrenagens com velocidade de 25

rpm. O nível de tensão poderia ser facilmente aumentado usando várias vigas na mesma caixa de engrenagens ou aumentando a velocidade de rotação.

SRIRAMDAS *et al.* (2015), apresentaram uma comparação de desempenho entre duas configurações de vigas multicamadas, mostradas na Figura 2.8. Cada gerador conte três camadas de PVDF - uniformes no dispositivo (a) e com os comprimentos diferentes no dispositivo (b). Os resultados experimentais mostraram que o dispositivo com multicamada variável gerou mais energia de que o com camadas uniformes, $8,59 \mu\text{W}$ e $4,53 \mu\text{W}$, respectivamente, quando submetidas a uma excitação de base de $0,5 \text{ g}$ a $33,5 \text{ Hz}$ e considerando uma carga resistiva de aproximadamente $1,3 \text{ M}\Omega$. Os autores informaram que o maior fator de acoplamento da esturra (b), proporcionado pela configuração de camadas variáveis, foi responsável pelo aumento de desempenho.

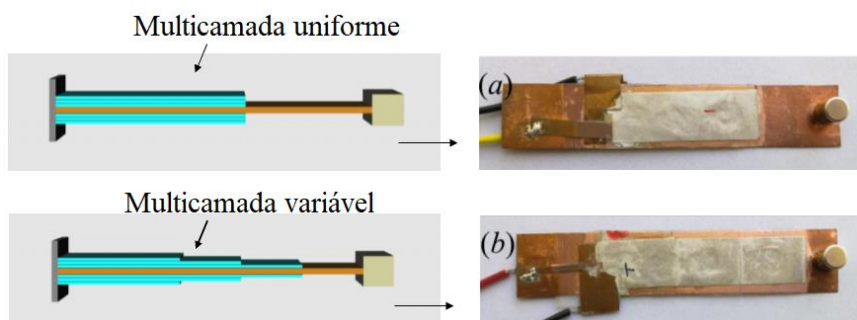


Figura 2.8 – Dispositivo construído com multicamada uniforme (a) e variável (b) (SRIRAMDAS *et al.*, 2015).

A utilização das configurações baseadas em vigas para captadores de energia envolve alguns inconvenientes no ponto de vista prático. A ocupação de um espaço considerável por sua massa de prova e a parte adicional de fixação, é um exemplo. Com base nessas observações, LEE *et al.* (2011) propuseram a utilização de adesivos piezoelétricos multimodais, Figura 2.9, aplicados diretamente na fonte de vibração. Um modelo numérico foi utilizado para auxiliar na otimização da topologia ou forma da película piezoelétrica para a geração de potência máxima de energia elétrica em múltiplos modos de vibração. Na etapa de fabricação, o material piezoelétrico foi segmentado pelas linhas de inflexão a partir dos múltiplos modos de vibração de interesse para minimizar o efeito de cancelamento de tensão. Como exemplo de aplicação, a película multimodal de PZT com área de $12,5 \times 10,5 \text{ cm}^2$ e uma espessura de $1,02 \text{ mm}$, foi colada na fuselagem de uma aeronave. A potência por unidade de aceleração de $1,836 \text{ mW/g}$ foi atingida no

primeiro modo de vibração (800 Hz) e 0,236 mW/g no segundo modo (1500 Hz), um acréscimo de 29% potência se comparado a utilização da película unimodal, em relação ao segundo modo.

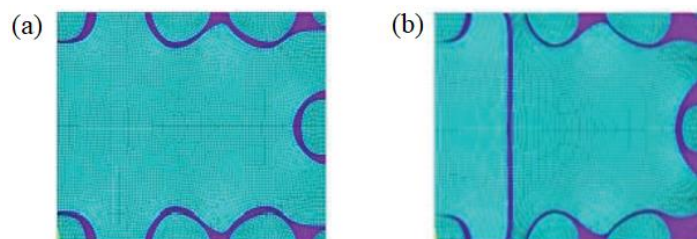


Figura 2.9 – Retirada de material piezoelétrico nas linhas de inflexão. (a) unimodal (primeiro modo); (b) multimodal (primeiro e segundo modo) (LEE *et al.* 2011).

YESNER *et al.* (2017) e YESNER *et al.* (2018), apresentam resultados de um transdutor piezoelétrico tipo ponte, Figura 2. 10 a e b, desenvolvido para coleta de energia em pavimentos transitados por veículos. Um total de 64 transdutores interligados em paralelo foram dispostos numa caixa de alumínio mostrada na Figura 2.10 c e d. A partir de uma carga de impacto, por meio de um pistão pneumático, simulando a passagem de um veículo, a potência de saída medida para um carregamento de 500 lb a 5 Hz, foi de 2,1 mW considerando uma carga resistiva de 330 k Ω . Segundo os autores, devido a linearidade apresentada entre a força de carga aplicada e a energia gerada, os transdutores incorporados têm a capacidade de serem utilizados para monitorar os níveis de tráfego e podem distinguir entre a carga de um veículo leve e um caminhão pesado.

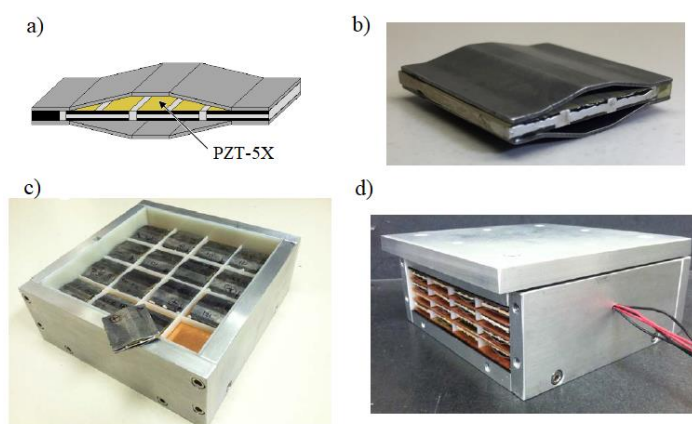


Figura 2. 10 – a) e b) – Transdutor de ponte. c) e d) – modulo de captação de energia contendo 64 transdutores conectados em paralelo (YESNER, 2018).

FENG *et al.* (2011) desenvolveram, a partir de uma proposta inovadora, um amortecedor de choques auto-gerador de energia, utilizado em veículos. O amortecedor é desenvolvido com um filme de PVDF na forma ondulada para captação de energia da vibração, como mostrado na Figura 2.11. Em comparação com a estrutura de filmes piezoelétricos planares simples, a película do polímero na forma ondulada pode ser mais eficiente para converter a energia do impacto no eixo em energia elétrica. O dispositivo à prova, gera uma tensão de saída de 8 V e uma corrente suficiente para acender um LED com base em um teste preliminar em estrada regular. ABDELKAREEM *et al.*, (2018) apresentam uma revisão detalhada de diversos sistemas de aproveitamento de energia das vibrações em suspensões automotivas.

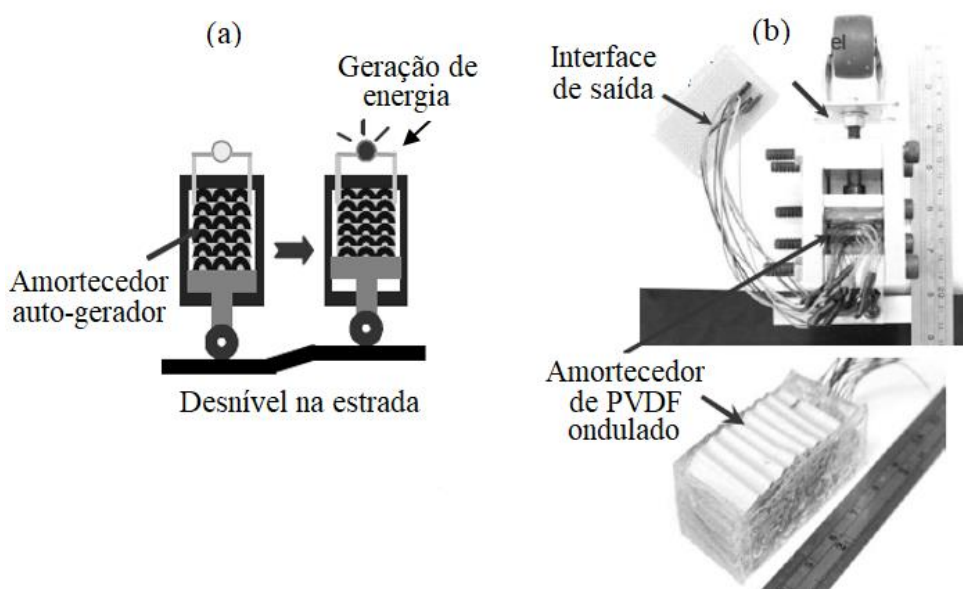


Figura 2.11 – a) Modelo de proposta do amortecedor de choques auto-gerador; b) Módulo de uma roda para simulação em estrada de teste (FENG *et al.*, 2011).

Considerando os meios biológicos como fontes promissoras para alimentação de dispositivos implantáveis, ZHANG *et al.* (2015) testaram um captador de energia de PVDF ($25 \times 56 \times 0,2 \text{ mm}^3$) envolta da aorta ascendente do coração de um porco, como mostrado na Figura 2.12. A tensão máxima de 1,5 V foi alcançada sob a frequência cardíaca de 120 batimentos por minuto e pressão arterial de 160/105 mmHg. O dispositivo implantado foi capaz de carregar 1,0 V em um capacitor de 1 mF em 40 s. A potência média estimada foi de 12,5 nW.

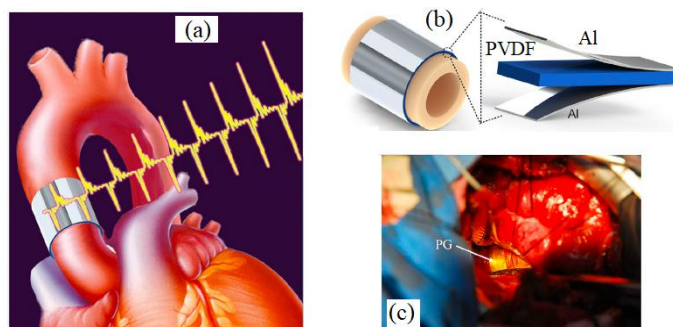


Figura 2.12 – Captador de energia a partir da deformação da parede arterial. Princípio de funcionamento (a); estrutura do gerador (b); implante (c) (ZHANG *et al.*, 2015).

Com a finalidade de captar energia a partir do caminhar das pessoas, pesquisadores têm desenvolvido dispositivos geradores que podem ser integrados a calçados (ROCHA *et al.*, 2010, HOWELLS *et al.*, 2009). DANIELS *et al.* (2013) utilizaram uma piezocerâmica ($52 \times 30 \times 4 \text{ mm}^3$) protegida por duas placas de aço, podendo suportar até 1 kN. O protótipo, mostrado na Figura 2.13, foi colocado sob uma bota e gerou uma potência média de 2,5 mW sob 760 N a 1,4 Hz, considerando uma carga resistiva maior que $2 \text{ M}\Omega$.

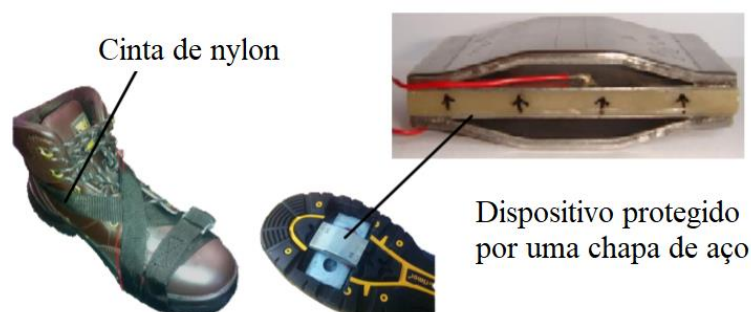


Figura 2.13 – Dispositivo gerador (DANIELS *et al.*, 2013).

Em JORNET *et al.* (2012) foi proposto o primeiro modelo de energia para nano sensores alto-alimentados com o objetivo final de analisar conjuntamente a captação de energia e os processos de consumo de energia. O modelo de nano gerador utilizado foi o proposto por WOOLARD *et al.* (2008), que tem seu funcionamento baseado na coleta de energia vibracional, explorando o efeito piezoelétrico de nano fios de óxido de zinco (ZnO). Quando os nano fios são dobrados ou comprimidos, uma corrente elétrica é gerada entre suas extremidades. Essa corrente é usada para carregar um capacitor. Quando os nano

fios são liberados, uma corrente elétrica no sentido oposto é gerada e usada para carregar o capacitor depois da retificação adequada. Os ciclos de compressão e liberação dos nano fios são criados por uma fonte de energia externa, a partir de vibrações do ambiente ou de ondas ultrassônicas geradas artificialmente por exemplo. XU *et al.* (2010) apresentaram uma configuração semelhante de nano gerador, mas baseado em um conjunto de nano fios de PZT, que produziu uma tensão de pico de saída de $\sim 0,7$ V, densidade de corrente de $4 \mu\text{A cm}^{-2}$ e uma densidade de potência média de $2,8 \text{ mW cm}^{-3}$.

Na Tabela 2.1 estão relacionados alguns captadores de energia baseados no efeito piezoelétrico.

Tabela 2.1 – Comparação entre captadores piezoelétricos de energia.

Ref.	Material	Excitação	Freq.	Dimensões do gerador (mm^3)	Dimensões do PZT ($\text{mm}^3 * n$)	Potência	Densidade de pot. (mW/cm^3)
Janphuang <i>et al.</i> (2011)	PZT-5A	Impacto	25 rpm	4,2	5 x 3 x 0,135	1,26 μW	6,2
Lee <i>et al.</i> (2011)	PZT	1 g	800 Hz	-	125 x 105 x 1,02	1,84 mW	0,137
Zhao <i>et al.</i> (2012)	PZT-51	1,48 g	73 Hz	59 x 6 x 1,3	13 x 2,5 x 1*2	8,7 μW	0,134
Daniels <i>et al.</i> (2013)	DL-53HD	Impacto (660 N)	1,4 Hz	-	52 x 30 x 4	2,5 mW	0,4
Kulkarni <i>et al.</i> (2014)	PZT-5A	1 g (torção)	620 Hz	-	5 x 5 x 0,5 *4	0,57 mW	11,4
Zhang <i>et al.</i> (2015)	PVDF	Pressão 160/105 mmHg	120 bpm	-	25 x 56 x 0,2	12,5 nW	44×10^{-6}
Sriramdas <i>et al.</i> (2015)	PVDF	0,5 g	30,8 Hz	-	108	8,59 μW	0,079
Cha <i>et al.</i> (2016)	MFC	0,085 rad	1,6 Hz	250 x 100 x 15	52 x 16 x 0,127 * 4	0,18 μW	425×10^{-6}
Eddiai <i>et al.</i> 2018	PVDF	Deslocamento (0,3 mm)	3 Hz	-	40 x 16 x 0,052	0,2 mW	6
Yesner <i>et al.</i> (2018)	PZT-5X	Impacto (500 lb)	5 Hz	-	32 x 32 x 0,2 * 64	2,1 mW	0,16

Os trabalhos publicados têm revelado que os geradores baseados em elementos piezoelétricos possuem maior densidade de energia e eficiência de conversão, melhor acoplamento eletromecânico e grande potencial de miniaturização com estruturas simples, facilitando sua integração com as tecnologias de sistemas MEMS e circuitos integrados (CI), quando comparado aos sistemas citados anteriormente.

Portanto, o foco deste trabalho foi o uso de cerâmicas piezoelétricas para produção de energia elétrica a partir da deformação das mesmas. Antes de uma exposição detalhada do desenvolvimento do sistema de captação proposto, deve ser apresentada uma

abordagem teórica sobre conceitos relacionados ao trabalho, destacando as teorias sobre a piezoeletricidade.

2.2 PIEZOELETRICIDADE

A piezoeletricidade, junção do termo grego *piezein* (apertar/pressionar) com eletricidade, trata-se do aparecimento de cargas elétricas positivas em um dos lados de certos cristais não condutores e cargas negativas no lado oposto quando esses são submetidos a uma tensão mecânica. Este efeito, conhecido como efeito piezoelétrico direto, é explorado em uma variedade de dispositivos práticos, tais como sensores em estruturas, microfones e instrumentos musicais para transformar as vibrações mecânicas em sinais elétricos correspondentes e, mais recentemente, no desenvolvimento de sistemas micro-geradores de energia elétrica.

A piezoeletricidade foi descoberta em 1880 por Pierre e Paul-Jacques Curie, que perceberam que quando comprimidos, determinados tipos de cristais naturais como o quartzo, a turmalina, a calcita e a piritita, ao longo de certos eixos, produziam uma diferença de potencial elétrico sobre suas superfícies. No ano seguinte, o efeito inverso foi matematicamente deduzido a partir dos princípios fundamentais da termodinâmica por Gabriel Lippmann. Os irmãos Curie imediatamente confirmaram a existência do efeito inverso, que é a capacidade de converter um potencial elétrico aplicado em deformação mecânica (YOUSEFI-KOMA, 2008). Assim, os materiais piezoelétricos exibem acoplamento entre múltiplos domínios físicos, como mostrado na Figura 2.14, o que os caracterizam como uma das classes de materiais inteligentes – *smart materials*.

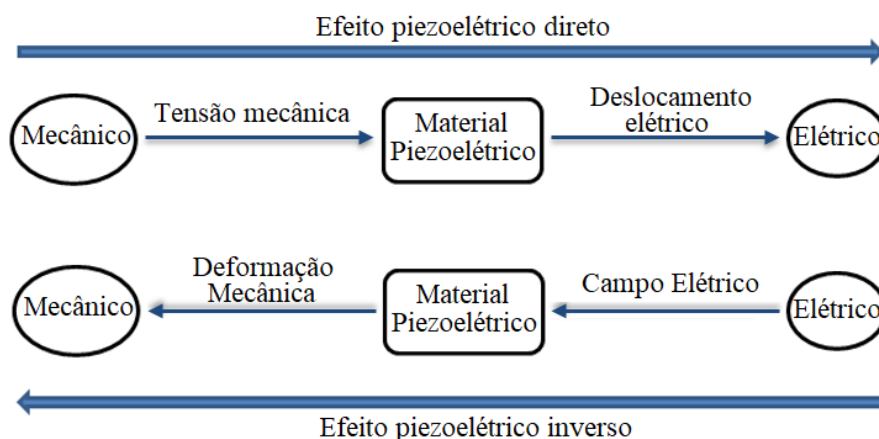


Figura 2.14 – Representação do acoplamento entre domínios físicos.

Tal característica, encontrada apenas em alguns tipos de materiais cristalinos - apresentado por 20 das 32 classes de cristal, segundo DATTA (2014), se deve ao fato de uma estrutura cristalina não centrossimétrica, como é caso do cristal da perovskita representado na Figura 2.15.

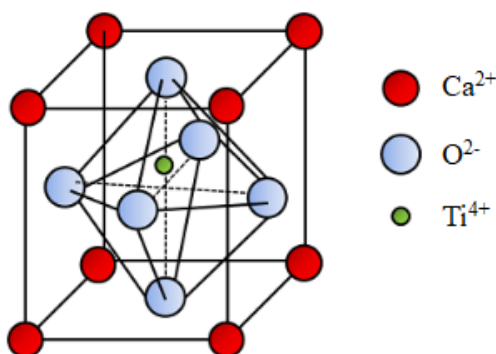


Figura 2.15 – Célula unitária de perovskita (DATTA, 2014).

Observa-se, na Figura 2.15, que o íon de titânio encontra-se ligeiramente deslocado do centro da estrutura cristalina, e, é esse o motivo que traz características especiais para este tipo de material, pois, a simetria não central faz com que a carga líquida em cada célula unitária do cristal não seja nula, passando a ter uma polaridade elétrica e fazendo com que cada célula se comporte como um dipolo elétrico. Uma vez que este cristal seja submetido a uma tensão mecânica, altera-se ainda mais a posição do íon de titânio, causando uma modificação na intensidade da polarização da célula, influenciando na diferença de potencial medida no material (efeito direto). Quando o cristal é submetido a um campo elétrico, também temos como resultado uma mudança relativa na posição do íon de titânio, levando à distorção da célula unitária e tornando-a mais (ou menos) tetragonal, ou seja, promovendo mudanças geométricas no material como um todo (efeito inverso).

Como informado (LEO, 2008), a descoberta do acoplamento eletromecânico destes cristais foi interessante, mas, infelizmente, não muito útil para a época, pois, a magnitude do sinal elétrico produzido durante a deformação mecânica, assim como a quantidade de deformação do material proveniente de uma entrada elétrica, eram muito pequenas. Outro motivo que limitou a utilização imediata do novo material foi a inexistência de uma instrumentação capaz de medir a saída elétrica e/ou mecânica do material, instrumentos estes que só ficaram disponíveis anos mais tarde.

O interesse na pesquisa e utilização dos materiais piezoelétricos cresceu durante a primeira guerra mundial, dando origem ao sonar, por exemplo. A segunda guerra estimulou ainda mais os estudos envolvendo os efeitos deste material e, conseqüentemente, os avanços em dispositivos baseados na piezoeletricidade, os quais proporcionaram não só melhorias no sonar, mas também, com o desenvolvimento da eletrônica, motivaram o uso destes materiais em osciladores e filtros eletrônicos. Logo foi visto a necessidade do desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos, mais eficientes, para suprir a demanda de aplicações que surgira. Com a descoberta da ferroeletricidade em 1921 por Valasek, os primeiros estudos de cristais ferroelétricos como o tartarato tetrahidratado de sódio e potássio, também conhecido como sal de Rochelle e o titanato de bário foram realizados. Por volta de 1947 foram observados os fenômenos da piezoeletricidade em cerâmicas ferroelétricas policristalinas de titanato de bário e niobato de chumbo. Após serem submetidas a um processo de polarização elétrica, percebeu-se que devido a maiores propriedades de acoplamento os efeitos piezoelétricos eram mais intensos dos que nos materiais monocristalinos naturais. Ou seja, as cerâmicas ferroelétricas exibiram maiores deslocamentos ou induziram maiores tensões elétricas, marcando o início da geração das piezocerâmicas, as quais, passaram a ser utilizadas em aplicações como os toca discos para o fonógrafo e em filtros cerâmicos para a rádio comunicação (CASIMIRO *et al.*, 2009).

Os primeiros estudos do titanato zirconato de chumbo (PZT), material utilizado neste trabalho, começaram a ser publicados a partir de 1954. A fabricação dos materiais piezoelétricos sintéticos, iniciasse, tipicamente, com os materiais constituintes em forma de pó. A cerâmica de PZT é um material com composição de chumbo (Pb) associada a uma composição variável de zircônio (Zr) e titânio (Ti), sendo uma solução sólida do zirconato de chumbo com o titanato de chumbo (PARES, 2006).

Materiais que exibem o fenômeno da ferroeletricidade apresentam naturalmente uma polarização espontânea abaixo da temperatura de Curie, onde seus domínios ferroelétricos (blocos ou regiões microscópicas em que o material é dividido) orientam-se em diferentes direções, de modo que a polarização líquida total de toda a amostra desaparece na situação de equilíbrio, Figura 2.17 (a). A cerâmica de PZT, por exemplo, tem seus domínios formados por células unitárias tetragonais distorcidas quando se encontram abaixo da temperatura Curie, como mostrada na Figura 2.16 (a). A célula unitária forma um dipolo elétrico devido à posição deslocada do íon de titânio ou zircônio e, dentro de um domínio, as células apresentam polarização e orientação na mesma direção

(PARES, 2006, SAKAMOTO, 2006,). Nesta situação, o material de PZT não apresenta nenhum comportamento piezoelétrico macroscópico devido a orientação aleatória entre os domínios. Devido à natureza ferroelétrica do material, é possível forçar a reorientação permanente e o alinhamento dos diferentes domínios por meio do processo de polarização, que consiste, em primeiro momento, no aquecimento do material acima da temperatura de Curie fazendo com que o estado das células unitárias do material passe a apresentar simetria cúbica, como ilustrado na figura 2.16 (b).

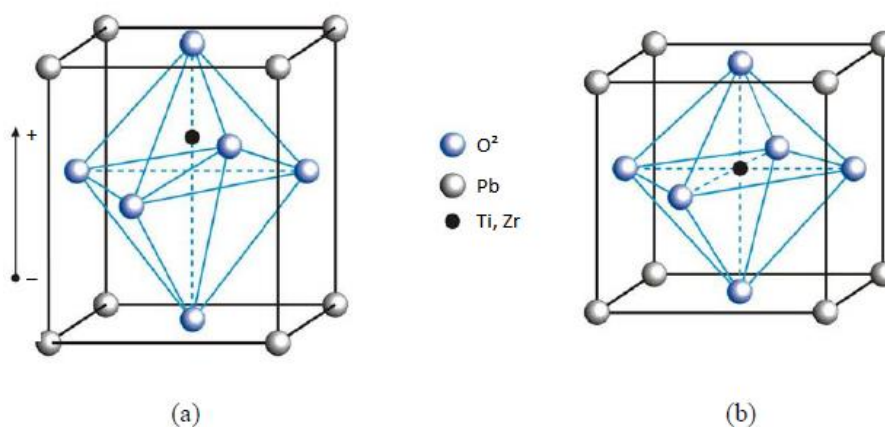


Figura 2.16 - Estrutura atômica do PZT. (a) Estado tetragonal distorcido; (b) Estado cúbico (SAKAMOTO, 2006)

Em um segundo momento, no material ainda aquecido, aplica-se um campo elétrico intenso (na ordem de kV/mm, de acordo com GODOY (2008). Tipicamente 2000 V/mm, segundo LEO (2008), fazendo com que as células unitárias se expandam (o material se expande na direção do campo e contrai no sentido transversal) e que os domínios se orientem no sentido do campo, como mostrado na Figura 2.17 (b). Após o resfriamento do material e a remoção do campo elétrico alguns domínios tendem a retornar ao estado anterior, entretanto, a maioria dos domínios permanecem polarizados no sentido do campo antes aplicado (polarização remanescente - P_r), como ilustrado na Figura 2.17 (c), garantindo ao PZT, agora polarizado, características piezoelétricas.

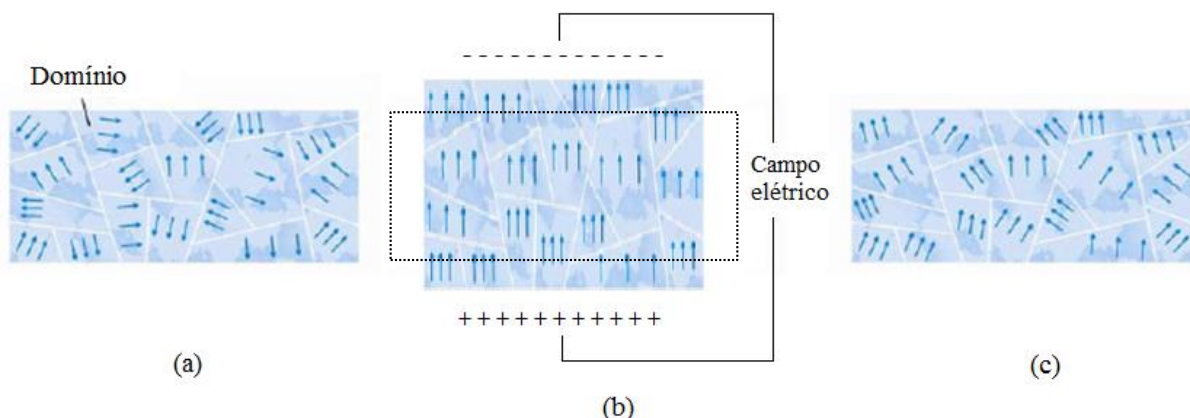


Figura 2.17 - Polarização de uma cerâmica ferroelétrica. (a) Material sem polarização; (b) aplicação de campo elétrico; (c) após a polarização (SAKAMOTO, 2006).

A característica distintiva dos materiais piezoelétricos com propriedades ferroelétricas é que a direção da polarização espontânea pode ser invertida, por meio da aplicação de um campo elétrico invertido, produzindo um *loop* de histerese, como mostrado na Figura 2.18. O campo elétrico (E) aplicado é elevado até que a polarização máxima (P_s) seja atingida. Reduzindo-se o campo a zero determina-se a polarização remanescente (P_r). A reversão do campo atinge polarização máxima negativa ($-P_s$) e polarização remanescente negativa ($-P_r$) e, reverter o campo restaura a polarização remanescente positiva. Quando o campo elétrico é igual ao campo coercitivo E_c , não há polarização líquida devido à compensação mútua da polarização de diferentes domínios. O valor máximo possível da polarização remanescente (P_r) é chamado de polarização de saturação (P_s), isto é, a parte horizontal da curva de histerese (DINEVA, 2014, PI, 2018).

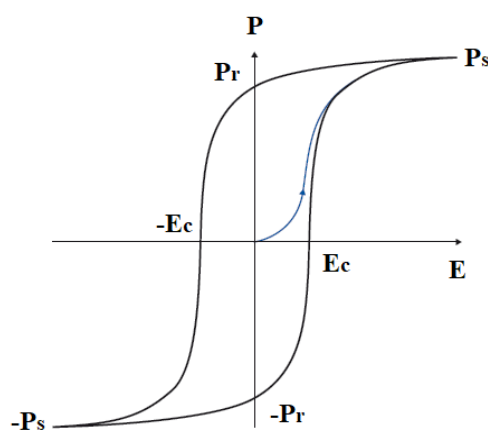


Figura 2.18 – Curva de histerese da polarização de uma cerâmica piezoelétrica (PI, 2018).

2.2.1 Piezoeletricidade Linear

A interação eletromecânica nos materiais piezoelétrico pode ser descrita de forma simplificada por suas equações constitutivas 3.1 e 3.2 considerando o material piezoelétrico linear. A primeira descreve o modo direto e a segunda descreve o modo inverso de conversão de energia, onde D (C/m²) é o vetor de deslocamento elétrico, d (C/N) coeficiente de deformação piezoelétrica, σ (N/m²) a tensão mecânica, ε (F/m) a permissividade dielétrica, E (V/m) o campo elétrico, S (m/m) a deformação mecânica e S (m²/N) a compliança elástica. Essas equações utilizam a notação matricial para representar o efeito piezoelétrico. As Equações 3.3, 3.4 e 3.5 representam as propriedades dielétricas, piezoelétricas e mecânicas para elementos piezoelétricos. Dependendo do material piezoelétrico essas matrizes são preenchidas de formas diferentes (LEO, 2008).

$$D = d\sigma + \varepsilon E \quad (3.1)$$

$$S = s\sigma + dE \quad (3.2)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$d = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Como explicito em SAKAMOTO (2006) a tensão mecânica (σ) trata-se de um tensor de segunda ordem, cuja dimensão é de força por unidade de área (N/m²). Pode-se demonstrar que, quando o meio está em equilíbrio de rotação, ou seja, com torque externo

nulo, o tensor é simétrico. Este tensor pode ser representado na forma matricial, como mostrado na equação (3.6).

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Como se trata de um tensor simétrico, a ordem da matriz pode ser reduzida por meio da notação de Voigt, onde se associam os índices $(11) \rightarrow 1$, $(22) \rightarrow 2$, $(33) \rightarrow 3$, $(23) \rightarrow 4$, $(13) \rightarrow 5$, $(12) \rightarrow 6$, tem-se que $\sigma_{11} = \sigma_1$, $\sigma_{22} = \sigma_2$, $\sigma_{33} = \sigma_3$, $\sigma_{23} = \sigma_4$, $\sigma_{13} = \sigma_5$, e $\sigma_{12} = \sigma_6$. Assim, pode-se reescrever a matriz de tensão mecânica $[\sigma]$ na notação matricial reduzida mostrada na equação (3.7).

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

A deformação mecânica S é uma medida do deslocamento relativo de partículas em um meio material; sendo assim, é uma grandeza adimensional (SAKAMOTO, 2006). O tensor deformação é similar em natureza ao tensor tensão, ambos são tensores simétricos de segunda ordem, portanto também pode ser representado na notação matricial reduzida, equação (3.8).

$$S = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

2.2.2 Elemento Piezoelétrico como Sensor ou Atuador

As cerâmicas ferroelétricas, além de apresentarem melhores propriedades piezoelétricas que os cristais depois de polarizadas, também oferecem a possibilidade de serem fabricadas com geometrias e dimensões flexíveis, permitindo a diversificação e expansão de aplicabilidades. Os efeitos piezoelétricos são explorados, principalmente, tanto no desenvolvimento de sensores quanto no de atuadores para aplicações diversas. Esse fato se deve ao alto poder de reversibilidade eletromecânica relacionada aos efeitos piezoelétricos direto e inverso.

Na Figura 2.19 (a) é ilustrado um elemento piezoelétrico e a sua respectiva direção de polarização. Quando uma tensão mecânica (σ) é aplicada no sentido contrário ao de polarização do elemento, causando-o, neste caso, uma deformação por compressão, induzirá deslocamento dos dipolos elétricos, gerando um campo elétrico que por sua vez produz uma tensão elétrica correspondente, com polarização invertida como mostrado na Figura 2.19 (b). Quando a tensão mecânica é aplicada no mesmo sentido da polarização do elemento, causando-o deformação por tração, uma tensão elétrica é gerada no mesmo sentido da polarização, Figura 2.19 (c). Como informado em SOUTO (2008) tal efeito (direto), possibilita a utilização de elementos piezoelétricos como sensores em estruturas, pois a amplitude e a frequência do sinal gerado são diretamente proporcionais à deformação mecânica sofrida pelo material piezoelétrico.

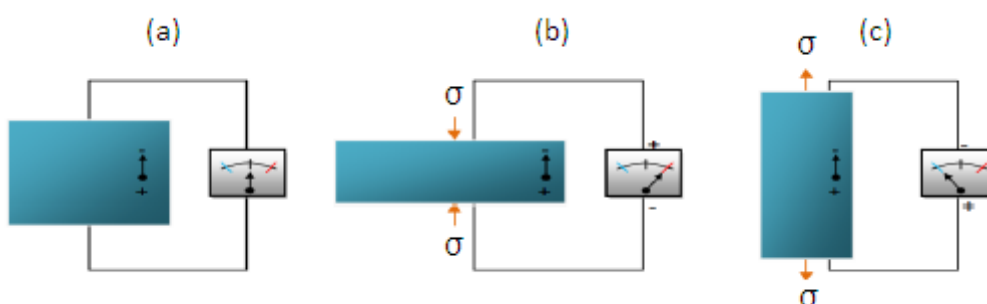


Figura 2.19 - Esquema representativo do efeito piezoelétrico direto
(CASIMIRO *et al.*, 2009).

Agora, analisando o efeito inverso, quando uma tensão elétrica é aplicada a um componente piezocerâmico sem restrições ou engaste, tem-se como resultado uma deformação geométrica. O movimento alcançado é uma função da polaridade da fonte, da

tensão elétrica aplicada e da direção de polarização do componente. A aplicação de uma tensão alternada produz uma oscilação, isto é, uma alteração periódica da geometria, por exemplo, o aumento ou redução do diâmetro de um disco. Se o corpo estiver preso, isto é, a deformação livre restringida, é gerada uma tensão mecânica ou força. Este efeito, possibilita a utilização de elementos piezoelétricos como atuadores.

O efeito inverso pode ser observado fazendo uso da equação (3.2) em sua forma matricial, sendo útil para relacionar a deformação mecânica S , com o campo elétrico, E . Assim como em XIAOJIN *et al.* (2010) e LEE *et al.* (2009), tendo como exemplo o PZT, as matrizes $[d]$ e $[S]$ assumem as configurações relacionadas na equação (3.9).

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Se tratando do efeito inverso e assumindo a inexistência de qualquer valor de tensão mecânica sob o elemento piezoelétrico, ou seja, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

A partir da equação (3.10) pode ser analisado o comportamento mecânico do elemento piezoelétrico com relação as direções de aplicação de tensão elétrica. Em SOUTO (2008) é apresentado um modelo de uma placa piezoelétrica retangular destacando as direções de deformações mecânicas e de polarização elétrica. Convencionalmente foram adotados para representar as direções de deformação e de aplicação de tensão elétrica os índices 1-1 para o comprimento, 2-2 para a largura e 3-3 para espessura da placa piezoelétrica como mostrado na Figura 2.20.

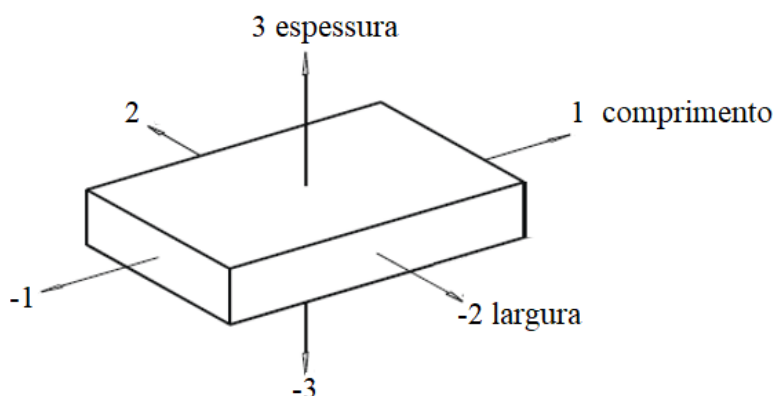


Figura 2.20 - Direções de deformação e de polarização de uma placa piezoelétrica (SOUTO, 2008).

Partindo dessas informações, pode ser visto na Figura 2.21 o comportamento das deformações de uma piezocerâmica em relação a aplicação de um campo elétrico paralelo ao eixo de polarização do elemento (eixo 3) assim, tem-se que $E_1 = E_2 = 0$ e E_3 é não nulo. Nessas condições, deduz-se da equação (3.10):

$$S_1 = d_{31}E_3 \quad (3.11)$$

$$S_2 = d_{31}E_3 \quad (3.12)$$

$$S_3 = d_{33}E_3 \quad (3.13)$$

$$S_4 = S_5 = S_6 = 0 \quad (3.14)$$

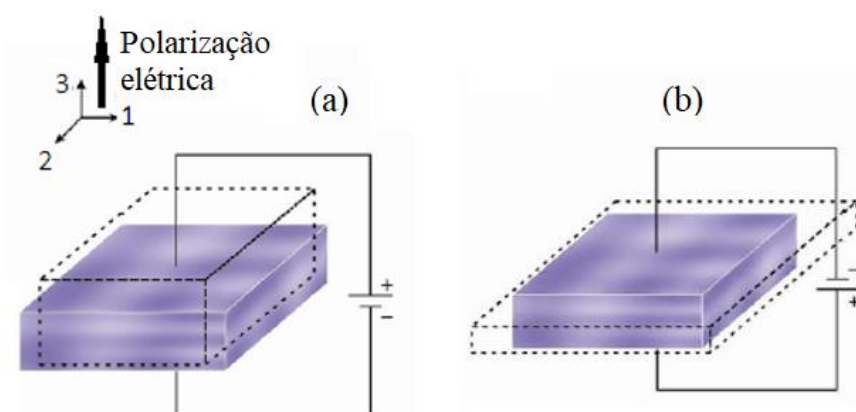


Figura 2.21 - Piezocerâmica polarizada. (a) Campo elétrico com sentido oposto à polarização elétrica; (b) Campo elétrico com o mesmo sentido da polarização elétrica (SAKAMOTO, 2006).

Observando as tabelas de dados referentes às piezocerâmicas de PZT e as informações contidas na literatura existente, tem-se que os valores da constante de carga piezoelétrica d_{31} variam em um intervalo de valores negativos enquanto os da constante d_{33} em valores positivos. Assim, quando é aplicado um campo elétrico na direção da polarização do elemento, as equações (3.11) e (3.12) assumem valores negativos indicando deformação por contração nas direções 1 e 2 respectivamente, ao mesmo instante a equação (3.13) indica um alongamento na direção 3 como ilustrado na Figura 2.21 (a). No momento que se muda o sentido do campo elétrico a situação se inverte, ou seja, ocorrerá um alongamento nas direções 1 e 2, e uma contração na direção 3, como mostrado na Figura 2.21 (b). Esta correspondente mudança da forma do material quando uma certa tensão elétrica é aplicada em algumas de suas superfícies, possibilita a utilização dos materiais piezoelétricos como atuadores em estruturas.

2.2.3 Modos de operação de um transdutor piezoelétrico

Além das análises paramétricas utilizadas para melhorar a configuração e a eficiência na colheita de energia piezoelétrica, o coeficiente de acoplamento eletromecânico (k) do material também responde por forte influência na quantidade de energia elétrica convertida, sendo referente à quantidade de energia elétrica produzida quando comparada à tensão mecânica aplicada ou vice e versa. É uma representação quantitativa do efeito piezoelétrico. Existem dois modos práticos de operação para os transdutores piezoelétricos, o modo 31 e o modo 33, como ilustrado na Figura 2.22. Cada um dos modos possui um coeficiente de acoplamento eletromecânico distinto.

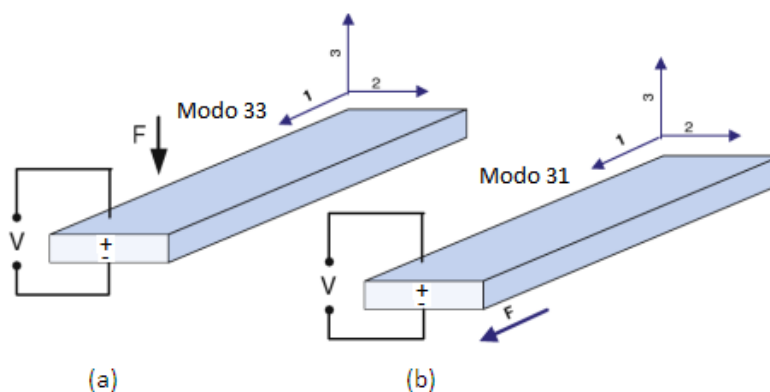


Figura 2.22 – Modos de operação de um elemento piezoelétrico. (a) modo 33; (b) modo 31 (PRIYA e INMAN, 2009)

O modo 33 é definido por uma força aplicada na mesma direção da polarização do elemento piezoelétrico, Figura 2.22 (a). No modo 31 a força é aplicada na direção perpendicular à direção de polarização do elemento, Figura 2.22 (b). Convencionalmente, o modo 31 tem sido o modo de acoplamento mais utilizado devido a maior simplicidade de aplicação, no entanto, produz um coeficiente de acoplamento menor do que o modo 33.

Ao analisarem três diferentes tipos de materiais piezoelétricos (PZT, PVDF e o PZN-PT), BAKER *et al* (2005) observaram que o modo de acoplamento 33 tem o coeficiente de acoplamento, k , mais elevado do que o modo 31 para os três materiais. Em se tratando do PZT, o modo 33 apresentou uma eficiência quase três vezes maior que no modo 31. Entretanto, ao comparar uma pilha de piezoelementos operando no modo 33 com uma fina camada piezoelétrica em um *cantilever* operando no modo 31, ambas as configurações com o mesmo volume, observou-se que, embora a pilha fosse mais robusta e possuisse um coeficiente de acoplamento superior, o *cantilever* produziu uma magnitude de potência duas vezes mais elevada que a pilha quando submetido a mesma quantidade de força. O motivo é a elevada rigidez mecânica da configuração em pilha exigindo um maior esforço para que haja alguma deformação no material. Concluiu-se que, em um ambiente que ofereça um certo nível de vibração com pequenas forças envolvidas, a viga em balanço operando no modo 31 provou ser mais eficiente, mas num ambiente que envolve alta força, como uma fábrica que possui grandes máquinas em operação, uma configuração de pilha seria mais durável e geraria mais energia útil.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 SELEÇÃO DO MATERIAL PIEZOELÉTRICO

No intuito de melhorar a eficiência na captação e aumentar a energia elétrica gerada, além da configuração geométrica do gerador, diferentes materiais piezoelétricos têm sido desenvolvidos e comparados (BADEL *et al.*, 2006, RAKBAMRUNG *et al.*, 2010, MARTÍNEZ *et al.*, 2015, PI, 2018).

A maximização da potência de saída desses microgeradores pode ser obtida utilizando-se piezomateriais com alto coeficiente de acoplamento, ao longo do eixo 3–1 (modo de flexão), por exemplo. Baseado nisso, um grande esforço foi feito nos últimos anos no estudo de monocristais piezoelétricos com elevadas propriedades piezoelétricas. No entanto, de acordo com RAKBAMRUNG *et al.* (2010), a concepção de tais materiais é tão complexa e dispendiosa que nenhum processo, a nível industrial, existe até o momento. Diante disso, os materiais que têm despertado maior interesse da indústria e dos pesquisadores, por terem apresentado relativa simplicidade e viabilidade no processo de fabricação, são as piezocerâmicas policristalinas. Dentre elas, a cerâmica de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) tem sido amplamente utilizada no desenvolvimento de sensores e atuadores, incluindo dispositivos de captação de energia. O titanato de chumbo (PbTiO_3) e o zirconato de chumbo (PbZrO_3), formam a composição básica do material. Variações nesta mistura, pode ser uma forma de controle das constantes dielétricas, elásticas e outras propriedades (FUJI, 2018). Além disso, dopagens especiais com íons de, por exemplo, Ni, Bi, Sb, Mn e Nb possibilitam otimizar, especificamente, os parâmetros piezoelétricos e dielétricos do PZT (PARES, 2006, PI, 2018).

Diante do exposto, optou-se por utilizar uma cerâmica de PZT como elemento gerador. Após avaliar as propriedades piezoelétricas de alguns materiais existentes no mercado, três foram pré-selecionadas para testes experimentais: o PZT C-64, produzido pela empresa Japonesa *Fuji Ceramics Corporation*, e os PZTs PIC255 e o PIC181, produzidos pela empresa alemã *PI Ceramic GmbH*. Os parâmetros piezoelétricos de cada material encontram-se listados na Tabela 3.1. Estes dados são provenientes da ficha técnica disponibilizada pelos fabricantes das piezocerâmicas.

Tabela 3.1 – Propriedades dos materiais piezoelétricos em estudo.

PZT			C-64	PIC255	PIC181
Fabricante			<i>Fuji Ceramics</i>	<i>PI Ceramic</i>	
Grupo			<i>Soft</i>	<i>Soft</i>	<i>Hard</i>
Fator de acoplamento eletromecânico		K_{31}	0,35	0,35	0,32
		K_{33}	0,73	0,69	0,66
Constantes dielétricas		$\varepsilon_{11}^T/\varepsilon_0$	1960	1650	1500
		$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	1850	1750	1200
Constantes de carga piezoelétricas	x10 ⁻¹² m/V (C/N)	d_{31}	-185	-180	-120
		d_{33}	435	400	265
		d_{15}	670	550	475
Módulo de Young	x10 ¹⁰ N/m ²	$Y_{11}^E=1/S_{11}^E$	5,9	6,2	8,5
		$Y_{33}^E=1/S_{33}^E$	5,1	4,8	7,1
Coeficiente de Poisson			0,34	0,34	0,34
Densidade	g/cm ³	ρ	7,7	7,8	7,8
Fator de qualidade mecânica		Q_m	80	80	2000

Para atender as diversas aplicações que surgira, o mercado especializado disponibiliza uma ampla variação de materiais piezoelétricos cerâmicos baseados em PZT. Internacionalmente, as piezocerâmicas são divididas em dois grupos: *Soft* e *Hard*. Tais denominações referem-se à mobilidade dos dipolos ou domínios e, portanto, também ao comportamento de polarização/despolarização do PZT.

As cerâmicas piezo *soft* são caracterizadas por uma mobilidade de domínio comparativamente alta e por um comportamento ferroelétrico resultante ‘macio’, ou seja, polarização relativamente fácil. Um PZT desse grupo, traz como vantagens grandes coeficientes de carga piezoelétrica, permissividades moderadas e altos fatores de acoplamento. Em contraste, o PZT *hard*, mesmo quando submetido a altas tensões

mecânicas e/ou elétricas, permanece com suas propriedades estáveis, apresentando poucas mudanças, o que o destina a aplicações de altas potências. As piezocerâmicas deste grupo possuem permissividade moderada, alto fator de acoplamento piezoelétrico e ótima estabilidade sob altas cargas mecânicas.

3.1.1 Teste Experimental

Objetivando comparar a quantidade de energia elétrica gerada por cada PZT, foram montadas três estruturas simples de vigas em balanço, monoengastadas e geometricamente idênticas, sobre as quais, foram colados os elementos piezoelétricos, como mostrado na Figura 3.1 (a). Cada viga tem $60 \times 12,72 \times 0,15 \text{ mm}^3$ e cada um dos PZTs mede $10 \times 12,72 \times 0,2 \text{ mm}^3$. As estruturas foram avaliadas sob as mesmas condições de frequência e amplitude de vibração, fornecidas pelo excitador eletromagnético - mini shaker type 4810 da *Labworks Inc.* como mostrado na Figura 3.1 (b). Na parte superior do shaker foi acoplada uma estrutura (base) que permite o engaste das vigas e sobre a base um acelerômetro modelo 4507 da *Brüel & Kjaer*, responsável por captar o sinal de vibração.

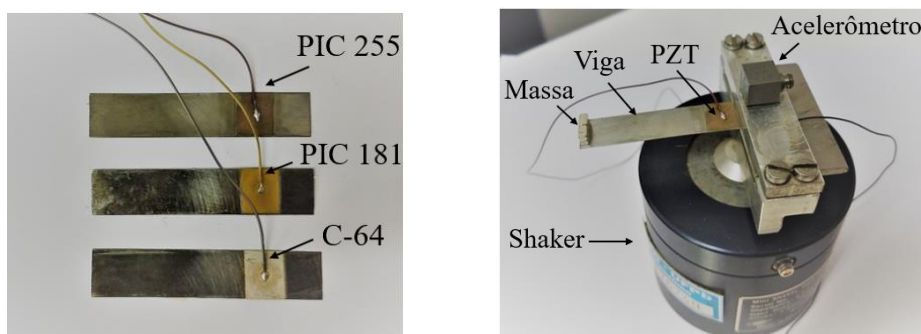


Figura 3.1 – Vigas com os PZTs acoplados (a). Estrutura de teste montada (b).

3.2 MODELAGEM NUMÉRICA

A construção de modelos e simulações é uma estratégia de fundamental importância na fase inicial da pesquisa científica. Os modelos numéricos confiáveis fornecem informações importantes para construção de protótipos experimentais reduzindo os problemas existentes do método da tentativa e erro (SOUTO, 2008), pois permitem que os ajustes geométricos dos dispositivos sejam feitos e testados virtualmente. Pesquisadores como, ZHU *et al.* (2009), KOYAMA *et al.* (2008), TANG *et al.* (2010), AMINI *et al.*

(2015) e muitos outros, que têm publicado trabalhos com ênfase no desenvolvimento de dispositivos captadores de energia por meios piezoelétricos, fazem uso de modelos numéricos para obterem como resultado de simulações, informações acerca dos efeitos da geometria sobre a saída de potência elétrica dos geradores. Ao estudar esses resultados, estratégias de configurações físicas que permitam uma maior geração de energia elétrica são obtidas e uma compreensão física de como cada parâmetro geométrico afeta a energia gerada é obtida. Sendo assim, a modelagem de um sistema gerador não serve apenas para determinar a quantidade de potência de saída, mas também permite o aperfeiçoamento geométrico de um determinado sistema.

3.2.1 Desenvolvimento das Simulações via *Software*

Os modelos numéricos desenvolvidos neste trabalho para as simulações computacionais do gerador piezoelétrico são baseadas no método de elementos finitos (MEF). Trata-se de um método de transformação e aproximação de um problema representado através de integrais, por uma combinação linear de funções específicas, onde os coeficientes são integrais solucionadas em elementos discretos (elementos finitos) nos quais o domínio de interesse original é dividido. Essa divisão implica que o comportamento de todo o domínio seja completamente determinado pela composição dos comportamentos unitários de cada elemento finito. Normalmente os problemas são apresentados sob formulação diferencial (derivadas parciais) e a formulação integral é obtida através de funções definidas num espaço de testes apropriado, ou pela formulação variacional (BUTTON, 1997).

Como informado por NAKASONE (2006), existem diferentes tipos de elementos para diferentes tipos de fenômenos, e por isso, um grande cuidado deve ser tomado na escolha de um elemento que contenha em sua formulação um modelo matemático correspondente ao fenômeno físico a ser modelado. O pacote de elementos finitos ANSYS, possui uma vasta biblioteca de elementos para simulação dos mais diversos tipos de sistemas. Os elementos que vêm sendo utilizados neste trabalho para a simulação do gerador, são: o SHELL 93 para as vigas, o SOLID 45 para as massas e o SOLID 226 para os elementos piezoelétricos.

O par de vigas utilizadas no gerador piezoelétrico têm, apenas, 0,15 mm de espessura, assim, o elemento de casca SHELL 93 foi escolhido dentre vários que o ANSYS

dispõe por ser adequado para análises de estruturas de pequena espessura. Esse elemento finito contém 8 nós e 6 graus de liberdade em cada nó, ou seja, translação e rotação em x , y , e z , e é recomendado para aplicação estrutural. Suas formas de deformação são quadráticas em todos os sentidos dos planos. Possui plasticidade, *stress stiffening*, aplica-se a grandes deslocamentos e possui capacidade para aplicações de grandes tensões (ANSYS 11, 2006). A geometria, as localizações dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento são mostradas na Figura 3.2.

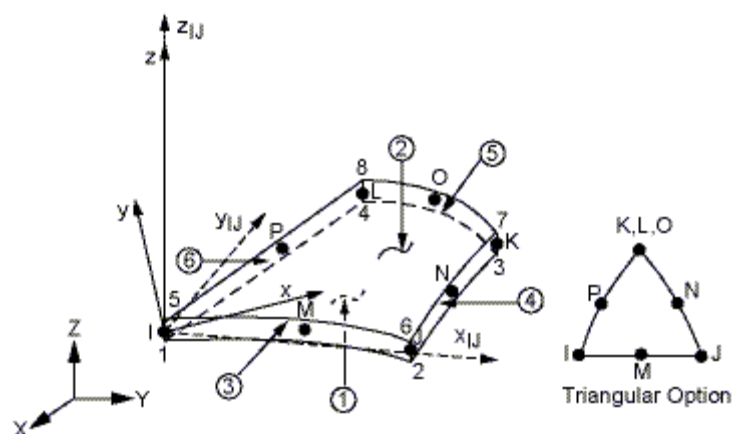


Figura 3.2 – Elemento de casca SHELL 93 para simulação das vigas (ANSYS 11, 2006)

Foi utilizado para a simulação das massas de aço um elemento tridimensional indicado para modelos de estruturas sólidas, o SOLID 45. Esse elemento é definido por 8 nós com 3 graus de liberdade por nó: translação nodal nas direções x , y e z . Possui plasticidade, fluência, *stress stiffening*, grande deflexão e capacidade de grande deformação (ANSYS 14, 2011). A geometria, as localizações dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento são mostradas na Figura 3.3.

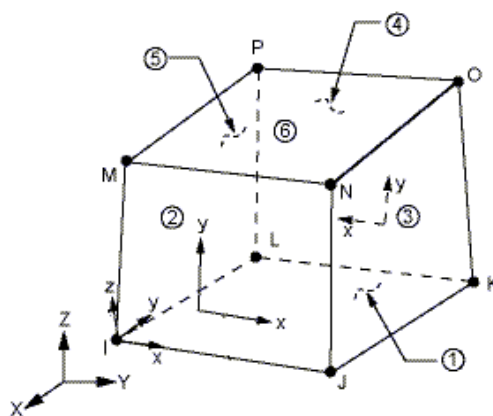


Figura 3.3 – Elemento sólido SOLID 45 para simulação das massas (ANSYS 14, 2011).

As características mecânicas utilizadas no desenvolvimento do modelo numérico do conjunto viga-massa são mostradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Características mecânicas das vigas e das massas de aço no modelo.

Vigas e Massas	Módulo de elasticidade (E)	200 GPa
	Coefficiente de Poisson (ν)	0,3
	Densidade de Massa (ρ)	7850 Kg/m ³

O elemento SOLID 226 foi utilizado para a simulação dos elementos piezoelétricos, o mesmo possui vinte nós com até cinco graus de liberdade por nó. As capacidades estruturais incluem elasticidade, plasticidade, viscoelasticidade, viscoplasticidade, fluência, grande esforço e grande deflexão. Além das capacidades elétricas e piezoelétricas (ANSYS 14, 2011). A geometria, as localizações dos nós e o sistema de coordenadas para este elemento são mostradas na Figura 3.4.

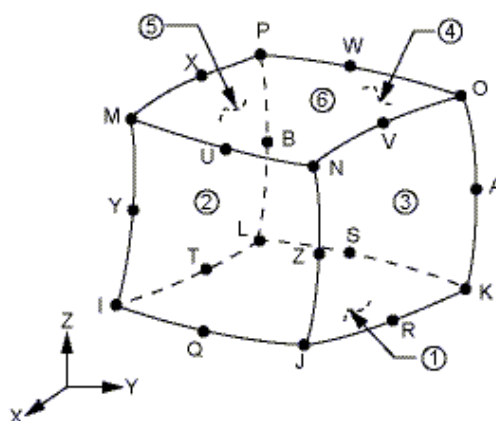


Figura 3.4 – Sólido SOLID226 para simulação do piezoelétrico (ANSYS 14, 2011).

As simulações desenvolvidas são baseadas na modelagem numérica que relaciona as interações eletromecânicas da estrutura e dos PZTs. O modelo requer uma matriz de constantes dielétricas (Equação 3.1) que expressa a relação de força por comprimento linear do material piezoelétrico. Nesse caso foram admitidas as constantes relativas (ϵ/ϵ_0). Uma matriz piezoelétrica (Equação 3.2) que expressa a relação de carga elétrica com a força aplicada (d). Nesse caso, cada elemento da matriz é responsável por uma direção de deslocamento do elemento piezoelétrico. E a matriz de coeficientes elásticos (Equação 3.3) que relaciona os parâmetros elásticos do material piezoelétrico, ou seja, módulo de

elasticidade, coeficiente de Poisson e coeficiente de cisalhamento. Nas equações, ε_{xx} representa as constantes dielétricas, d_{xx} representa as propriedades piezoelétricas, ν é o coeficiente de Poisson e Y_x^E representam o módulo de elasticidade (índice $x=1$) e cisalhamento (índice $x=3$) (WANG *et al.*, 2010, XIAOJIN *et al.*, 2010, SOUTO, 2008).

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}/\varepsilon_0 & 0 & 0 \\ & \varepsilon_{11}/\varepsilon_0 & 0 \\ Sim & & \varepsilon_{11}/\varepsilon_0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (C/N) \quad (4.2)$$

$$S = \begin{bmatrix} 1/Y_1^E & -\nu/Y_1^E & -\nu/Y_1^E & 0 & 0 & 0 \\ & 1/Y_1^E & -\nu/Y_1^E & 0 & 0 & 0 \\ & & 1/Y_1^E & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1/Y_3^E & 0 & 0 \\ Sim & & & & 1/Y_3^E & 0 \\ & & & & & 1/Y_3^E \end{bmatrix} (N/m^2) \quad (4.3)$$

Os parâmetros piezoelétricos utilizados no desenvolvimento do modelo numérico e no preenchimento das equações acima citadas encontram-se listados na Tabela 3.1. Os modelos numéricos construídos para as simulações do captador piezoelétrico têm em comum os parâmetros piezoelétricos, listados na Tabela 3.1, utilizados no preenchimento das equações, e geometria com a malha de elementos finitos ilustrada na Figura 3.5.

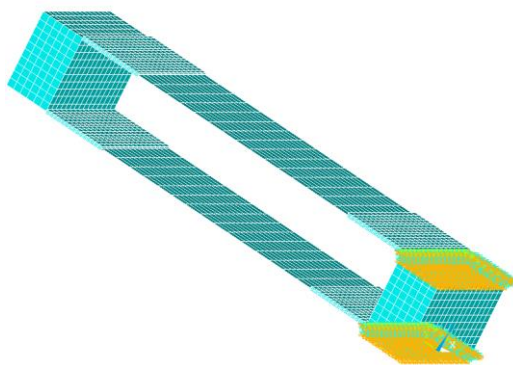


Figura 3.5 – Forma geométrica e malha de elementos finitos do gerador em desenvolvimento.

A malha é o processo no qual a geometria é discretizada em elementos e nós. Essa malha, juntamente com as propriedades do material é usada para representar matematicamente a rigidez e a distribuição de massa na estrutura (ANSYS 14, 2011).

Inicialmente, objetivando definir as dimensões geométricas das partes constituintes do gerador, foi utilizada uma ferramenta de otimização de parâmetros do ANSYS. Dados preestabelecidos como a largura, a altura das vigas e dos piezoelétricos, foram carregados no algoritmo, assim como a informação de que a primeira frequência natural do sistema deveria ser a mais próxima possível de 60 Hz. Dentre 300 possibilidades de geometria calculadas, a simulação apresentou como principais resultados cinco candidatas, apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Principais possibilidades de geometria para o gerador.

Geometria	Comprimento viga (mm)	Comprimento PZT (mm)	Altura massas (mm)	Frequência natural (Hz)
1	60,90	11,57	5,49	59,28
2	67,12	17,93	8,15	59,24
3	60,11	16,01	7,10	60,12
4	57,90	11,12	11,12	60,91
5	63,53	16,81	16,81	58,64

A que mais se aproximou da frequência requerida foi a geometria 3, mostrada na Tabela 3.3, e por isso foi a selecionada para o gerador. Todos os parâmetros geométricos considerados estão apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Parâmetros geométricos selecionados.

Vigas	Comprimento (l)		60,11 mm
	Largura (a)		12,72 mm
	Espessura (h)		0,15 mm
Massas	Comprimento (l)	Massa 1	10 mm
		Massa 2	5 mm
	Largura (a)		12,72 mm
PZTs	Altura (h)		7,1 mm
	Comprimento (l)		16,01 mm
	Largura (a)		12,72 mm
PZTs	Espessura (h)		0,2 mm

Tomando como base as estruturas baseadas em vigas oscilantes, tem-se que a maior amplitude de vibração da viga ocorre quando excitada em uma de suas frequências naturais, fazendo com que o sistema entre em ressonância e que a extremidade livre da viga atinja o maior nível de deslocamento, enquanto, a região próxima a extremidade engastada sofra os maiores níveis de deformação. Por esse motivo, utilizou-se a ferramenta de otimização para a obtenção de uma estrutura onde a sua primeira frequência natural fosse igual a preestabelecida. O passo seguinte foi observar as regiões nas vigas onde ocorreriam as deformações, extremamente importante para avaliar a localização dos elementos piezoelétricos. Com esse objetivo, utilizando os parâmetros geométricos otimizados, foi desenvolvida uma análise estática para prever o comportamento mecânico da estrutura sem os piezoelétricos. Para isso, foi aplicado uma excitação de base do tipo deslocamento com amplitude de 1 mm em uma das extremidades, causando a flexão da estrutura. A deformação equivalente foi avaliada no decorrer de seis *paths* (caminhos) criados ao longo da viga, como mostrado na Figura 3.6.

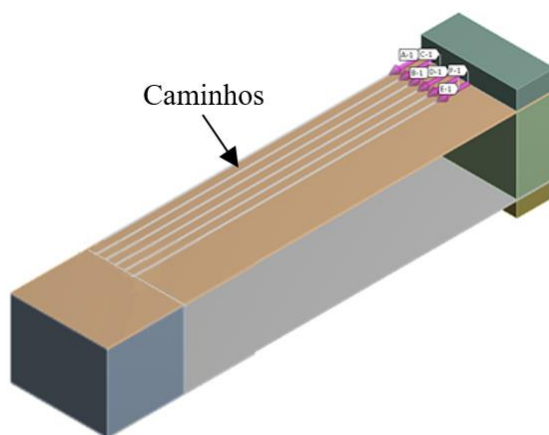


Figura 3.6 – Estrutura submetida a análise estática.

Na sequência, foi desenvolvida uma análise modal. Esta análise mostra as características de vibração (frequências naturais e modos de vibração) de uma estrutura ou um componente de máquina. Por fim, uma análise harmônica foi desenvolvida objetivando expor o comportamento da estrutura do gerador quando submetido a uma taxa cíclica de deslocamento de 3×10^{-4} m, aplicado na extremidade parcialmente engastada, o qual é avaliado no intervalo de frequência que varia de 0 a 500 Hz. A outra extremidade do gerador encontra-se totalmente livre, como mostrado na Figura 3.7.

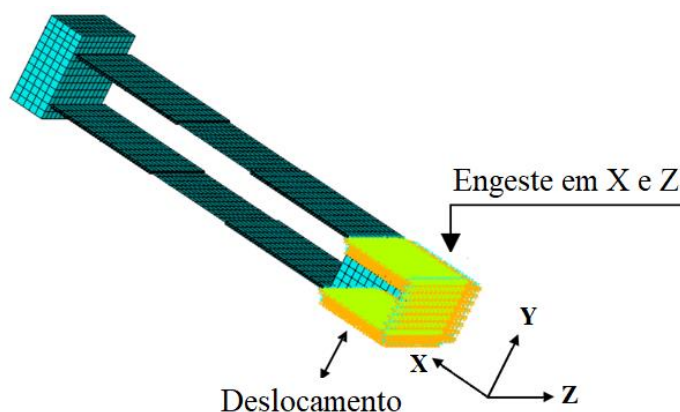


Figura 3.7 – Gerador submetido à análise harmônica.

No caso dos captadores baseados em vigas, os pesquisadores não costumam analisar diretamente o elemento piezoelétrico e sim a estrutura a qual ele vai estar acoplado. Isso se deve ao pequeno valor da espessura da camada piezoelétrica para essas configurações em particular, de modo que não ocorrem mudanças na dinâmica do sistema após a adição do piezoelétrico à estrutura, pois, o aumento na rigidez causado pelo acréscimo de massa é irrelevante. As simulações realizadas neste trabalho, exceto a estática, envolvem a estrutura do gerador com os elementos piezoelétricos já acoplados. Isso se deve ao pequeno valor de espessura das vigas (0,15 mm), de modo que a adição dos piezoelétricos na estrutura ocasiona mudanças consideráveis na dinâmica do sistema.

3.3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento experimental, pleiteou-se a concepção de uma estrutura capaz de emular condições reais de uso, permitindo obter informações pertinentes à validação da pesquisa com base em resultados experimentais confiáveis acerca da conversão de energia piezoelétrica. Dessa forma, foi desenvolvida uma estrutura capaz de

submeter o gerador proposto a diferentes faixas de frequências e de amplitudes de vibração mecânica.

3.3.1 Estrutura Experimental

A estrutura experimental, esquematizada na Figura 3.8, foi construída a partir dos parâmetros otimizados mostrados na Tabela 3.3. A mesma foi desenvolvida tendo em vista uma configuração mecânica inovadora de vigas em balanço que, quando excitada mecanicamente, vibrará segundo o modo apresentado na Figura 3.9, fornecendo às células piezoelétrica cargas cíclicas de tração e compressão. O nível de deformação sofrida pelas células depende diretamente da frequência e da amplitude de vibração transmitida à estrutura.

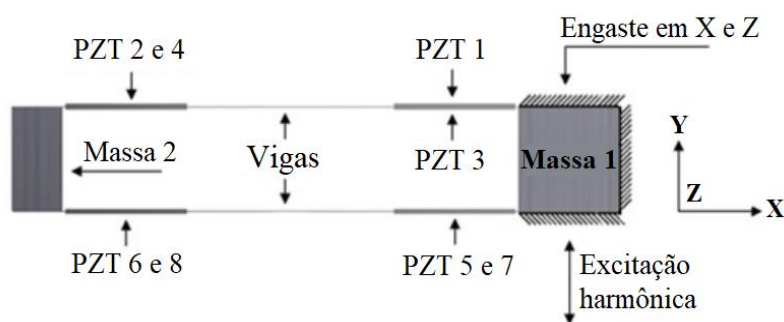


Figura 3.8 – Esquema do gerador piezoelétrico com duas vigas e 8 PZTs.

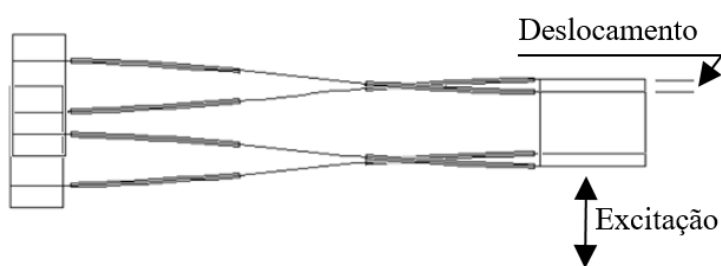


Figura 3.9 – Modo de vibrar esperado para a estrutura.

Seguindo o princípio de funcionamento esquematizado na Figura 3.8, utilizou-se como fonte de vibração o *shaker* apresentado na seção 3.1.1. O movimento vibratório é transmitido ao gerador piezoelétrico por meio de uma base, a qual, tem a sua face inferior resa ao do excitador eletromagnético enquanto a parte superior serve como engaste para uma das extremidades do gerador, como o esquematizado na Figura 3.10.

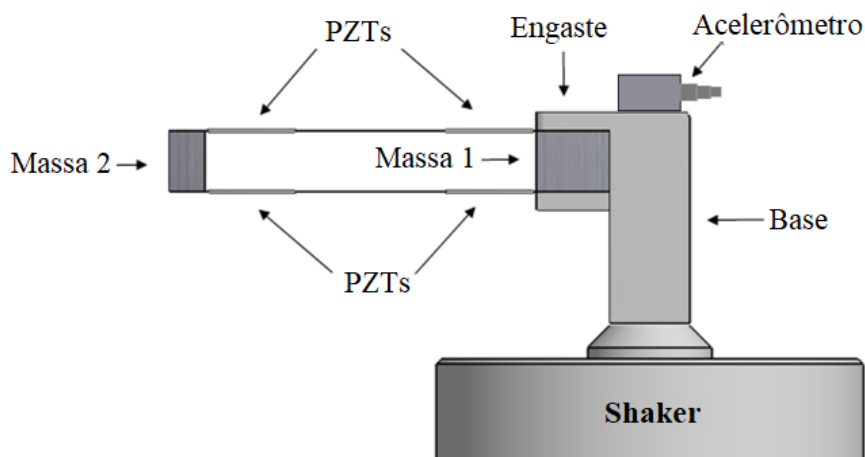


Figura 3.10 – Esquema do aparato mecânico montado para o estudo do gerador.

Para realizar a leitura do sinal de vibração mecânica transmitido ao gerador, foi colado um acelerômetro sobre a face superior da base. O modelo do acelerômetro é o 4507, produzido pela *Brüel & Kjaer*, com capacidade máxima de operação de ± 70 g com sensibilidade de 98,1 mV/g ou 10 mV/(m/s²) e capacidade de operar entre a faixa de 0,3 a 6 kHz com erro de $\pm 5\%$. O sensor é interligado a um condicionador de sinais, modelo 480E09 da *PCB Piezotronicsinc*.

Uma foto do gerador formado pelas vigas, massas e elementos piezoelétricos está mostrada na Figura 3.11 (a). A montagem da estrutura sobre o excitador eletromagnético pode ser vista na Figura 3.11 (b).

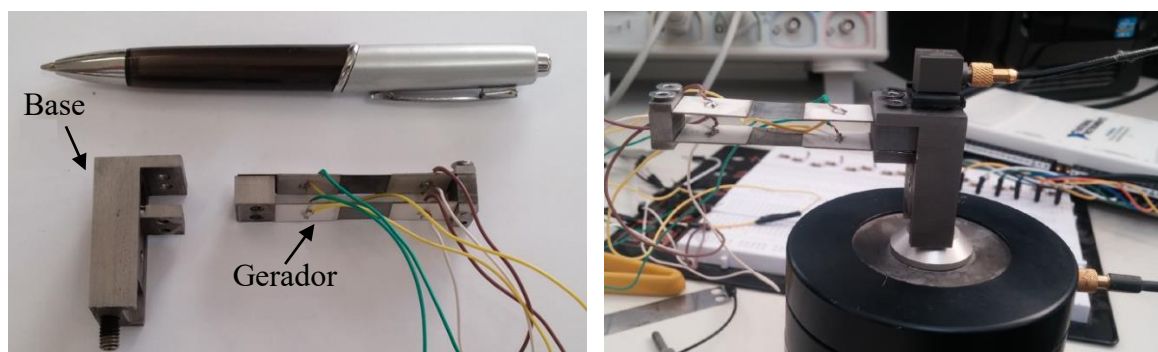


Figura 3.11 – Gerador piezoelétrico e sua base de acomodação e engaste (a). Montagem experimental para estudo do PZT (b).

De modo geral, toda a planta experimental está instrumentada com osciloscópio, gerador de funções, fonte de tensão, atuador eletromagnético, amplificador de potência,

gerador piezoelétricos, acelerômetro, módulo condicionador de sinais, placa de aquisição de dados e computador, como esquematizado na Figura 3.12.

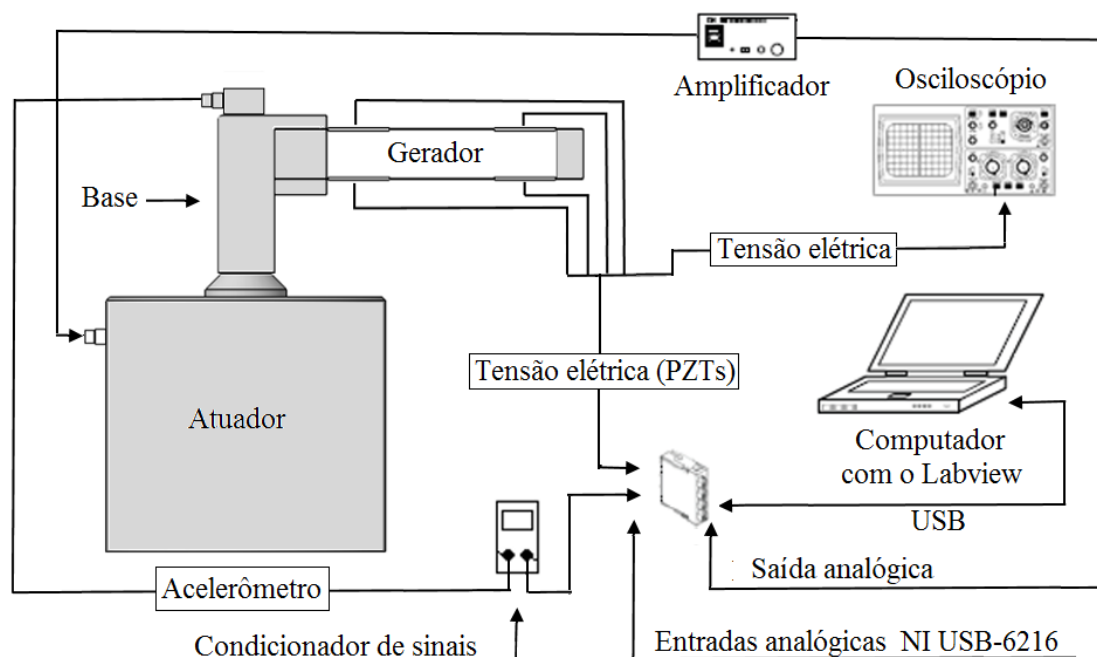


Figura 3.12 – Esquemático da montagem experimental.

A planta experimental foi controlada via *hardware* e *software* da *National Instruments*. Os dados de frequência e amplitude de vibração fornecidos ao gerador foram ajustados por meio de um programa desenvolvido no *LabView*, que comanda a saída de uma tensão senoidal da placa NI USB-6216 para um amplificador de potência que por sua vez alimenta o *shaker*. O programa desenvolvido permite que o gerador seja avaliado sob diferentes amplitudes de vibrações em um *sweep* de frequência (0 a 500 Hz) ou em frequências pontuais. A aquisição dos dados foi realizada utilizando uma taxa de amostragem de 25 kHz e 25 mil amostras em cada bloco de dados de 1 s, com um $\Delta t = 40 \mu s$ e um $\Delta f = 1$ Hz. O sinal de vibração colhido pelo acelerômetro e a tensão elétrica gerada são captados pelo módulo NI USB-6216, enviados via USB para um computador dotado com o *LabView* que trata e expõe os dados ao usuário a partir de uma interface de análise dinâmica. Os valores de tensão elétrica gerados pelo PZT, além de serem captados pela placa de aquisição, também foram analisados diretamente com o auxílio do osciloscópio de 10 M Ω . A fotografia da bancada de trabalho experimental está mostrada na Figura 3.13.

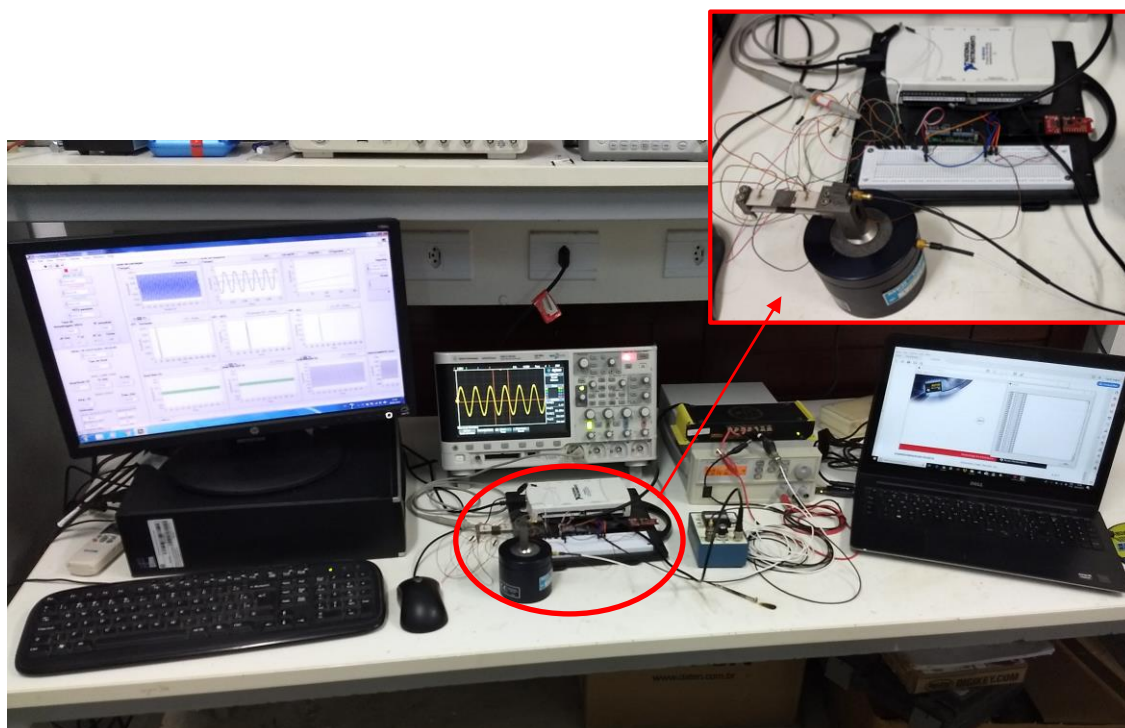


Figura 3.13 – Bancada de trabalho experimental.

3.4 TESTE DE APLICAÇÃO

Objetivando avaliar a aplicabilidade do gerador piezoelétrico, utilizou-se o dispositivo desenvolvido para alimentar um nó sensor capaz de realizar a medição e a transmissão, sem fio, dos dados de temperatura do ambiente no qual o sistema se encontre. Para isso, foi utilizada a ferramenta de desenvolvimento eZ430-RF2500 da *Texas Instruments* (TI, 2007). Trata-se de um sistema de comunicação sem fio (RF) de baixo consumo, mostrado na Figura 3.14, formado por duas placas distintas (ponto de acesso e dispositivo final), contendo cada uma um microcontrolador MSP430F2274 (TI, 2006) e um transceptor RF CC2500 como elementos principais, além de um sensor de temperatura.

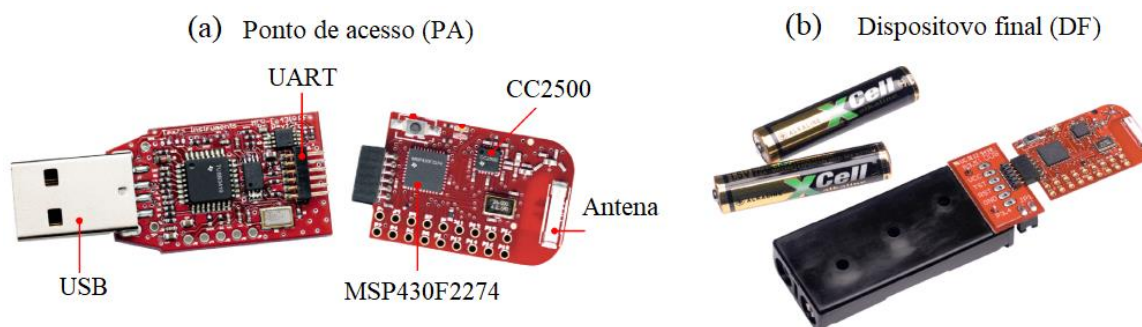


Figura 3.14 – eZ430-RF2500. Ponto de acesso (a); Dispositivo final (b) (TI, 2007).

O circuito integrado CC2500 (TI, 2009) é um transceptor de RF que opera na faixa não licenciada ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) que corresponde às frequências de 2400 a 2483,5 MHz. Este dispositivo é bastante utilizado em aplicações de áudio sem fio, teclado e *mouse* sem fio, *joysticks wireless*, rede de sensores, transferência de arquivos, etc.

O CC2500, responsável pela comunicação sem fio realizada pela ferramenta eZ430-RF2500, é controlado pelo microcontrolador (MCU) MSP430F2274, elemento dedicado a armazenar e executar o programa do usuário contendo as rotinas necessárias para o controle do chip de rádio frequência. As especificações de funcionamento e consumo de ambos os componentes estão listadas na Tabela 3.4. A comunicação entre o MCU e o transceptor é realizada por meio de uma interface serial operando no modo SPI (*Serial Peripheral Interface*), permitindo o acesso aos registradores de configuração e registradores de status do CC2500. Vários parâmetros podem ser programados através dessa interface como, por exemplo: modo de operação (*power down*, *power up*), frequência de oscilação do cristal, modos de transmissão e recepção, taxa de dados, potência de saída do sinal RF, entre outros. Na aplicação desenvolvida neste trabalho o CC2500 foi configurado para operar com frequência de oscilação do cristal de 8 MHz, transmitindo com 0 dBm a cada 5 s durante 5 ms.

Tabela 3.4 - Especificações do transceptor e do microcontrolador.

CC2500			Unidade
Condições de operação	Tensão	1,8 a 3,6	V
	Corrente RX	1,8	mA
Consumo de corrente	Corrente TX (0 dBm)	21,2	mA
	Power Down	400	nA
	Standby	1,5	mA
Características RF	Faixa de frequência	2,4 a 2,4835	GHz
	Taxa de dados (programável)	1,2 a 500	kbps
	Potência de saída (programável)	-30 a 0	dBm
MSP430F2274			
Condições de operação	Tensão	1,8 a 3,6	V
	Faixa de temperatura	-40 a 85	°C
Consumo de corrente	Modo ativo a 1 MHz, 2,2 V	270	µA
	Modo Standby	0,7	µA
	Modo desligado	0,1	µA
Freq. de operação	Vcc ≥ 3.3 V	16	MHz

A comunicação RF entre as placas é regida pelo protocolo de rede *SmpliciTI*, desenvolvido pela *Texas Instruments* especificamente para pequenas redes sem fio de baixo consumo. Esse protocolo exige poucos requisitos de memória do MCU e suporta duas arquiteturas de rede: ponto a ponto e estrela. A topologia utilizada neste trabalho é a estrela, onde o Ponto de Acesso (PA) atua como o centro (*hub*) da rede e está sempre ligado, recebendo uma amostra de dados de um Dispositivo Final (DF) uma vez por segundo. O DF passa a maior parte do tempo no modo de baixo consumo 3 (LPM3), acordando uma vez a cada cinco segundos para amostrar a temperatura ambiente e enviar o resultado para o PA. Ao receber os dados, o PA envia-os através da UART para uma porta COM no PC para ser apresentado pelo *software* Sensor Monitor (TI, 2008), também desenvolvido pela *Texas Instruments*.

Para garantir energia suficiente para inicialização do sistema, pois foi verificado através de testes que o DF consome mais durante os procedimentos de sincronismo com o PA, foi utilizado o módulo EH300A (ADL, 2015), responsável por receber e armazenar a energia proveniente do gerador piezelétrico e, em seguida, alimentar o nó sensor. Este módulo contém um circuito retificador e dois capacitores interligados em paralelo que totalizam 6.6 mF. Na Figura 3.15 é mostrado o esquema de funcionamento do teste de aplicação.

O fato do MCU e do transceptor poder operar dentro de uma certa faixa de tensão, permite que a energia armazenada em um capacitor possa ser aplicada diretamente no pino de alimentação do sistema, desde que a tensão esteja dentro do limite de operação e seja suficientemente livre de ondulações. Outros componentes do eZ430-RF2500 exigem uma regulação mais rigorosa, mas como o MCU é o primeiro dispositivo a "acordar", após um ciclo de carga ou entre as transmissões, a tensão elétrica adequada a esses componentes são sequenciadas pelo microcontrolador.

Seguindo o esquema da Figura 3.15, a energia gerada é enviada para o EH300A que após carregado alimenta o DF que, por sua vez, faz a leitura da temperatura ambiente e a envia para o PA conectada via USB ao computador 2 que monitora a temperatura por meio do *software* Sensor Monitor. A tensão elétrica gerada, a tensão no capacitor (V_C) e a tensão de saída (V_S) liberada para o DF, são medidas simultaneamente pela placa de aquisição NI-6216.

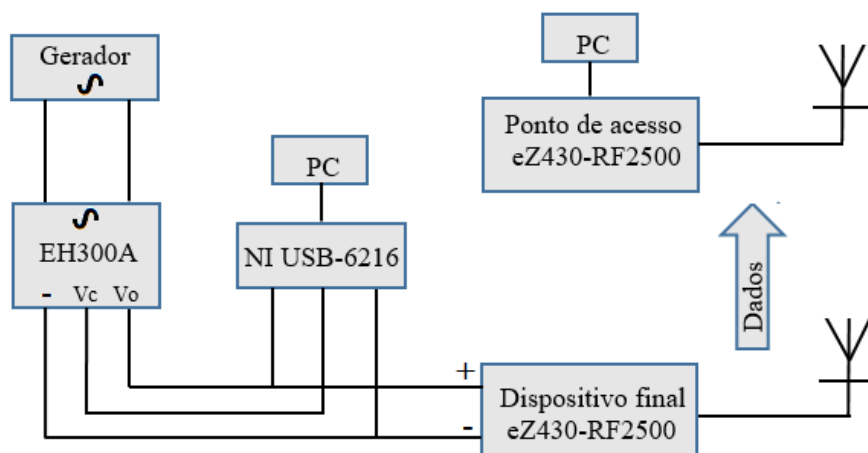


Figura 3.15 – Esquema de funcionamento do teste de aplicação.

O módulo de armazenamento opera entre dois limites de tensão, 3,5 V (V_+) e 1,8 V (V_-). Justamente o intervalo de operação do dispositivo de comunicação sem fio. Na prática, significa que não será fornecido energia ao DF enquanto $V_C < V_+$, como mostrado na Figura 3.16. Quando a tensão no capacitor atingir 3,5 V, o DF é energizado e permanecerá ativo enquanto $V_S > V_-$.

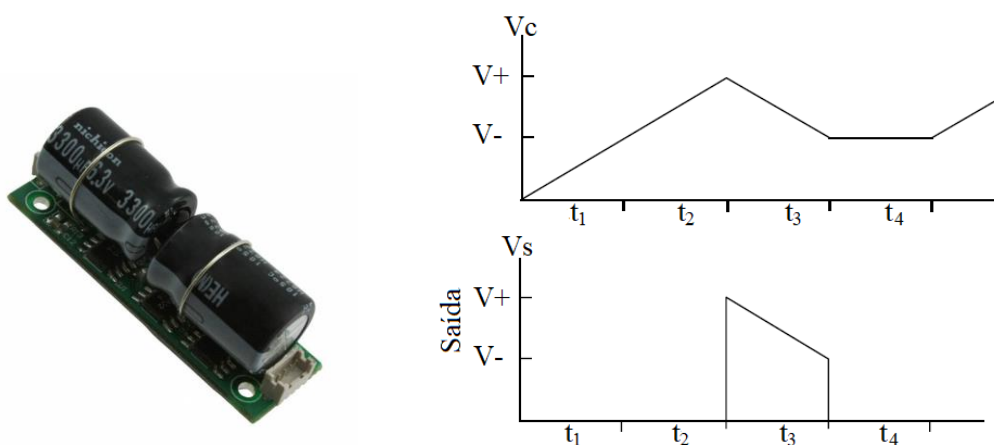


Figura 3.16 – Princípio de operação do módulo de armazenamento EH300A.

Essa solução é particularmente adequada para aplicações que não tem requisito de energia contínua, por exemplo em RSSF, onde a energia pode ser gerada e armazenada entre os intervalos de medição e transmissão de dados.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo estão relatados os resultados e discussões acerca das simulações numéricas e experimentais realizadas no intuito de caracterizar a estrutura com 8 PZTs como um dispositivo gerador de energia elétrica.

Inicialmente são mostrados os resultados experimentais que nortearam a seleção do material piezoelétrico. Em seguida são discutidos os resultados da modelagem numérica, iniciando-se com a verificação dos pontos de maior deformação da estrutura por meio do resultado de uma análise estática. Logo depois, as frequências naturais e os respectivos modos de vibração do modelo virtual são mostrados como resultado de uma análise modal. Em seguida os níveis de deslocamentos nodais e uma previsão da tensão elétrica gerada são mostrados a partir de análises harmônicas. Quanto aos resultados experimentais, são mostrados graficamente os sinais de tensão e potência elétrica de saída relacionando-os com a aceleração a qual a estrutura foi submetida, analisados em um intervalo de frequência entre 0 e 500 Hz (por ser formado por frequências comuns em ambientes fabris, públicos, residenciais, etc.), com níveis de amplitude de excitação distintos. Também são discutidos os resultados experimentais dos testes de aplicabilidade do gerador desenvolvido, analisado dentro e fora do laboratório, utilizando fontes de vibração presentes no ambiente.

4.2 MATERIAL PIEZOELÉTRICO SELECIONADO

O piezoelétrico utilizado no gerador proposto foi selecionado baseado nos resultados de geração de energia elétrica apresentados na Tabela 4.1, obtidos após as vigas serem submetidas a diferentes amplitudes de vibração. Os experimentos mostraram que a tensão elétrica dos três piezoelétricos assumiram valores máximos em 68 Hz, devido ser a frequência natural de ambas as estruturas. Os experimentos foram repetidos após a adição de uma massa, de 0.696 g, colada à extremidade livre das vigas com a finalidade de diminuir a frequência natural da estrutura e de elevar a deformação mecânica nos piezoelétricos. Nessas condições, houve o deslocamento da frequência natural das vigas de 68 Hz para 30 Hz. Para a obtenção da potência elétrica gerada, o valor da impedância interna de cada elemento gerador foi estimado de forma experimental fazendo uso do teorema da máxima transferência de potência.

Tabela 4.1 – Resultados dos testes experimentais de desempenho entre três PZTs.

Frequência (Hz)	Aceleração (g)	PZT	Tensão (Vrms)	Impedância (kΩ)	Potência (μW)	mW/g	mW/cm³
68	0,5	C-64	6,18	190	201	0,402	7,90
		PIC255	5,95	185	191	0,382	7,50
		PIC181	2,38	260	22	0,044	0,86
	1	C-64	10,02	174	577	0,577	22,68
		PIC255	9,01	158	514	0,514	20,20
		PIC181	5,03	290	87	0,087	3,41
Com massa							
30	0,5	C-64	19,97	570	700	1,4	27,5
		PIC255	12,55	300	525	1,05	20,63
		PIC181	7,95	550	115	0,230	4,52

Observando a Tabela 4.1, conclui-se, que em todas as situações avaliadas o PZT C-64 gerou maior potência elétrica que os demais, possivelmente por possuir maior constantes dielétricas e piezoelétricas, como informado na seção 3, Tabela 3.1. Sendo assim, todas as análises referentes ao desenvolvimento do gerador piezoelétrico foram realizadas considerando o C-64 como o elemento gerador.

4.3 MODELAGEM NUMÉRICA

O resultado da simulação de otimização dos parâmetros da estrutura direcionou as ações metodológicas de montagem do gerador, por isso foi apresentado na seção 3.1. O resultado da análise estática, desenvolvida no intuito de observar a deformação equivalente ao longo da viga, confirmou que os maiores níveis de deformação estão próximos às massas de engaste, como mostrado na Figura 4.1, ou seja, em ambas as extremidades do gerador, exatamente onde os piezoelétricos foram colados.

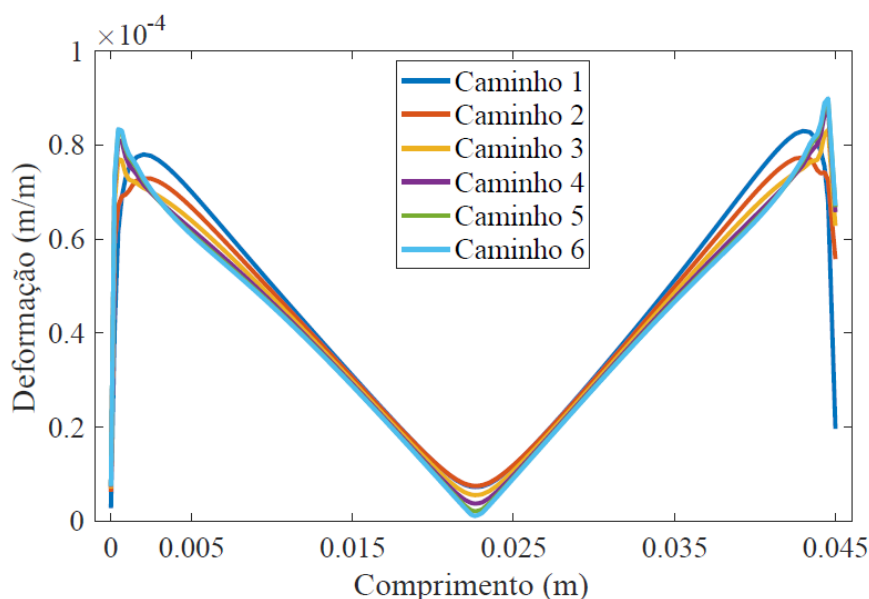


Figura 4.1 – Deformação ao longo da viga.

Carregando os parâmetros das vigas, massas e dos elementos piezoelétrico no modelo de análise modal desenvolvido, tem-se que a primeira frequência natural do gerador é de 60,1 Hz, confirmando a previsão da ferramenta de otimização geométrica. As duas frequências naturais seguintes são: 622,35 Hz e 633 Hz. Os correspondentes modos de vibração encontram-se ilustrados nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4.

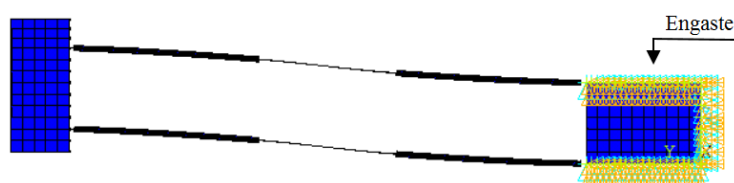


Figura 4.2 – Primeiro modo de vibração (60,1 Hz).



Figura 4.3 – Segundo modo de vibração (622,3 Hz).



Figura 4.4 – Terceiro modo de vibração (633 Hz).

A partir dessas simulações, constatou-se a viabilidade de trabalhar com o gerador piezoelétrico vibrando em torno da sua primeira frequência natural (60 Hz), visando explorar diferentes fontes de vibrações. As outras frequências naturais da estrutura não foram consideradas, pois, estão além da faixa de valores da maioria das aplicações práticas.

Também foram realizadas simulações modais da estrutura sem os elementos piezoelétricos. Nessas condições, as três primeiras frequências naturais foram de 26,5 Hz, 388,92 Hz e 396,06 Hz, respectivamente. O resultado mostrou o quanto as células piezoelétricas influenciam na rigidez mecânica da estrutura.

No modelo de análise harmônica, a excitação na forma de deslocamento aplicado à estrutura, resultou em um significativo deslocamento nodal na direção x, causando assim um movimento de tração e compressão nos elementos piezoelétricos, como mostrado na Figura 4.5. A barra gráfica indica o nível de deslocamento ocorrido em diferentes regiões do gerador referente à excitação em 60 Hz. A extremidade direita da barra corresponde à região superior dos PZTs, enquanto, a extremidade esquerda indica deslocamento na região inferior dos PZTs.

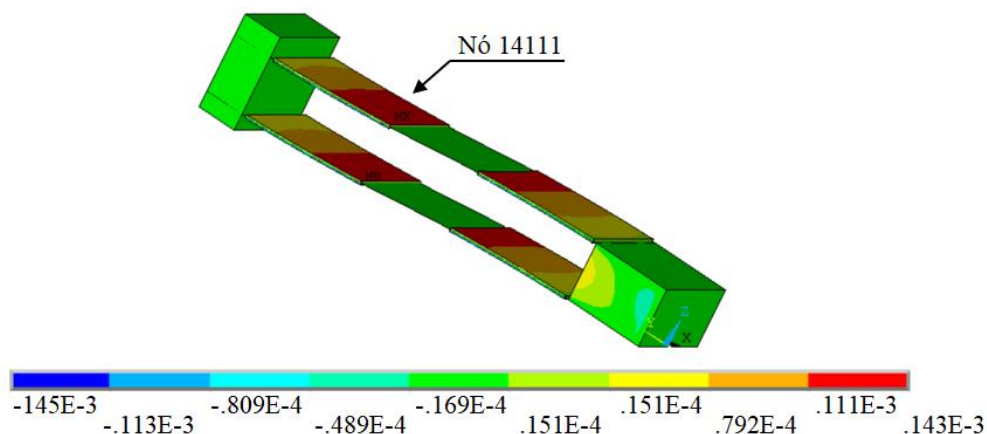


Figura 4.5 – Deslocamento na direção y referente à excitação na frequência de 60 Hz.

O gráfico mostrado na Figura 4.6 se refere ao comportamento do deslocamento na direção y do nó 14111 (região indicada na Figura 4.5) em um intervalo de frequência de 20 Hz a 500 Hz. Esse nó pertence à região superior do PZT 2 que quando excitado em 60 Hz (correspondente a primeira frequência natural) apresenta o maior nível de deslocamento.

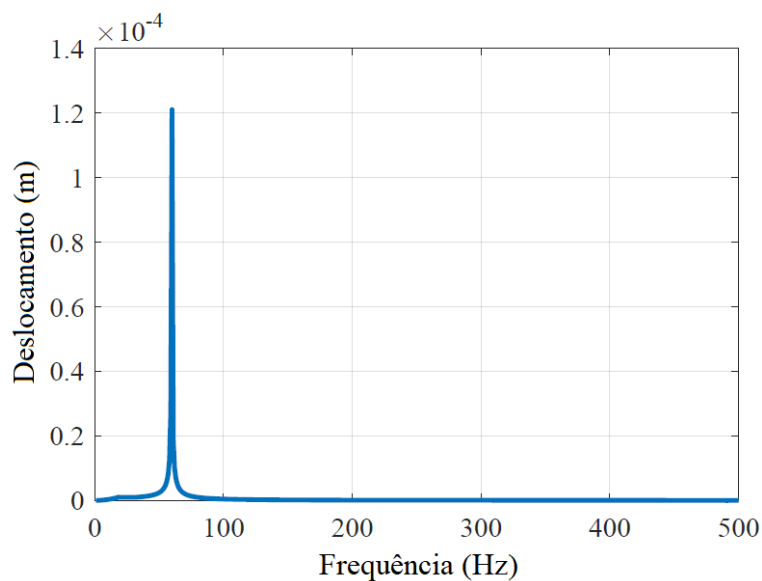


Figura 4.6 – Deslocamento do nó 14111 na frequência natural.

Outra análise harmônica, desta vez dedicada a investigar se o gerador piezoelétrico seria ou não capaz de gerar energia elétrica, foi desenvolvida. Como resultado, obteve-se uma tensão de pico de aproximadamente 7,1 V por célula, quando a estrutura foi excitada em 0,5 g na frequência de 60,5 Hz. Na Figura 4.7 são mostrados os níveis de potencial elétrico gerados.

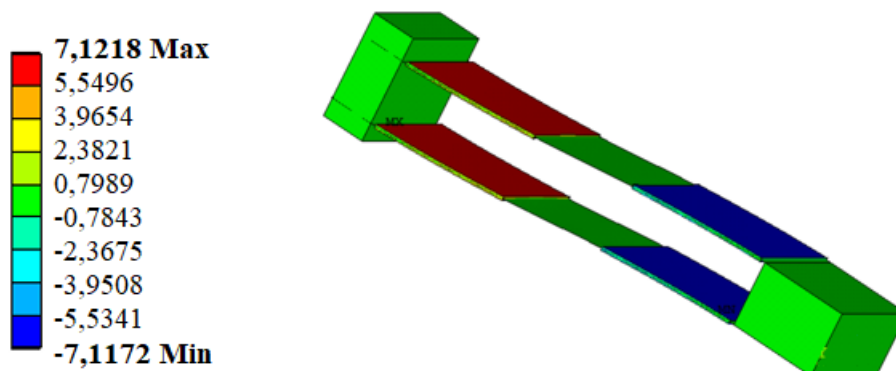


Figura 4.7 – Tensão elétrica gerada em 60,5 Hz.

A partir dessas análises computacionais, foi possível verificar que o dispositivo de captação de energia piezoelétrica com a geometria aqui proposta, é capaz de produzir energia elétrica quando submetido a níveis relativamente baixos de vibração mecânica. O desenvolvimento dessas simulações foi imprescindível para o decorrer do trabalho, visto que, os primeiros resultados favoráveis a viabilização do desenvolvimento do gerador, foram frutos das simulações numéricas.

4.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas análises experimentais, o gerador foi avaliado sob diferentes níveis de amplitudes de vibração na faixa de frequência de 0 a 500 Hz. O sistema de aquisição foi ajustado para coletar 25 mil amostras em cada bloco de dados de 1 s, com intervalo de tempo entre as amostras de $\Delta t = 40 \mu s$ e resolução em frequência de $\Delta f = 1$ Hz. Foram ainda usadas janelas do tipo *Hanning* no processamento dos sinais. Estas janelas foram particularmente úteis nas análises de algumas fontes de vibrações com sinais aleatórios, evitando ou diminuindo o espalhamento espectral causado pelo erro de *Leakage*.

A partir da estrutura detalhada no Capítulo 3, foram, em primeiro momento, realizadas experimentações envolvendo apenas a estrutura do gerador sem os elementos piezoelétricos, com o objetivo de comparar os resultados do modelo numérico com o experimental. Para isso, foi colado em uma das vigas do gerador um elemento piezoelétrico pequeno o bastante para não causar alteração na rigidez da estrutura, mas, que fosse suficiente para responder eletricamente a qualquer nível de deformação. Na

Figura 4.8 é mostrado o sinal de tensão elétrica captado do pequeno PZT quando o programa foi ajustado para fornecer ao *shaker* uma amplitude de 80 mVpp.

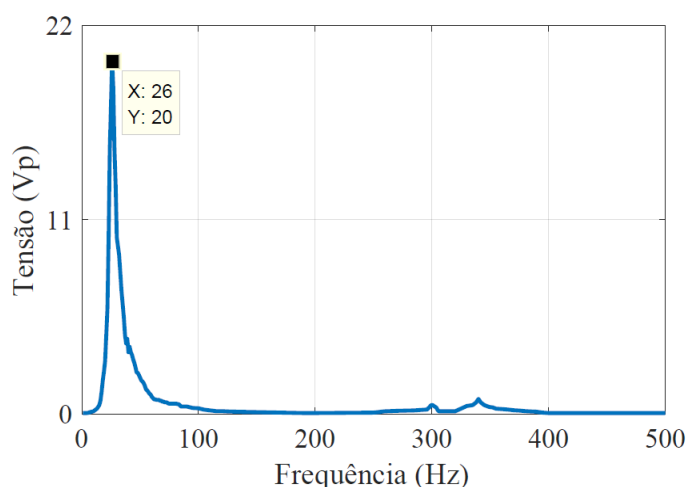


Figura 4.8 – Tensão elétrica em função da frequência.

Ao observar o gráfico, constata-se que a partir de 10 Hz a tensão cresce junto com a frequência, atingindo o valor de 20 Vp em 26 Hz. A partir desse ponto a tensão cai abruptamente e passa a crescer novamente atingindo o valor de 1 V em 300 Hz e 4,5 V em 340 Hz. O potencial elétrico assume valor máximo em torno de 26 Hz, possivelmente, pelo fato da frequência de excitação fornecida pelo atuador ter coincidido com a primeira frequência natural do acoplamento mecânico experimental.

Com o objetivo de verificar se os picos de tensão elétrica, mostrados na Figura 4.8, ocorrem em pontos de ressonância do acoplamento mecânico, foram realizados testes experimentais para estimar as frequências naturais da estrutura. A resposta em frequência (conseguida através da transformada de Fourier) mostra as frequências em que a energia vibratória se concentra. Os testes foram baseados na excitação da estrutura a partir de pequenos impactos consecutivos e sua resposta foi captada pela placa de aquisição através do PZT e tratada no *LabView*. Para o experimento a estrutura foi retirada do excitador eletromagnético e acoplada a uma base rígida de metal. Na Figura 4.9 mostra-se o espectro de potência obtido no ensaio por impactos.

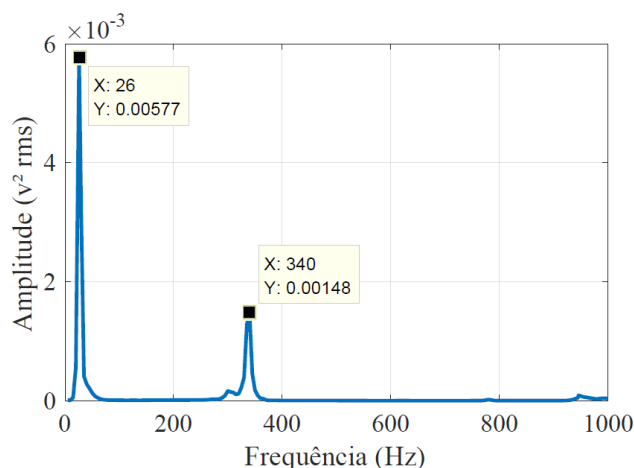


Figura 4.9 – Espectro com as frequências naturais da estrutura experimental.

No gráfico da Figura 4.9 apresenta-se uma clara predominância de algumas frequências em relação às demais. Percebe-se que entre 0 e 500 Hz existe a concentração de energia entre três pequenos intervalos de frequência atingindo valores máximos em 26, 300 e 340 Hz, equivalendo a três primeiras frequências naturais do sistema, sendo que, em 26 Hz a concentração de energia é mais elevada. A partir desses resultados é possível afirmar que o comportamento dinâmico, apresentado na Figura 4.8, corresponde ao comportamento da estrutura experimental quando excitada mecanicamente, ou seja, as frequências onde ocorrem os níveis mais altos de tensão elétrica coincidem com as frequências naturais da estrutura. Observa-se ainda que o atuador eletromagnético não tem oferecido influência nas frequências naturais.

Na análise numérica, realizada por meio das simulações modais da estrutura com a ausência dos elementos piezoelétricos, mostrou-se que a primeira frequência natural foi de 26,3 Hz, enquanto na análise experimental o valor foi de 26 Hz. Esses resultados mostram uma boa correspondência entre o modelo numérico e o experimental (com relação a primeira frequência natural da estrutura) e trouxeram confiança de que, após a colagem das oito células piezoelétricas, o comportamento dinâmico do gerador também seja correspondente ao previsto no modelo numérico.

As experimentações seguintes foram realizadas com os oito elementos piezoelétricos colados às vigas. Inicialmente foi analisada a tensão elétrica gerada por cada célula piezoelétrica quando o programa foi ajustado para fornecer ao *shaker* uma amplitude de 48 mVpp. Foi visto previamente que essa amplitude de sinal promoveria a

estrutura uma aceleração de 0,5 g em 60 Hz. Na Figura 4.10 mostra-se o potencial elétrico de cada unidade geradora em função da frequência de excitação.

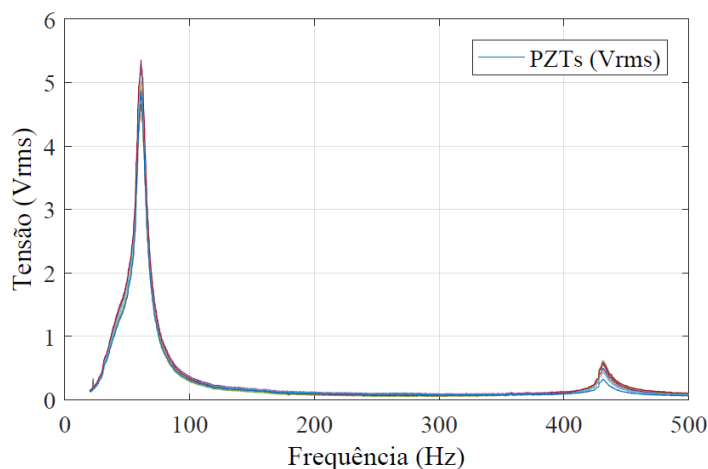


Figura 4.10 – Tensão elétrica gerada em cada PZT em função frequência.

Embora o gráfico exiba todas as oito curvas num mesmo par de eixos coordenados, o que em princípio dificulta uma análise mais minuciosa dos resultados para cada PZT, percebe-se claramente que o ponto máximo de geração de todas as células, que variou entre 4,6 e 5,5 Vrms, foi atingido na mesma frequência, em 60 Hz.

Ao compararmos os gráficos mostrados nas Figuras 4.8 e 4.10, referentes aos ensaios da estrutura do gerador sem e com PZTs, respectivamente, pode ser observado que houve um deslocamento nas frequências onde os níveis de tensão elétrica atingiram valores máximos. Ou seja, o acoplamento dos elementos piezoelétricos adicionou rigidez mecânica a estrutura do gerador, promovendo assim o deslocamento das frequências naturais do sistema. Tomando como referência a primeira frequência natural, a qual tem sido alvo de interesse e estudo neste trabalho, houve um deslocamento de 26 Hz para 60 Hz na análise experimental e, de 26,3 Hz para 60,1 Hz no modelo numérico. Também se obteve uma boa correspondência entre a tensão elétrica gerada por cada PZT obtidas experimentalmente (entre 6,5 Vp e 7,7 Vp), e a prevista nas simulações (7,1 Vp).

Como forma de analisar a quantidade de energia elétrica gerada, além da leitura individual dos elementos piezoelétricos, os terminais das unidades geradoras foram interligados em paralelo. Nessas condições, o valor máximo de tensão gerada foi de 5,2 Vrms, atingido quando a estrutura foi submetida a uma frequência de 60 Hz com uma aceleração de 0.5 g. Na Figura 4.11 é mostrado o gráfico da tensão elétrica em função do

tempo e da frequência com o gerador vibrando em 60 Hz. Os sinais da tensão elétrica gerada e da aceleração do sistema em uma varredura de frequências de 0 a 500 Hz, são mostrados na Figura 4.12.

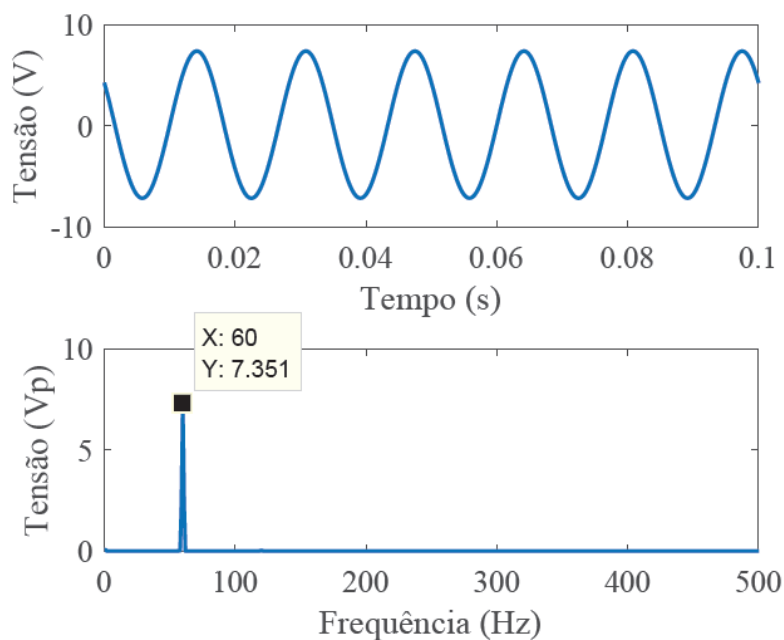


Figura 4.11 – Tensão elétrica em função do tempo e da frequência em 60 Hz (PZTs em paralelo).

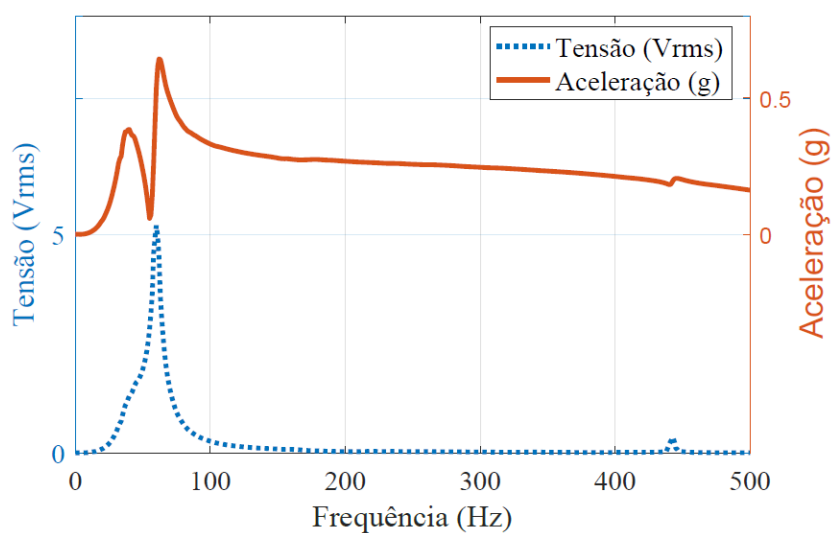


Figura 4.12 – Tensão elétrica e aceleração em função da frequência (PZTs em paralelo).

Observando o gráfico mostrado na Figura 4.12, constata-se que o sinal de aceleração apresenta um comportamento dinâmico diferente do sinal de tensão elétrica captado. É importante salientar, que os sinais de tensão elétrica colhidos dos elementos geradores têm seus valores acrescidos até a frequência de trabalho de 60 Hz, não apresentando variações, mesmo com a diminuição da aceleração observada sobre a base do gerador, nas frequências entre 40 e 57 Hz. A diferença entre o perfil de tensão elétrica e de aceleração é devido a reação do piezoelétrico em se opor a deformação imposta quando está gerando energia elétrica, ou seja, é o comportamento do efeito piezoelétrico reverso ocorrendo quando o elemento foi deformado e gerou uma diferença de potencial promovendo força contrária ao movimento vibracional.

Até o momento, as análises experimentais permitiram a obtenção e correlação gráfica dos valores de potencial elétrico gerado e as acelerações as quais o sistema foi submetido. Outro parâmetro imprescindível para a caracterização do dispositivo como gerador de energia, é a quantidade de potência elétrica gerada. Para a obtenção desse parâmetro é necessário que o valor da impedância interna do elemento gerador seja conhecido. Considerando o conversor aqui estudado como fonte geradora de energia elétrica, sua impedância interna pode ser estimada de forma experimental fazendo uso do teorema da máxima transferência de potência e de um circuito como o ilustrado na Figura 4.13. Esse teorema informa que a máxima transferência de potência de um gerador para uma carga de impedância ‘ Z ’ com valor complexo arbitrário, ocorre quando a impedância interna do gerador ‘ z ’ coincide com o complexo conjugado da impedância de carga ($z = Z^*$), ou, se a impedância da carga é um número real arbitrário, isto é, uma carga resistiva, a potência na carga é máxima quando sua impedância for igual a magnitude da impedância interna da fonte ($Z = |z|$).

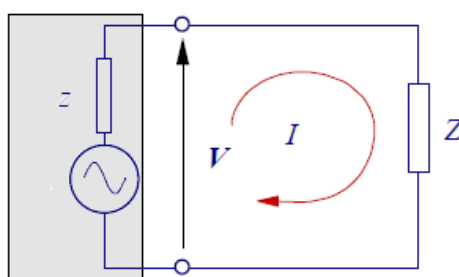


Figura – 4.13 – Gerador piezoelétrico com impedância interna ‘ z ’ alimentando uma carga de impedância ‘ Z ’.

Contudo, a impedância interna dos elementos piezoelétrico foi estimada da seguinte maneira: primeiramente, a estrutura de testes foi posta em funcionamento com valores pré-estabelecidos de amplitude e frequência de vibração. Em seguida, a tensão elétrica gerada foi medida diretamente por um osciloscópio de $10\text{ M}\Omega$ de impedância de entrada (considerada, em casos práticos, como uma medida em circuito aberto). Após essa primeira medição, os terminais dos PZTs foram interligados a uma década resistiva de $1111110\ \Omega$, de acordo com a ilustração da Figura 4.13, e a resistência da década foi variada até que o valor da tensão elétrica medida nos terminais do PZT atingisse a metade do valor da tensão registrada na primeira medição. Ou seja, quando a tensão elétrica do PZT no circuito, for metade da tensão elétrica do PZT fora do circuito, o valor da resistência elétrica contida na década resistiva será correspondente à impedância resistiva do elemento piezoelétrico. Este procedimento foi repetido para cada valor de frequência a qual a estrutura foi excitada.

Mantendo as condições de vibração da análise anterior, a impedância estimada para cada PZT foi de $98\text{ k}\Omega$ em 60 Hz . Já quando as unidades geradoras são interligadas em paralelo, a impedância obtida foi de $14\text{ k}\Omega$. Na Figura 4.14 é mostrado o comportamento da impedância elétrica para o arranjo em paralelo, com os sinais de tensão elétrica medidos antes (Tensão 1) e após a associação das impedâncias (Tensão 2) em função da frequência. Após este procedimento, a potência elétrica gerada pelas células pode ser calculada. O gráfico apresentado na Figura 4.15 mostra a tensão e a potência elétrica em função da frequência.

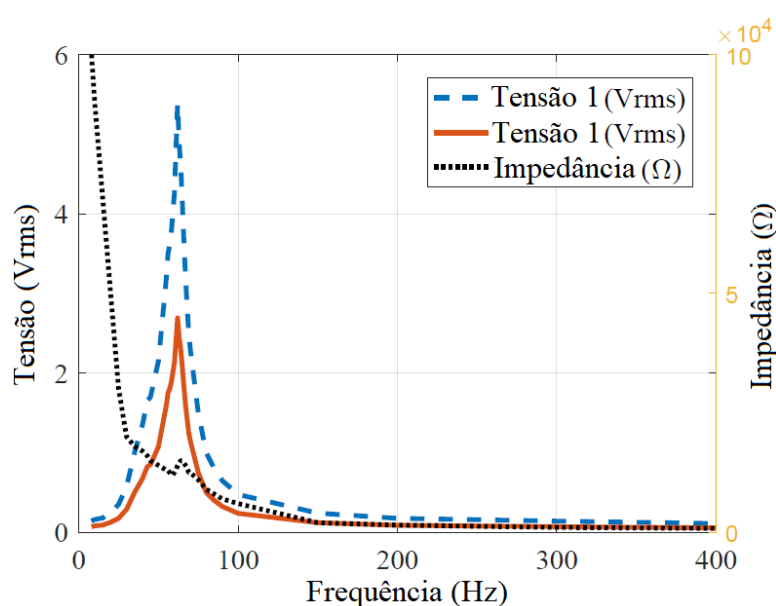


Figura 4.14 - Tensão elétrica e impedância resistiva em função da frequência.

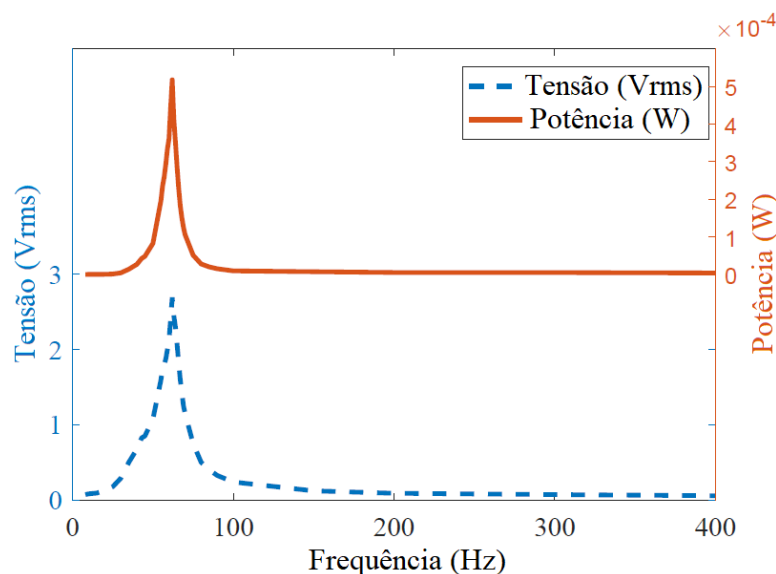


Figura 4.15 – Tensão e potência elétrica em função da frequência.

Com os resultados mostrados no gráfico da Figura 4.15, a quantidade de dados passa a ser suficiente para concluir que, com a amplitude de tensão de alimentação de 48 mVpp, fornecida pela placa de aquisição ao amplificador de potência do excitador eletromagnético, uma aceleração de aproximadamente 0,5 g foi submetida ao dispositivo piezoelétrico que gerou uma tensão de 2,7 Vrms e uma potência de 520 μ W na frequência de trabalho de 60 Hz.

Em seguida, foram observados os valores máximos de saída após a estrutura experimental ser submetida a diferentes níveis de vibração mecânica. Na Tabela 4.2 encontra-se o resumo destes experimentos. A potência elétrica calculada, leva em consideração a carga resistiva ótima para cada situação.

Ao observar os resultados das análises experimentais contidos na Tabela 4.2, pode-se concluir que a tensão piezoelétrica de saída é tanto maior quanto maior for a amplitude da oscilação de excitação fornecida a estrutura e, por conseguinte a deformação dos elementos geradores. Portanto, existe uma relação de proporcionalidade entre a tensão elétrica e a deformação mecânica das células, sendo maximizada em torno dos valores de ressonância da estrutura. Comportamento que representa a correspondência eletromecânica do fenômeno piezoelétrico.

Tabela 4.2 – Resultados adquiridos da estrutura experimental com oito células piezoelétricas.

Frequência (Hz)	Aceleração (g)	PZT	Tensão (V _{rms})	Impedância (kΩ)	Potência (μW)	mW/cm ³
60	0,5	PZT 1	2,79	95	82	0,25
		PZT 2	2,07		45	0,14
		PZT 3	2,21		51	0,15
		PZT 4	2,14		48	0,14
		PZT 5	2,64		73	0,22
		PZT 6	2,77		80	0,24
		PZT 7	4,24		189	0,58
		PZT 8	2,42		61	0,18
		Paralelo	2,70	14	520	1,59
60	0,75	PZT 1	4,49	98	205	0,63
		PZT 2	3,89		154	0,47
		PZT 3	4,17		177	0,54
		PZT 4	3,96		160	1,49
		PZT 5	4,8		235	0,72
		PZT 6	4,98		253	0,77
		PZT 7	7,39		557	1,71
		PZT 8	4,49		205	0,63
		Paralelo	4,95	14	1750	5,37
60	1	Paralelo	6,40	14	2925	8,98
60	1,5	Paralelo	8,55	15	4873	14,96
60	2	Paralelo	12,1	15	9600	29,48

Por meio das Tabelas 4.3 e 4.4, pode-se comparar o gerador proposto com alguns captadores de energia baseados no efeito piezoelétrico apresentados na literatura com relação a densidade de potência por volume de piezoelétrico utilizado. Pode ser visto na Tabela 4.3 que o gerador apresentou melhor rendimento que os demais quando esteve submetido a uma frequência de 60 Hz com aceleração de 2 g. Quando avaliado em 0,5 g, seu rendimento ficou entre os quatro primeiros, como mostrado na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 – Comparação da literatura com o gerador proposto em 2 g.

Densid. /volume	Rangel (Autor)	Kulkarni (2014)	Janphuang (2011)	Eddiai (2018)	Daniels (2013)	Yesner (2018)	Lee (2011)	Zhao (2012)	Sriramdas (2015)	Cha (2016)
mW/cm ³	29,48	11,4	6,2	6	0,4	0,16	0,137	0,134	0,079	425 μ

Tabela 4.4 – Comparação da literatura com o gerador proposto em 0,5 g.

Densid. /volume	Kulkarni (2014)	Janphuang (2011)	Eddiai (2018)	Rangel (Autor)	Daniels (2013)	Yesner (2018)	Lee (2011)	Zhao (2012)	Sriramdas (2015)	Cha (2016)
mW/cm ³	11,4	6,2	6	1,59	0,4	0,16	0,137	0,134	0,079	425 μ

4.5 TESTE DE APLICAÇÃO

Conforme especificações do fabricante do transceptor, a potência mínima necessária para o seu funcionamento contínuo é de aproximadamente 60 mW (teórica), caso a tensão de alimentação seja em torno de 3 V. No entanto, o transceptor foi configurado para transmitir um pacote de dados a cada cinco segundos, sendo acionado por um período aproximado de 5 ms, o que resulta em um ciclo de trabalho de 0,1 %, e, portanto a potência média é de $60 \text{ mW}/1000 = 60 \text{ } \mu\text{W}$. Para que o conversor piezoelétrico desenvolvido neste trabalho atendesse às especificações da aplicação proposta, foi, como informado anteriormente na seção 3.4, utilizado um módulo de armazenamento de energia. Dessa forma foi garantida a demanda da potência instantânea de 60 mW, sobretudo no momento da inicialização do sistema.

Levando em consideração os níveis de vibração utilizados na seção 4.4, inicialmente o sistema foi ajustado para vibrar em 60 Hz a uma aceleração de 0,5 g. Nessas condições o gerador precisou de 880 segundos para carregar totalmente o módulo de armazenamento e inicializar a aplicação. Desse modo, permitiu-se a medição e a comunicação sem fio dos dados da temperatura utilizando apenas a energia elétrica convertida pelos piezoelétricos. Na Figura 4.16 é mostrado a tensão através do capacitor durante o carregamento assim como a tensão através da carga, liberada quando $V_C = V_+$.

A energia acumulada durante os 880 s foi de 29,73 mJ, estimada a partir da variação de energia no módulo de armazenamento, o que corresponde a uma potência colhida de aproximadamente 33,8 μW , para este caso específico.

É possível observar na Figura 4.16 que assim que a carga é alimentada ocorre uma considerável queda no valor da tensão (V_0), visto que, maior quantidade de energia é requerida para inicialização do sistema do transceptor DF e sincronismo com o PA. Logo após, a curva de consumo fica cada vez menos acentuada até que se estabiliza 2,8 V, significando o equilíbrio entre a energia consumida pelo transceptor e a gerada pelo dispositivo piezoelétrico, permitindo assim, o funcionamento contínuo da aplicação.

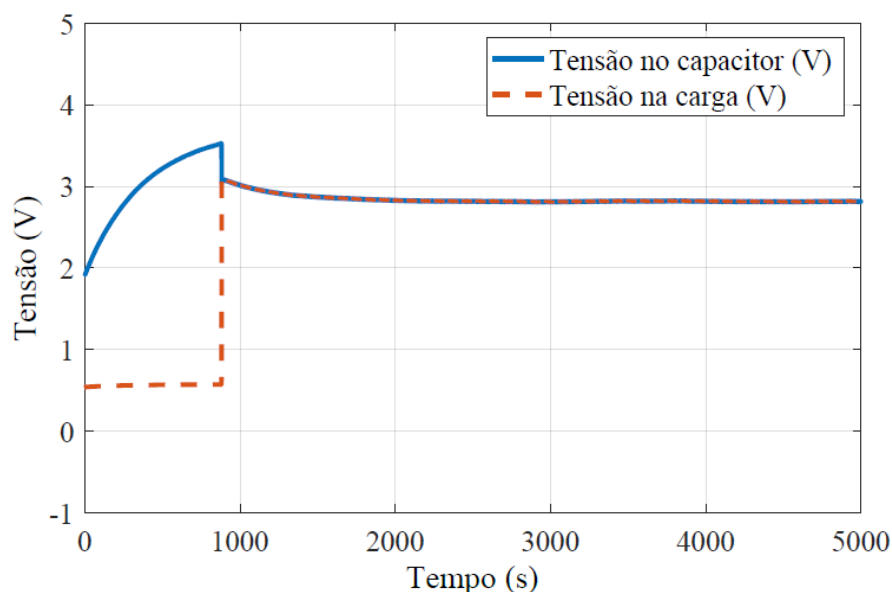


Figura 4.16 - Tensão no capacitor e no transceptor quando o gerador foi excitado em 0,5 g a 60 Hz.

O tempo total de carregamento do módulo (ou tempo de inicialização do sistema), depende da entrada de energia, determinada pelo gerador, menos a perda de energia do módulo (em torno de $2 \mu\text{W}$, segundo o fabricante). Como visto na Figura 4.14, o tempo de inicialização do sistema foi de 880 s, com o gerador vibrando em 60 Hz a 0,5 g. Nos experimentos seguintes, foi mantida a frequência de vibração e elevada a aceleração para 0,75 g e 1 g. Como resultado, o tempo de inicialização do sistema diminuiu para 228 s e 143 s, correspondendo a uma potência colhida de aproximadamente $130,4 \mu\text{W}$ e $207,9 \mu\text{W}$, respectivamente.

Foi avaliado também o comportamento do gerador quando mantida a aceleração em 0,5 g e ajustada a frequência primeiramente para 59 Hz e na sequência para 61 Hz. Nessas condições, o tempo de inicialização do sistema foi de 1244 s e 1447 s respectivamente. Dessa forma, os testes indicaram que uma quantidade de energia suficiente para alimentar o transceptor, também foi gerada quando o gerador esteve vibrando fora da sua frequência natural (60 Hz). Considerando acelerações maiores que 0,5 g, o intervalo de frequências em que o dispositivo gerador pode atuar, também aumentará. Mas, fica claro que a quantidade máxima de energia elétrica, sempre vai estar associada a ressonância da estrutura.

Foi verificado ainda que o nível de vibração mais baixo em que o gerador foi capaz de carregar o módulo de armazenamento foi de 0,4 g em 60 Hz. Nessas condições, o tempo de inicialização do sistema foi de aproximadamente 4300 s.

4.5.1 Validação do Dispositivo em Aplicações Reais

A energia disponível no ambiente na forma de vibrações mecânicas, geralmente não se apresenta como um único sinal sinusoidal. Até o momento, este trabalho, assim como a maioria das pesquisas existentes na literatura, se concentrou em investigar o desempenho do gerador sob uma única entrada de vibração senoidal, idealizada em laboratório. Este método é valioso para obter informações sobre o comportamento do sistema, mas, não é suficiente para entender como um dispositivo de coleta de energia piezoelétrica realmente se comportaria sujeito a uma fonte de vibração ambiente.

Diante disso, o transdutor desenvolvido foi submetido a fontes de vibrações reais existentes em nosso meio. As fontes selecionadas foram o condensador de um ar condicionado e um motor de indução trifásico acoplado ao sistema de bombeamento de água da Universidade Federal da Paraíba, como mostrado na Figura 4.17 (a) e (b).

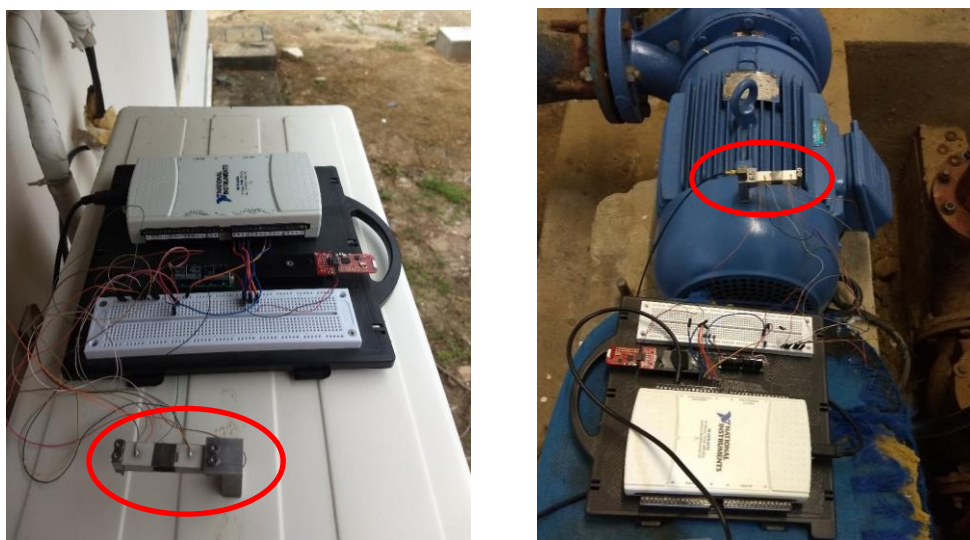


Figura 4.17 – Gerador acoplado as fontes de vibrações. Condensador do ar condicionado (a). Motor elétrico (b).

Para aquisição dos dados de vibração, tanto do condensador quanto do motor elétrico, o sistema de aquisição foi ajustado para calcular a média entre vinte pacotes de 2 s

com 50 mil amostras cada. O intervalo de tempo entre amostras foi de $\Delta t = 40 \mu s$ e a resolução em frequência de $\Delta f = 0,5 \text{ Hz}$. Foram utilizadas janelas do tipo *Hanning* no processamento dos sinais. Na Figura 4.18 é mostrado os dados de vibração das fontes selecionadas.

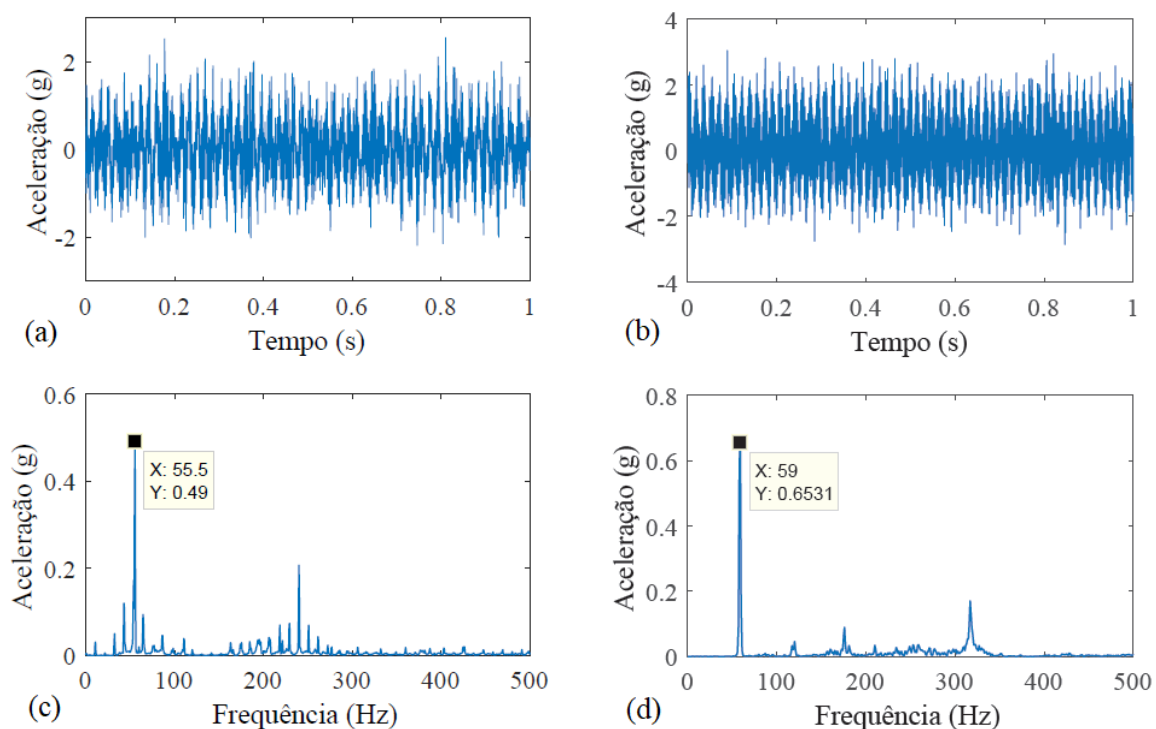


Figura 4.18 - Perfil de aceleração e Transformada Rápida de Fourier (FFT) das vibrações. (a) e (c) referem-se à vibração no motor. (b) e (d) referem-se à vibração no condensador.

Considerando o condensador, pode ser visto que o pico dominante de aceleração, de aproximadamente 0,49 g, encontra-se em 56 Hz. Já a vibração medida na carcaça do motor indica um pico de 0,68 g na frequência de 59 Hz. Os resultados dos experimentos com o gerador acoplado tanto na face superior do condensador quanto na parte superior da carcaça do motor, são apresentados nas Figura 4.19 e 4.20.

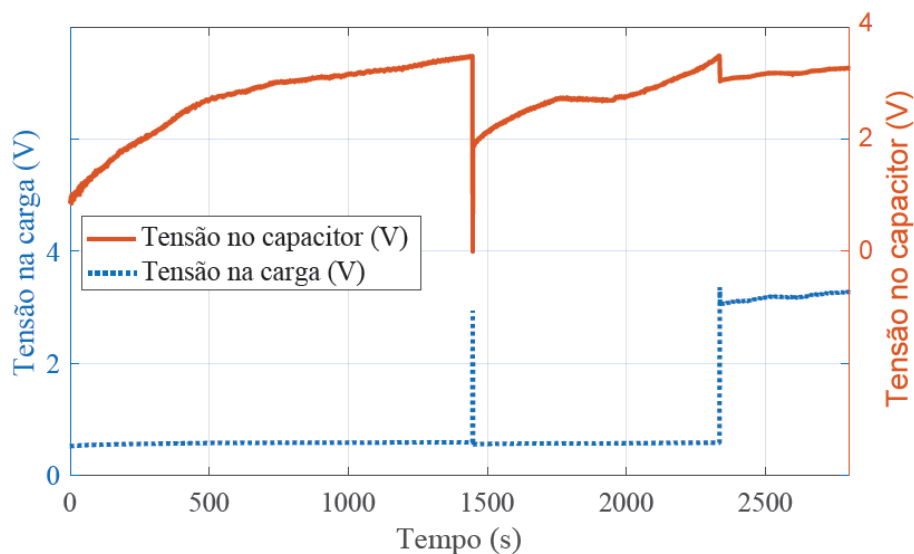


Figura 4.19 – Tensão elétrica através de capacitor e da carga. Gerador montado no condensador.

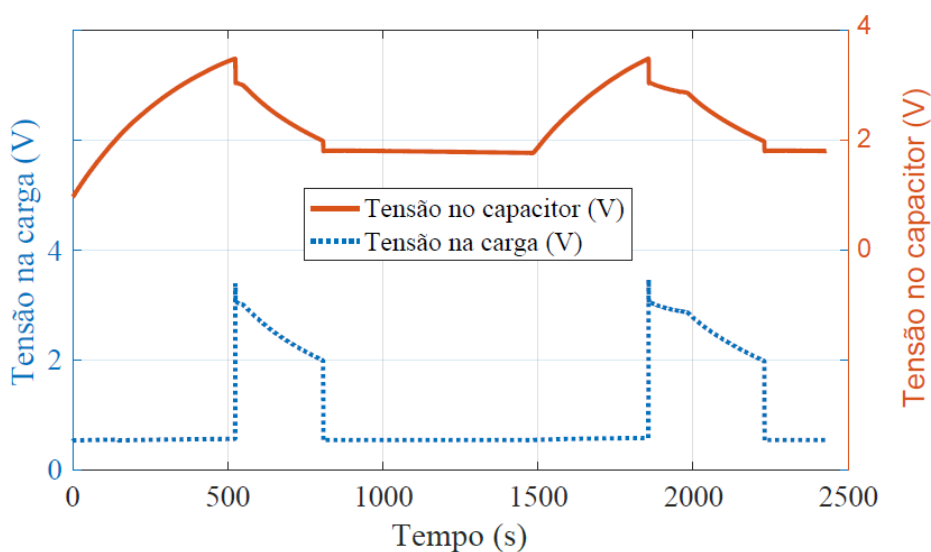


Figura 4.20 – Tensão elétrica através de capacitor e da carga. Gerador montado no motor.

Utilizando o condensador como fonte de vibração, o gerador precisou de 1446 s para carregar o módulo de energia, o qual, no início da geração, encontrava-se com menos de 1 V armazenado. Como ainda não havíamos colocado o PA em operação, o DF consumiu toda a energia disponibilizada em pouco mais de 1 s, buscando sincronia com um PA disponível. Enquanto o gerador carregava o módulo novamente, o aparelho de ar condicionado foi desligado, cessando por 208 s a fonte de vibração e consequentemente a geração. Ao voltar a operar, o módulo foi totalmente carregado e novamente alimentou o

transceptor DF, que ao ter seu sistema inicializado e sincronizado com o PA, passou a consumir apenas o necessário para a leitura e envio dos dados de temperatura. O valor cresceu da tensão sobre a carga (parte final do gráfico), indica que a quantidade de energia gerada está sendo superior a consumida pela aplicação. Pode ser visto ainda, que, mesmo havendo um período sem geração, o segundo ciclo de carga (888 s) foi menor que o primeiro, o que se deve a preexistência de 1.8 V de carga no início do segundo ciclo. Aproximadamente 43,7 μW foram captados no segundo ciclo.

No caso do motor, pode ser visto o comportamento de uma fonte de vibração intermitente, pois, o sistema de bombeamento de água é automático, controlado por sensores de nível. No momento em que o nível do reservatório baixou o motor entrou em funcionamento e o gerador carregou o módulo em 523 s. Logo que DE foi energizado o motor foi desligado por ter suprido o consumo de água. Como não havia energia sendo gerada no momento, o DF foi consumindo toda a energia antes acumulada, permanecendo em operação por alguns segundos. Quando o nível da água voltou a baixar e o motor a funcionar, um novo ciclo de carga se iniciou e o tempo de inicialização do sistema foi de 370 s, o que corresponde uma potência elétrica captada de 80,3 μW nesse ciclo. O tempo em que o motor permanece ligado ou desligado depende diretamente do consumo da água do reservatório. Nessa aplicação, tanto a fonte de vibração quanto o sistema de monitoramento funcionam de forma intermitente. Esse fato não se apresenta como um problema, desde que, a variável monitorada seja referente a própria fonte de vibração. Como exemplos, a temperatura ou velocidade de rotação do motor, a pressão ou a vazão da linha de água, ou ainda a elevação da temperatura ambiente na sala de máquinas enquanto os equipamentos estão em operação.

Durante os experimentos observou-se que o alcance do nó sensor foi de aproximadamente 12 m.

4.5.2 Consumo do nó sensor

Para obter a potência média consumida pelo microcontrolador e transceptor, foi inserido o resistor de 10 Ω em série com a alimentação destes. Foi medida a diferença de potencial nesse resistor com uma tensão de entrada de 3 V (correspondente a tensão das pilhas que originalmente o alimenta) conforme esquema da Figura 4.21. A forma de onda da tensão medida sobre o resistor pode ser vista na Figura 4.22. A corrente instantânea

máxima consumida pelo nó sensor na aplicação de monitoramento da temperatura foi de aproximadamente 26,1 mA, portanto, tem-se um consumo instantâneo de aproximadamente 71 mW. No entanto, esse é observado por um período de tempo menor que 5 ms a cada 5 s, como pode ser observado na Figura 4.22.

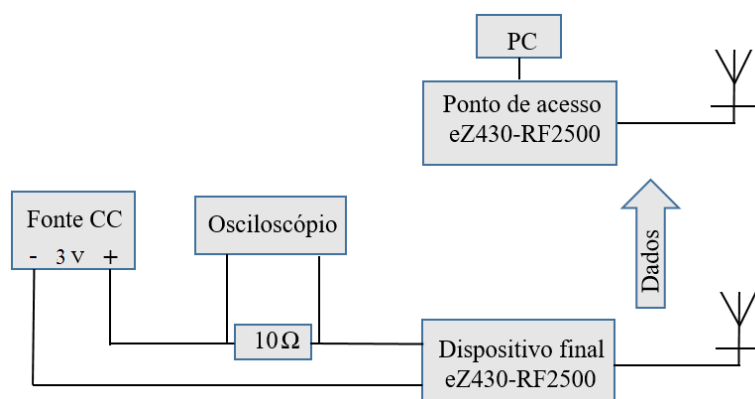


Figura 4.21 – Esquema para o teste de consumo.

Os dados são enviados ao PA uma vez a cada cinco segundos. Ao diminuir o ciclo de trabalho para transmissão de dados, tanto quanto possível, o transceptor e o MCU ficam ativos por um pequeno período de tempo, permitindo que um DF funcione por mais tempo consumindo menos. Na figura 4.22 é mostrado um dos picos após diminuir o intervalo de tempo no modo de alta resolução.

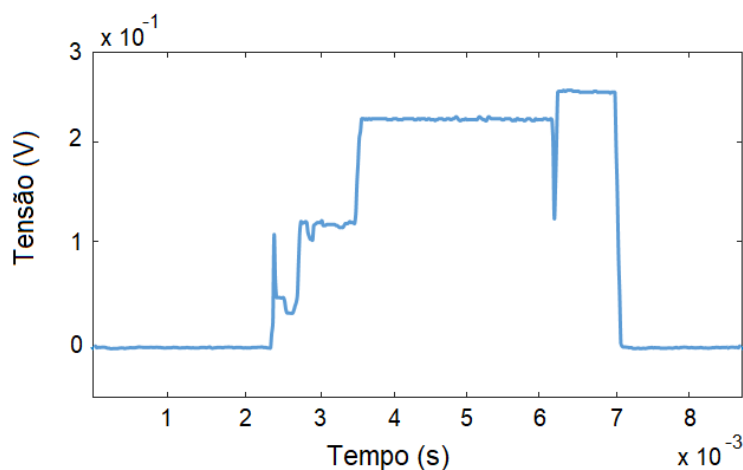


Figura 4.22 – Forma de onda no momento da leitura e transmissão de dados.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados o desenvolvimento e a avaliação do desempenho de um gerador de energia elétrica por meio de oito elementos piezoelétricos. Os estudos foram concentrados na verificação do comportamento eletromecânico de uma estrutura de vigas em balanço baseado em análises numéricas e experimentos.

As simulações numéricas, usando elementos finitos, mostraram-se de grande relevância para o desenvolvimento do trabalho, pois, previu um modelo de gerador com primeira frequência natural em torno de 60 Hz e 7,1 V de tensão elétrica gerada por cada PZT, resultados que viabilizaram a continuidade da pesquisa e nortearam o desenvolvimento estrutural para as simulações experimentais.

Os experimentos mostraram a capacidade de geração de energia elétrica do gerador proposto, com suas unidades geradoras gerando individualmente e interligadas em paralelo. A potência elétrica máxima de 9,6 mW com uma aceleração 2 g a uma frequência de 60 Hz, foi obtida considerando uma carga resistiva de 15 k Ω .

Para avaliar a aplicabilidade do gerador, o mesmo foi conectado em um módulo de armazenamento de energia que alimenta um circuito de comunicação sem fio. Os experimentos realizados em laboratório revelaram que houve energia suficiente para alimentar o nó sensor quando o dispositivo gerador foi excitado com vibrações a partir de 0,4 g em 60 Hz. Quanto maior foi o nível de vibração nesta frequência, menor foi o tempo de carga do módulo de armazenamento e de inicialização do sistema de comunicação. Também foram realizadas verificações fora do laboratório, utilizando fontes de vibrações reais existentes em nosso meio. Assim, quando o gerador foi acoplado a um condensador de ar condicionado, que apresentou 0,49 g em 56 Hz como pico dominante de vibração, o tempo de inicialização do sistema de comunicação foi de aproximadamente 888 s. Já com

o gerador colado na carcaça do motor elétrico, que apresentou o pico dominante de 0,68 g em 59 Hz, o tempo de inicialização do sistema foi 370 s. Em ambos os casos práticos, a energia elétrica gerada foi suficiente para manter o nó sensor operando continuamente enquanto a fonte de vibração estivesse ativa. Na forma como a aplicação foi desenvolvida, o nó sensor teve alcance máximo de 12 m, medido experimentalmente.

Tanto os experimentos em laboratório quanto os realizados utilizando fontes naturais de vibrações, indicaram que uma quantidade de energia elétrica, suficiente para manter o transceptor transmitindo, também foi gerada quando o gerador esteve vibrando fora da sua frequência natural (60 Hz). Mas, fica claro que a quantidade máxima de energia elétrica, sempre vai estar associada a ressonância da estrutura. Fato que determina o ponto ótimo de trabalho do gerador.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Diante dos resultados apresentados pelo gerador desenvolvido, pode-se sugerir alguns pontos para estudos complementares ou para o desenvolvimento de novos trabalhos. Segue alguns:

- Avaliar o comportamento do gerador com relação a variação de temperatura;
- Estudar a fadiga do material tanto em relação a temperatura de trabalho quanto as diversas frequências e amplitudes de vibrações mecânicas;
- Estudo de um gerador multimodal, como o esboço mostrado na Figura 5.1, possibilitando elevar o rendimento do transdutor por meio do aproveitamento de mais de uma frequência natural.

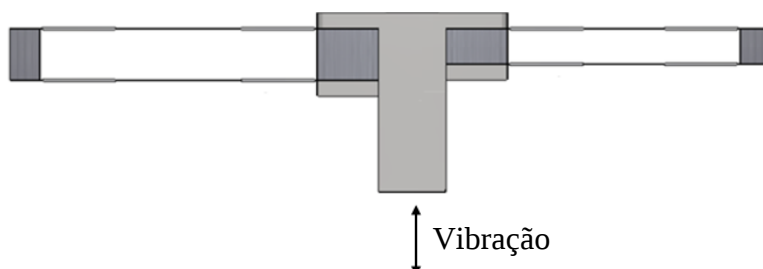


Figura 5.1 – Esboço de um transdutor piezoelétrico multimodal.

REFERÊNCIAS

- ABDELKFI A. *Global Nonlinear Analysis of Piezoelectric Energy Harvesting from Ambient and Aeroelastic Vibrations*. M.Sc. Virginia Polytechnic Institute, 2012.
- ABDELKAREEM A. A. M.; XU L.; ALI M. K. A.; *et al.* “Vibration energy harvesting in automotive suspension system: A detailed review”. *ELSEVIER, Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.030>, 2018.
- ADL. Advanced Linear Devices, Inc.: Datasheet: EH300/301 e-pad energy harvesting modules, Vers. 2.2, 2015.
- ALRASHDAN M. H. S.; MAJLIS B. Y.; HAMZAH A. A.; MARSI N. “*Design and Simulation of Piezoelectric Micro Power Harvester for Capturing Acoustic Vibrations*”. *IEEE*, Langkawi, Malaysia, 2013.
- AMINI Y.; EMDAD H.; FARID M. Finite Element Modeling of Functionally Graded Piezoelectric Harvesters. *ELSEVIER, Composite Structures*, 2015.
- BADEL A.; BENAYAD A.; LEFEUVRE E.; *et al.* “Single Crystals and Nonlinear Process for Outstanding Vibration-Powered Electrical Generators”. *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 53, no. 4, abril 2006.
- BAKER J.; ROUNDY S.; WRIGHT P. “Alternative Geometries for Increasing Power Density in Vibration Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks”. *3rd International Energy Conversion Engineering Conference*, San Francisco, California, 15 - 18 August 2005.
- BEKER I.; ZORLU O.; KÜLAH H.; MUHTAROĞLU A. “Hybrid Energy Harvesting From Keyboard”. *IEEE*, 2011.
- BUTTON V. L. S. N.; COSTA E. T. Simulação por elementos finitos da polarização de cerâmicas piezoelétricas. *RBE - Caderno de Engenharia Biomédica*, v. 13, n. 3, p. 31-43, Edição Especial: Engenharia Biomédica na América Latina, julho 1997.

CASIMIRO F.; GASPAR P. D.; GONÇALVES L. C. “Aplicação do princípio piezoelétrico no desenvolvimento de pavimentos para aproveitamento energético”. *III Conferência Nacional em Mecânica de Fluidos, Termodinâmica e Energia, MEFTE – Bragança*, 2009.

CHA Y.; WOJIN C.; HUBERT K.; et al. “Energy Harvesting from a Piezoelectric Biomimetic Fish Tail”. *ELSEVIER, Renewable Energy*. 86: 449-458. 2016.

CHANG W. T.; CHEN Y. C.; LIN R. C.; CHENG C. C.; KAO K. S.; WU B. R.; HUANG Y. C. Design and fabrication of a piezoelectric transducer for wind-power generator. 2011

CHO S. J. and KIM J. H. Linear electromagnetic electric generator for harvesting vibration energy at frequencies more than 50Hz. *SAGE. Journals. Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, 2017.

DANIELS A.; ZHU M.; TIWARI A. “Design, analysis and testing of a piezoelectric flex transducer for harvesting bio-kinetic energy”. *IOPSCIENCE, Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 476, 2013.

DATTA, S. Piezoelectric Materials: Crystal Orientation and Poling Direction. *COMSOL*, 2014. Disponível em: <<https://br.comsol.com/blogs/piezoelectric-materials-crystal-orientation-poling-direction/>>. Acessado em: 01 de abril de 2019.

DAYAL R.; PARSA L. Hybrid Start-up Strategy for Low Voltage Electromagnetic Energy Harvesting Systems. *IEEE*, 2012.

DINEVA P. S.; GROSS D.; MULLER R.; RANGELOV T. “Piezoelectric Materials. In_ Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials, Solid Mechanics and Its Applications”. *Springer International Publishing*. Cap. 2, p. 07-32, Switzerland, 2014.

EDDIAI A.; MEDDAD M.; FARHAN R.; et al. “Using PVDF Piezoelectric Polymers to Maximize Power Harvested by Mechanical Structure”. *ELSEVIER, Superlattices and Microstructures*. doi: 10.1016/j.spmi.2018.03.044, 2018.

ELANZEERY H. M. G. E. M. “Novel Radio Frequency Energy Harvesting Model”. *IEEE international Power Engineering and Optimization Conference*, Malaysia, june 2012a.

ELANZEERY H. M. G. E. M. “Frequency Survey Simulation for Developing Novel Radio Frequency Energy Harvesting Model”. *IEEE 14th International Conference on Modelling and Simulation*, 2012b.

FANGA H. B.; LIUA J. Q.; XUB Z. Y.; DONGA L.; WANGB L.; CHENA D.; CAIA B. C.; LIUB Y. Fabrication and Performance of MEMS-based piezoelectric Power generator for vibration energy harvesting. *Microelectronics Journal* 37, 2006.

FENG G. H.; TSAI M. Y. Green Vehicle Sock Absorber: Micromachined Wavy Shaped Piezoelectric Cushion Energy Harvester and its Power Generating Bemonstration Based on Real Navigation. *IEEE, Transducers'11*, Beijing, China, June 5-9, 2011.

GODOY T. C. Modelagem de Placas Laminadas com Materiais Piezoelétricos Conectados a Circuitos Shunt Resistivo-indutivo. Dissertação. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2008.

GONÇALVES T. R. S. Colheita Piezoelétrica de Energia. Dissertação. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.

GORLATOVA M.; SARIK J.; GREBLA G.; *et al.* “Movers and Shakers: Kinetic Energy Harvesting for the Internet of Things”. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, DOI 10.1109/JSAC.2015.2391690, 2015.

HARB A. “Energy harvesting: State-of-the-art”. *ELSEVIER, Renewable Energy*. doi: 10.1016/j.renene.2010.06.014, No. 36, pp. 2641-2654, 2011.

HE J.; WEN T.; QIAN S.; *et al.* “Triboelectric-piezoelectric-electromagnetic Hybrid Nanogenerator for High-efficient Vibration Energy Harvesting and Self-powered Wireless Monitoring System”. *Nano Energy*, 2017.

HOSEONG K.; DONGKIL C.; SUNGMIN G.; KYUNGJIN P. Stray Electric Field Energy Harvesting Technology Using MEMS Switch from Insulated AC Power Lines. *Electronics Letters*, Vol. 50, No. 17, pp. 1236–1238, 14 August, 2014.

HOWELLS A. C. Energy Conversion and Management. Published by Elsevier Ltd. 2009.

HOWEY D. A.; BANSAL A.; HOLMES A. S. “Design and performance of a Centimetre-scale Shrouded Wind Turbine for Energy Harvesting”. *IOP Publishing, Smart Materials and Structures*, 2011.

HU S.; CHUANG K.; TZOU H. “PVDF Energy Harvester on Flexible Rings”. *IEEE*, 2010.

IANNACCI J. “Internet of things (IoT); internet of everything (IoE); tactile internet;5G – A (not so evanescent) unifying vision empowered by EH-MEMS(energy harvesting

MEMS) and RF-MEMS (radio frequency MEMS)”. *ELSEVIER, Sensor and Actuators A: Physical*, 272, 187–198, 2018.

ILIK B.; KOYUNCUOGLU A.; SARDAN-SUKAS O.; KÜLAH H. “Thin film piezoelectric acoustic transducer for fully implantable cochlear implants”. *ELSEVIER: Sensors and Actuators A: Physical*, 280, 38–46, 2018.

JANPHUANG P.; ISARAKORN D.; BRIAND D.; ROOIJ N. F. “Energy Harvesting from a Rotating Gear Using an Impact Type Piezoelectric Mems Scavenger”. *IEEE, Transducers’11*, Beijing, China, June 5-9, 2011.

JIA W.; VALDÉS-RAMÍREZ G.; BANDODKAR A. J. et al. “Epidermal Biofuel Cells: Energy Harvesting from Human Perspiration”. *Angewandte Chemie. Biofuel Cells*. doi: 10.1002/anie.201302922. No. 52, pp. 7233 –7236, 2013.

JORNET J. M.; AKYILDIZ I. F. Joint Energy Harvesting and Communication Analysis for Perpetual Wireless Nanosensor Networks in the Terahertz Band. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 11, no. 3, may 2012.

KAMALINEJAD P.; MAHAPATRA C.; SHENG Z.; S. et al. “Wireless Energy Harvesting for the Internet of Things”. *IEEE Energy Harvesting Communications*, 2015.

KAMAT P. V. Harvesting photons with carbon nanotubes. *Nano Today*, vol. 1, no. 4, pp. 20–27, 2006.

KHALIGH A.; ZENG P.; ZHENG C. “Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies: State of the Art”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 3, march 2010.

KOYAMA D.; NAKAMURA K. Electric power generation using a vibration of a polyurea piezoelectric thin film. *IEEE*, 2008.

KOYAMA D.; NAKAMURA K. Array configurations for higher power generation in piezoelectric energy harvesting. *IEEE*, 2009.

KULKARNI V.; BEN-MRAD R.; PRASAD S. E.; NEMANA S. “A shear-mode energy harvesting device based on torsional stresses”. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, pp. 801–807, 2014.

KUMAR V. N.; MANJUNATH S. S.; “A Reliable Ultracapacitor Based Solar Energy Harvesting system for Wireless Sensor Network Enabled Intelligent Buildings”. *IEEE, Intelligent Agent and Multi-Agent Systems (IAMA)*, Chennai, India, 2011.

LEE S.; YOUN B. D.; JUNG B. C. “Robust Segment-type Energy Harvester and Its Application to a Wireless Sensor”. *IOPSCINCE. Smart Mater*, 2009.

LEE S.; YOUN B. D. “Designing energy harvesting skin structure utilizing outdoor unit vibration”. *International Design Engineering Technical Conferences e Computers and Information in Engineering Conference*, Montreal, Quebec, Canada, 2010.

LEE S.; YOUN B. D. “A New Piezoelectric Energy Harvesting Design Concept: Multimodal Energy Harvesting Skin”. *IEEE, Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 58, no. 3, March 2011.

LELAND E. S.; BAKER J.; CARLETON E.; et al. “Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers”. *IEEE Pervasive Computing*. Vol. 4, 2005.

LEO, DONALD J. *Engineering Analysis of Smart Material Systems*. ISBN: 0471-68477-5, New Jersey: John Wiley & Sons Inc. 2008.

LI L.; XU J.; LIU J.; GAO F. “Recent progress on piezoelectric energy harvesting: structures and materials”. *Springer, Advanced Composites and Hybrid Materials*. <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0046-1>, 2018.

LI Z.; SAADATNIA Z.; YANG Z.; NAGUIB H. “A Hybrid Piezoelectric-triboelectric Generator for Low-frequency and Broad-bandwidth Energy Harvesting”. *ELSEVIER. Energy Conversion and Management*. 174: 188-197. 2018.

LUO C.; HOFMANN H. F. “Wideband Energy Harvesting for Resonant Piezoelectric Devices”. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Atlanta, 2010.

MACIAS, F.A. Energy harvesting. *Soldiers Magazine* Jan. 2011: 46. *Academic OneFile*. Disponível <<http://go.galegroup.com.ez15.periodicos.capes.gov.br/ps>>. Acessado em: 11 de dezembro de 2012.

MALLICK D.; CONSTANTINOU P.; PODDER P.; ROY S. “Multi-frequency MEMS Electromagnetic Energy Harvesting”. *ELSEVIER, Sensor and Actuators A: Physical*, DOI: <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.sna.2017.08.002>, 2018.

MARTÍNEZ F. J. J.; FRUTOS J.; ALONSO D.; VÁZQUEZ M. “Optimización de Piezoeléctricos Comerciales Parasu Uso en Sistemas de Energy Harvesting”. *ELSEVIER. Boletín de la Sociedade Española de Cerâmica y Vidrio*, 2015.

MATIKO J. W.; GRABHAM N. J.; BEEBY S. P.; TUDOR M. J. “Review of the Application of Energy Harvesting in Buildings”. *IOP publishing. Measurement Science and Technology*, 2014.

M'BOUNGUI G.; ADENDORFF K.; NAIDOO R.; et al. “A Hybrid Piezoelectric Micro-power Generator for Use in Low Power Applications”. *ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015.

MHETRE R. M.; NAGDEO N. S.; ABHYANKAR H. K. “Micro Energy Harvesting for Biomedical Applications: A Review”. *IEEE, 3rd International Conference on Electronics Computer Technology*. Kanyakumari, India, 2011.

MITCHESON P. D. Energy Harvesting for Human Wearable and Implantable Bio-Sensors. 32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS Buenos Aires, Argentina, August 31 - September 4, 2010.

MITCHESON P. D.; YEATMAN E. M.; RAO G. K.; HOLMES A. S.; GREEN T. C.; Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. 2008.

MITCHESON P. D.; Miao P.; Stark B. H.; et al. “MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation”. *ELSEVIER, Sensors and Actuators A: Physical*. No. 115, pp. 523–529, 2004.

NAKASONE P. H. *Estudo de viabilidade de uma bomba de fluxo piezelétrica utilizando simulação computacional*. M.Sc. Universidade de São Paulo, 2006.

NIYATO D.; IN KIM D.; WANG P.; SONG L. “A Novel Caching Mechanism for Internet of Things (IoT) Sensing Service with Energy Harvesting”. *IEEE ICC 2016 - Communications Software, Services and Multimedia Applications Symposium*, 2016.

OTIS B. P. *Ultra-Low Power Wireless Technologies for Sensor Networks*. M.Sc. University of California, Berkeley. 2005.

OTTMAN G. K.; HOFINANN H. F.; LESIEUTRE G. A. Optimized Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Using Step-Down Converter in Discontinuous Conduction Mode. 2002.

PARES C. *Transições de fases estruturais do sistema PZT, estudados por espectroscopia no infravermelho*. M.Sc. Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006.

PRATHIBHA V.; ARUNA T. “Enhancing the Network Lifetime of Cooperative Wireless Sensor Networks Using Energy Harvesting Technique”. *IEEE, International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, 2014.

PINNA L.; DAHIYA R. S.; NISI F. D.; VALLE M. “Analysis of Self-Powered Vibration Based Energy Scavenging System”. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Bari, Italy, 2010.

PI CERAMIC. Piezoelectric Ceramic Products: Fundamentals, Characteristics and Applications. PI Ceramic GmbH, Lindenstrasse, Lederhose, Germany. Disponível em: <<https://www.piceramic.com/en/products/piezoceramic-materials/>>. Acessado em: 13 de novembro de 2018.

QIU J.; LIN B.; LIU P.; ZHANG S.; DAI G. “Energy Level Based Transmission Power Control Scheme for Energy Harvesting WSNs”. *IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM*, Kathmandu, Nepal, 2011.

RABAEY J. M.; WRIGHT P. K.; SUNDARARAJAN V. Improving Power Output for Vibration-based Energy Scavengers. *Pervasive Computing, IEEE*, vol. 4, pp. 28-36, 2005.

RAKBAMRUNG P.; LALLART M.; GUYOMAR D.; *et al.* “Performance comparison of PZT and PMN-PT piezoceramics for vibration energy harvesting using standard or nonlinear approach”. *ELSEVIER. Sensors and Actuators A: Physical*. 163, pp. 493-500, 2010.

RAMADASS Y. K.; CHANDRAKASAN A. P. An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor. *Journal of Solid-state Circuits*, vol. 45, no. 1, january 2010.

RANGEL R. F.; SOUTO C. R.; SANTOS A. J. V.; PIMENTEL R. L. “Generation of electricity using tubular PZT”. *IEEE, International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 1-6, Torino, 2015.

RAHMAN, A.A.A. ; RASHID, N.A. ; AZIZ, A.S.A. ; WITJAKSONO, G. “Design of Autonomous Micro-Solar Powered Energy Harvesting System for Self-Powered Batteries-less Wireless Sensor Mote”. *IEEE, Electronics goes green*, pp. 1-4, 2012.

ROCHA J. G.; GONÇALVES L. M.; ROCHA P. F.; et al. “Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 3, march 2010.

ROSELLI B. L.; ALIMENTI F.; ORECCHINI G.; et al. “Electronics Systems for Internet of Things Enabled by Energy Harvesting”. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 102, No. 11, November 2014.

SAADON S.; SIDEK O. “A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters”. *ELSEVIER, Energy Conversion and Management*, v. 52, p. 500-504, 2011.

SAKAMOTO, J. M. S. *Sensor em fibra óptica aplicado à caracterização de atuadores piezoelétricos*. M.Sc. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, 2006.

SOUTO, C. R. *Controle ativo de vibração em placas usando atuadores piezoelétricos – aplicação a atenuação de ruídos em ambientes fechados*. D.Sc. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

SRIRAMDAS R.; CHIPLUNKAR S.; CUDUVALLY R. M.; PRATAP R. “Performance enhancement of piezoelectric energy harvesters using multilayer and multistep beam configurations” *IEEE Sensors Journal*, Vol. 15, pp. 3338 – 3348, 2015.

TABESH A.; FRÉCHETTE L. G. A Low-Power Stand-Alone Adaptive Circuit for Harvesting Energy From a Piezoelectric Micropower Generator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 3, march 2010.

TASHIRO K.; WAKIWAKA H.; INOUE S.; AND UCHYAMA Y. “Energy Harvesting of Magnetic Power-Line Noise”. *IEEE, Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, October 2011.

TI. Texas Instruments. *eZ430-RF2500 Development Tool, User's Guide*. Literature Number: SLAU227E, September 2007, Revised April 2009.

TI. Texas Instruments. Datasheet: *MSP430x22x2, MSP430x22x4 Mixed signal microcontroller*. Literature Number: SLAS504C , July 2006, Revised may 2009.

TI. Texas Instruments. Datasheet: *CC2500, Low-Cost Low-Power 2.4 GHz RF Transceiver*. Literature Number: SWRS040C, 2009.

TI. Texas Instruments. *Wireless Sensor Monitor Using the eZ430-RF2500*. Literature Number: SLAA378B, December 2007, Revised September 2008.

TOYABUR R.; SALAUDDIN M.; CHO H.; PARK J. “A Multimodal Hybrid Energy Harvester Based on Piezoelectric-electromagnetic Mechanisms for Low-frequency Ambient Vibrations”. *ELSEVIER, Energy Convers Manage*, 168: 454–66. 2018.

Wendy H.. *American Ceramic Society Bulletin*. Vol. 89, 2010. Disponível em: <<http://go.galegroup.com.ez15.periodicos.capes.gov.br/ps>> Acessado em: 11 de dezembro de 2012.

WOOLARD D.; ZHAO P.; RUTHERGLEN C.; YU Z.; BURKE P.; BRUECK S.; STINTZ A. Nanoscale imaging technology for thz-frequency transmission microscopy. *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 205– 222, 2008.

XIAOJIN Z.; MIAO Z.; ZHIYUAN G.; ZHIYAN C. Analysis of Active Vibration Control for Piezoelectric Intelligent Structures by ANSYS and MATLAB. *IEEE. International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM)*, 2010.

XU S.; HANSEN B. J.; WANG Z. L. “Piezoelectric-nanowire-enabled power source for driving wireless microelectronics”. *Nature Communications*. vol. 1, pp. 1–5, Oct. 2010.

YANG Z.; ZHOU S.; ZU J.; INMAN D. High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications. *JOULE*, Elsevier Linc, pp. 1 51, April 18, 2018.

YESNER G.; KUCIEJ M.; SAFARI A.; JASIM A.; WANG H.; MAHER A. Piezoelectric Energy Harvesting Using a Novel Cymbal Transducer Design. Joint *IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics*, European Conference on Application of Polar Dielectrics, and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (ISAF/ECAPD/PFM), Darmstadt, 2016.

YESNER G.; SAFARI A.; JASIM A.; WANG H.; BASILY B.; MAHER A. Evaluation of a Novel Piezoelectric Bridge Transducer. Joint *IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectric (ISAF)/International Workshop on Acoustic Transduction Materials and Devices (IWATMD)/Piezoresponse Force Microscopy (PFM)*, Atlanta, USA, 2017.

YESNER G.; JASIM A.; WANG H.; BASILY B.; MAHER A.; SAFARI A. Energy Harvesting and Evaluation of a Novel Piezoelectric Bridge Transducer. *ELSEVIER, Sensors and Actuators A: Physical*. Accepted Manuscript, 2018.

YOUSEFI-KOMA A. Piezoelectric Ceramics as Intelligent Multifunctional Materials. In: SHAHINPOOR, M. and SCHNEIDER, H. *Intelligent Materials*. ISBN: 978-085404-335-4, RSCPublishing. Cap. 9. P. 231-254. 2018.

ZHANG H.; ZHANG X. S.; CHENG X. “A flexible and implantable piezoelectric generator harvesting energy from the pulsation of ascending aorta: in vitro and in vivo studies”. *ELSEVIER, Nano Energy*, Vol. 12, pp. 296–304, March 2015.

ZHAO, J.; ZHENG, X.; ZHOU, L. “Investigation of a d15 mode PZT-51 piezoelectric energy harvester with a series connection structure”. *IOP SCIENCE, Smart Materials and Structures*. Vol. 1, No. 10, 2012.

ZHU M.; WORTHINGTON M.; NJUGUNA J. “Analyses of Power Output of Piezoelectric Energy-Harvesting Devices Directly Connected to a Load Resistor Using a Coupled Piezoelectric-Circuit Finite Element Method”. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 56, no. 7, July 2009a.

ZHU M.; WORTHINGTON M.; TIWARI A. “Design Study of Piezoelectric Energy-Harvesting Devices for Generation of Higher Electrical Power Using a Coupled Piezoelectric-Circuit Finite Element Method”. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 57, no. 2, February 2010.

ZHU M.; WORTHINGTON M. “Design and Testing of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Generation of Higher Electric Power for Wireless Sensor Networks”. *IEEE*, 2009b.