

RENATO FRANKLIN RANGEL

**CARACTERIZAÇÃO DE UMA CÉLULA TUBULAR PIEZOELÉTRICA PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Cícero da Rocha Souto

JOÃO PESSOA

2014

RENATO FRANKLIN RANGEL

**CARACTERIZAÇÃO DE UMA CÉLULA TUBULAR PIEZOELÉTRICA PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Cícero da Rocha Souto

JOÃO PESSOA

2014

R196c Rangel, Renato Franklin.
Caracterização de uma célula tubular piezoelétrica para
geração de energia elétrica / Renato Franklin Rangel.-- João
Pessoa, 2014.
104f. : il.
Orientador: Cícero da Rocha Souto
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR
1. Engenharia elétrica. 2. Colheita de energia. 3. Energia
alternativa. 4. Materiais piezoelétricos. 5. Cilindro piezoelétrico.

UFPB/BC

CDU: 621.3(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

**CARACTERIZAÇÃO DE UMA CÉLULA TUBULAR PIEZOELÉTRICA PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Elaborado por

RENATO FRANKLIN RANGEL

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA

PROF. Dr. CÍCERO DA ROCHA SOUTO
(Presidente)

PROF. Dr. SIMPLÍCIO ARNAUD DA SILVA
(Membro interno)

PROF. Dr. ROBERTO LEAL PIMENTEL
(Membro externo)

João Pessoa/PB, ____ de _____ de _____.

Aos meus pais José Renato e Maria Iêda, e aos meus irmãos Igor e Rubens, pelo
tempo que deixamos de estar juntos.
Aos meus amigos/irmãos, Carlos, Jaime, Marcos, Jessé, Bruno, Mairon, Marco,
Marcio e Humberto, pelo companheirismo.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto, pela dedicação nas correções e orientações neste período de aprendizado.

Ao Prof. Alexsandro, pelo apoio em laboratório.

Aos meus colegas de laboratório e de pós-graduação que tornaram um período de longa dedicação em algo divertido.

À Universidade Federal da Paraíba, pelo apoio técnico e estrutural.

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

“A leitura após certa idade distrai excessivamente o espírito humano das suas reflexões criadoras. Todo o homem que lê de mais e usa o cérebro de menos adquire a preguiça de pensar.”

Albert Einstein.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VI
RESUMO.....	IX
ABSTRACT.....	X
1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 CAPTAÇÃO DE ENERGIA.....	16
2.2 ALGUMAS FONTES E CONFIGURAÇÕES PARA CAPTAÇÃO DE ENERGIA.	16
2.3 CAPTAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS. ...	22
3 PROPOSTA DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS	37
3.1 PIEZOELETRICIDADE.....	37
3.1.1 Piezoeletricidade linear.....	40
3.1.2 Elemento piezoelétrico como sensor ou atuador.....	42
3.2 DISCUSSÕES A CERCA DA PROPOSTA DE COLHEITA E CONVERSÃO DA ENERGIA CINÉTICA EM ELÉTRICA.....	46
4 MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL	52
4.1.1 Desenvolvimento das simulações via <i>software</i>	52
4.2 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	59
4.2.1 Estrutura experimental	59
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
5.1 MODELAGEM NUMÉRICA	67
5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	75
6 CONCLUSÕES	97
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
REFERÊNCIAS.....	99

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Camadas do toroide envolvendo uma linha de potência. (a) corte (b) perspectiva (morais, 2013)	17
Figura 2.2 – Dispositivo de captação de energia eólica (QIU et al., 2011)	18
Figura 2.3 – Modelo de microgerador híbrido (BEKER et al., 2011)	21
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)..	23
Figura 2.5 – Seção transversal do gerador (FANGA et al., 2006)	24
Figura 2.6 – Configuração final do dispositivo analisado (KOYAMA et al., 2008)	25
Figura 2.7 – Configurações dos conjuntos de vigas e PZTs – vista superior (KOYAMA et al., 2009)	25
Figura 2.8 – Modelo CPC-FEM desenvolvido ligado diretamente a uma resistência (ZHU et al., 2009)	26
Figura 2.9 – Modelo CPC-FEM desenvolvido (ZHU et al., 2010)	27
Figura 2.10 – Protótipo do PEHD fixado no shaker através do suporte de alumínio (ZHU et al., 2009)	28
Figura 2.11 - 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).	28
Figura 2.12 – Distribuição da deformação: (a) viga retangular; (b) viga trapezoidal; (c) viga triangular (SHEBEEB et al. 2010)	29
Figura 2.13 – Efeito de cancelamento: a) primeiro modo; b) segundo modo (LEE et al. 2009)....	30
Figura 2.14 - Transdutor piezoelétrico: a) modelo FEA; b) protótipo (LEE et al. 2009)	31
Figura 2.15 – Retirada de material piezoelétrico nas linhas de inflexão. (a) unimodal (primeiro modo); (b) multimodal (primeiro e segundo modo) (LEE et al. 2011)	32
Figura 2.16 – Linhas de inflexão no material piezoelétrico (transformador). (a) unimodal (primeiro modo); (b) multimodal (primeiro e segundo modo) (LEE et al. 2011)	32
Figura 2.17 – a) Modelo de proposta do amortecedor de choques alto-gerador; b) Módulo de uma roda para simulação em estrada de teste (FENG et al., 2011)..	33
Figura 2.18 – Gerador proposto: a) dois filmes do polímero a cima do solado; b) Circuito implementado para o protótipo final (ROCHA et al. 2010)	34
Figura 2.19 – Dispositivo gerador (HOWELLS 2009)	35
Figura 2.20 – Nano gerador piezoelétrico (JORNET et al., 2012)	35

Figura 3.1 - Estrutura atômica do PZT. (a) Estado tetragonal distorcido; (b) Estado cúbico (SAKAMOTO, 2006)	39
Figura 3.2 - Polarização de uma cerâmica ferroelétrica. (a) Material sem polarização; (b) Aplicação de campo elétrico; (c) Após a polarização (SAKAMOTO, 2006).....	40
Figura 3.3 - Esquema representativo do efeito piezoelétrico direto (CASIMIRO et al., 2009)	43
Figura 3.4 - Direções de deformação e de polarização de uma placa piezoelétrica (SOUTO, 2008)	44
Figura 3.5 - Piezocerâmica polarizada. (a) Campo elétrico com sentido oposto à polarização elétrica; (b) Campo elétrico com o mesmo sentido da polarização elétrica (SAKAMOTO, 2006).	45
Figura 3.6 – Modos de operação de um elemento piezoelétrico. (a) modo 33; (b) modo 31 (PRIYA e INMAN, 2009)	47
Figura 3.7 – Dimensões físicas do cilindro de PZT.	48
Figura 3.8 – Formar retangular correspondente ao cilindro de PZT.....	49
Figura 4.1 - Elemento sólido SOLID226 para simulação do piezoelétrico (ANSYS 14, 2011).....	53
Figura 4.2 – Cilindro piezoelétrico na simulação. (a) geometria; (b) malha de elementos finitos.....	56
Figura 4.3 – Cilindro submetido à análise harmônica.....	58
Figura 4.4 – Esquema para compressão do cilindro piezoelétrico.	59
Figura 4.5 – Esquema do aparato mecânico montado para o estudo da piezocerâmica.	60
Figura 4.6 – Elemento piezoelétrico e suas bases de acomodação.....	61
Figura 4.7 – Sensores. (a) Sensor de força 208C03; (b) acelerômetro 393B04	62
Figura 4.8 – Montagem experimental para estudo do PZT	62
Figura 4.9 – Bases de acomodação para o conjunto de três células	63
Figura 4.10 – Montagem experimental para estudo do conjunto de PZT's	63
Figura 4.11 – Esquemático da montagem experimental	64
Figura 4.12 – Bancada de trabalho experimental.....	65
Figura 5.1 – Segundo modo de vibração (21415Hz).....	67
Figura 5.2 – Terceiro modo de vibração (39961Hz)	68
Figura 5.3 – Elemento Piezoelétrico comprimido	69
Figura 5.4 – Deslocamento em z para 300 Hz	69
Figura 5.5 – Deslocamentos em x, y e z....	70
Figura 5.6 – Deslocamento em função da frequência	71

Figura 5.7 – Deslocamento em função da frequência	71
Figura 5.8 – Configuração das condições de contorno elétrica na célula (polaridade). (a) área interna polarizada (-); (b) área externa polarizada (+).....	72
Figura 5.9 – Tensão elétrica gerada em 300Hz.	73
Figura 5.10 – Tensão elétrica no nó 231	73
Figura 5.11 – Tensão elétrica no nó 74 na frequência de ressonância	74
Figura 5.12 – Tensão elétrica e força de compressão em função da frequência	76
Figura 5.13 – Espéctro com as frequências naturais da estrutura experimental	77
Figura 5.14 – Excitador eletromagnético sem carga	78
Figura 5.15 – Espéctro com as frequência natural do atuador	78
Figura 5.16 – Comportamento do sinal de aceleração do <i>shaker</i> atuando sem carga e do sinal de tensão elétrica gerado no PZT em função da frequência.....	79
Figura 5.17 – Tensão elétrica e aceleração em função da frequência	80
Figura 5.18 – Tensão elétrica e deslocamento em função da frequência.	81
Figura 5.19 – Gerador piezoelétrico com impedância interna ‘z’ alimentando uma carga de impedância ‘Z’.	82
Figura 5.20 – Tensão elétrica e impedância resistiva em função da frequência..	83
Figura 5.21 – Tensão e potência elétrica em função da frequência.	84
Figura 5.22 – Tensão elétrica e força de compressão em função da frequência	85
Figura 5.23 – Tensão elétrica e impedância resistiva em função da frequência	86
Figura 5.24 – Tensão e potência elétrica em função da frequência	86
Figura 5.25 – Relação da tensão elétrica gerada em cada célula com a força de compressão sofrida pela estrutura em função da frequência	88
Figura 5.26 – Relação da tensão elétrica dos PZT’s interligados em série com a força de compressão em função da frequência.....	90
Figura 5.27 – Relação da tensão elétrica dos PZT’s em paralelo com a força de compressão em função da frequência.....	91
Figura 5.28 – Relação da tensão elétrica gerada em cada célula com a força de compressão sofrida pela estrutura em função da frequência	92
Figura 5.29 – Relação da tensão elétrica dos PZT’s em série com a força de compressão em função da frequência.....	93
Figura 5.30 – Relação da tensão elétrica dos PZT’s interligados em paralelo com a força de compressão em função da frequência.....	93

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO DE UMA CÉLULA TUBULAR PIEZOELÉTRICA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Atualmente tem sido alvo de interesse de muitos pesquisadores estudos que apresentem possíveis soluções para geração de energia elétrica alternativa. Muitas dessas pesquisas se concentram na utilização de recursos naturais, teoricamente inesgotáveis, para preservar outras fontes de energias esgotáveis. Mais recentemente, tem sido estudada a possibilidade de geração de energia elétrica de baixa potência, mas que seja suficiente para suprir a demanda de alguns sistemas eletrônicos. Sistemas como sensores sem fio ou comunicação remota que tem baixo consumo de potência podem ser beneficiados. Dentre as várias tecnologias de produção de energia elétrica alternativa, o uso da energia vibratória e de deformação de estruturas pode ser utilizada para gerar energia elétrica. Para essa conversão se tem os materiais piezoelétricos que convertem a energia de deformação mecânica em energia elétrica. Assim, neste trabalho, é apresentado o estudo de caracterização de um material piezoelétrico de Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) com o objetivo de geração de energia elétrica. Para a caracterização experimental foi utilizado um PZT com geometria cilíndrica tubular, submetido a uma compressão de forma cíclica no sentido axial. Um aparato experimental foi criado e instrumentado para a captação da força, aceleração, tensão e potência elétrica gerada devido a célula piezoelétrica. Inicialmente simulações foram desenvolvidas no sentido de nortear o conjunto de ações experimentais. A partir dos resultados experimentais com uma célula piezoelétrica foi elaborado um gerador piezoelétrico com três células e caracterizado. Resultados dos parâmetros físicos relacionados às caracterizações são apresentados.

Palavras Chave: Colheita de energia, energia alternativa, materiais piezoelétricos, cilindro piezoelétrico.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF A PIEZOELECTRIC TUBULAR CELL FOR ELECTRIC POWER GENERATION

Currently possible solutions for alternative electric power generation have been the subject of interest of many researchers. Many of these studies focus on the use of natural resources, theoretically inexhaustible, to preserve exhaustible sources of energy. More recently, it has been studied the possibility of generating low power electricity, but enough to meet the demand of some electronic systems. Systems such as wireless sensors or remote communication which has low power consumption can be benefited. Among various technologies for producing alternative electricity, the use of vibratory energy and deformation of structures can be used to generate electricity. This conversion has the piezoelectric materials that convert mechanical strain energy into electrical energy. Thus, this work presents the characterization study of a piezoelectric material, Lead Zirconate Titanate (PZT), with the purpose of generating electricity. For the characterization experiment, we used a cylindrical PZT subjected to compression in a cyclic manner in the axial direction. An experimental apparatus was designed and instrumented to capture the force, acceleration, voltage and electric power generated due to piezoelectric cell. Initially simulations were developed in order to guide the experimental set of actions. From the experimental results with a piezoelectric cell a piezoelectric generator was designed with three cells and characterized. Results of the physical parameters related to characterization are presented.

Key words: Energy harvesting, alternative energy, piezoelectric materials, piezoelectric cylinder.

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

As preocupações ambientais relacionadas à dependência mundial na exploração e utilização de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis e o crescente consumo energético mundial, conduzem a uma rápida aceitação de que precisamos acelerar nossos esforços em busca da diversificação da matriz energética, passando a produzir energia a partir de diferentes fontes alternativas e renováveis.

Várias já são as técnicas de exploração de energia a partir de fontes limpas, que consistem em captar a energia disponível no ambiente, normalmente energia cinética (vento, ondas, gravitacional, vibrações), energia térmica (solar-térmica, geotérmica, gradientes de temperatura, combustão), energia química (biocombustíveis, biomassa), energia atômica (nuclear, decaimento radioativo) ou energia eletromagnética (fotovoltaica, radiofrequência, campo magnético) e, transformá-la em energia elétrica (GONÇALVES, 2011). Diversas aplicações à macroescala fazem uso deste conceito, como exemplo a produção de energia elétrica por fazendas fotovoltaicas e parques eólicos (CASIMIRO *et al.*, 2009).

Os avanços tecnológicos ao longo da última década, especialmente na micro e nanotecnologia, têm promovido importantes desenvolvimentos aos dispositivos eletrônicos, tais como: grande redução no tamanho e no consumo de energia, considerável variedade de dispositivos sem fio e um aumento na demanda por sistemas eletrônicos alto-alimentados os quais têm sido empregados em diferentes aplicações, são exemplos, os dispositivos médicos implantáveis e redes de sensores sem fio (ZHU *et al.*, 2009, PINNA *et al.*, 2010 e JORNET *et al.*, 2012).

Os sistemas alto-alimentados caracterizam-se por possuírem fontes de alimentação sem fio, o que lhes dão as mesmas vantagens da comunicação sem fio com relação à portabilidade, vantagens também para aplicações não portáteis, pois reduzem os custos de instalação ao eliminar a fiação (MITCHESON *et al.*, 2008). A última característica é particularmente importante quando as fontes de alimentação com fio não estão disponíveis localmente. Tais sistemas 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.

Esta nova tendência de miniaturização, mobilidade e baixo consumo de energia, que proporciona a popularização das tecnologias sem fio tanto para comunicação e entretenimento quanto para aplicações industriais e ambientais de sensoriamento remoto, resultou em um aumento nas pesquisas e investimentos relacionados ao conceito de *Energy Harvesting* (Colheita de Energia) viabilizando o desenvolvimento de sistemas de captação de energia numa vertente de microescala, ou seja, dispositivos capazes de colher algum tipo de energia disponível no ambiente (energia solar, energia térmica, energia do vento e energia cinética, por exemplo) e convertê-la em uma quantidade de energia elétrica utilizável, que pode ser armazenada ou diretamente consumida por uma determinada carga.

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, estruturas em movimento (carros e aviões), e outros como prédios, pontes e pisos (KHALIGH *et al.*, 2010), enfim, estruturas sujeitas a tensões e/ou deformações mecânicas. Vários mecanismos incluindo eletrostáticos, eletromagnéticos e piezoelétricos têm sido investigados para a produção de alguns miliwatts a partir da vibração.

Os métodos de transdução eletromagnética e piezoelétrico são as duas abordagens mais promissoras para captação de energia cinética (KHALIGH *et al.*, 2010). Consequente, os transdutores de vibração com tecnologia piezoelétrica têm sido estudados de forma mais intensa, se caracterizando como uma tecnologia mais madura, com um considerável número de pesquisas em andamento e publicações efetivadas, que demonstram que os materiais piezoelétricos são candidatos mais adequados para converter de forma eficiente tensão mecânica em energia elétrica, sem qualquer fonte adicional, podendo suportar uma grande quantidade de tensão mecânica além de possuir flexibilidade quanto ao tipo de material piezoelétrico a ser utilizado.

Partindo dessas informações, ao longo desta pesquisa, foi proposto e desenvolvido um gerador de energia elétrica constituído por células piezoelétricas (estruturas cilíndricas de PZT com dimensões físicas de 1x10x10 mm) baseado no

efeito piezoelétrico direto. Como consequência da aplicação de uma força de compressão sobre o mesmo, é gerada uma quantidade de energia elétrica proporcional à deformação mecânica sofrida pelas células. O gerador proposto teve seu desenvolvimento fundamentado a partir de análises (simulações via *software* e experimentos práticos), tendo em vista, determinar características como, a capacidade de geração de energia em relação à força de compressão mecânica sofrida, tanto em relação a uma única célula quanto ao comportamento da atuação conjunta das mesmas. 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.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho objetiva a concepção de um gerador de energia elétrica formado por elementos piezoelétricos tubulares. Tendo em vista uma configuração com baixa complexidade de montagem, o gerador poderá se comportar como um sistema de geração flexível, uma vez que se pode variar o número de células de PZT que formam o gerador, podendo ser dimensionado para diferentes aplicações com diferentes níveis de potência de trabalho.

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;
- Analisar e comparar diferentes geradores baseados no efeito piezoelétrico, tanto em relação às configurações existentes quanto aos níveis de potência elétrica gerados;
- Desenvolver simulações em elementos finitos e uma plataforma experimental, para obtenção das características elétricas e mecânicas das células piezoelétricas;
- Determinar os valores de potência elétrica proporcionado pelo gerador.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CAPTAÇÃO DE ENERGIA.

A dependência de fontes fósseis de energia em todo o mundo conduziu a um investimento em novos vetores de energia (GONÇALVES, 2011). Com isso, 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 a cerca do conceito de captação ou colheita de energia (*Energy Harvesting*) (LUO *et al.*, 2010).

Do ponto de vista macroenergético a colheita de energia vem sendo empregada já a vários anos por meio dos parques eólicos e fotovoltaicos por exemplo, mas nos últimos, com a evolução de novas tecnologias a tendência é para a miniaturização, baixo consumo e mobilidade. 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. Assim, estudos vêm sendo desenvolvidos em busca de meios para produção de energia em microescala para alimentação dos dispositivos eletrônicos com essas novas características (CHANG *et al.*, 2011, MACIAS, 2012). Ou seja, a força propulsora na busca por técnicas de captação de energia é a possibilidade de alimentar sistemas como redes de sensores, dispositivos médicos implantáveis, veículos não tripulados e dispositivos móveis, sem utilizar baterias. Estes sistemas são geralmente muito pequenos e exigem pouca energia, mas suas aplicações são limitadas por sua dependência de baterias que necessitam de manutenção (substituição) ou recarga. A captação e conversão de energia existente no ambiente vêm sendo tratada como forma de ultrapassar essas limitações, podendo permitir o funcionamento desses dispositivos por tempo indeterminado.

2.2 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 microescala, incluindo eletromagnético (campo magnético), rádio frequência, vento,

radiação solar e fontes biológicas, proporcionando diferentes níveis de energia, respectivamente.

Pesquisadores como TASHIRO *et al.* (2011) e ZHAO *et al.* (2012), têm realizado estudos a cerca da 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. Recentemente, MORAIS (2013) propôs um sistema de captação por dispersão magnética em linha de potência de uma rede elétrica, mostrado na Figura 2.1. 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 80Ω 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 VRMS para uma carga de 40Ω . Resultados obtidos a partir da captação da dispersão magnética causada por uma corrente elétrica de 15A 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.

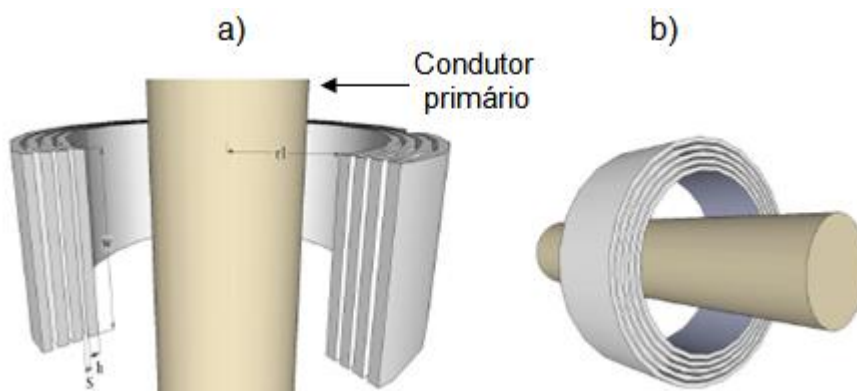


Figura 2.1 - Camadas do toroide envolvendo uma linha de potência. a) corte b) perspectiva (MORAIS, 2013)

A captação de energia por RF (Rádio Frequência), 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.* (2012) apresentaram um modelo para a colheita de energia de ondas de RF, o qual é direcionado à aplicações de *Radio Frequency Identification* (RFID), trabalhando numa faixa de 2.10 a 2.45 GHz. Em outro trabalho, ELANZEERY *et al.* (2012)

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. 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.

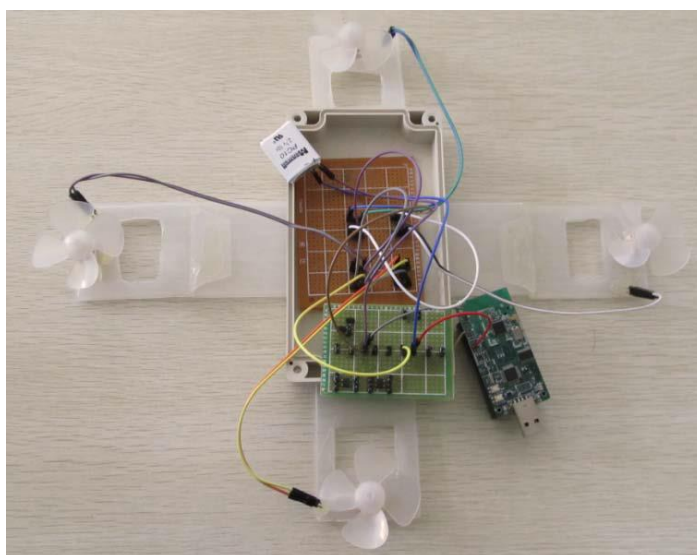


Figura 2.2 – Dispositivo de captação de energia eólica (QIU *et al.*, 2011)

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.* (2010) e em um outro trabalho, BADER *et al.* (2010) 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 nanocomponentes como nanotubos 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, 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 da mais elevada possível média 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 dois

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 (LELAND *et al.*, 2005, LUO *et al.*, 2010). O tipo de gerador mais eficaz depende, em certa medida, das condições de operação específicas.

Transdutores eletrostáticos necessitam de uma fonte de tensão separada (por exemplo, uma bateria) para iniciar o ciclo de conversão (LELAND *et al.*, 2005). 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 a limitação de baixa tensão induzida associada aos microgeradores eletromagnéticos, pesquisadores 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 alto-partida e alto-sustentável, 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 μW , como consequência dessa integração.

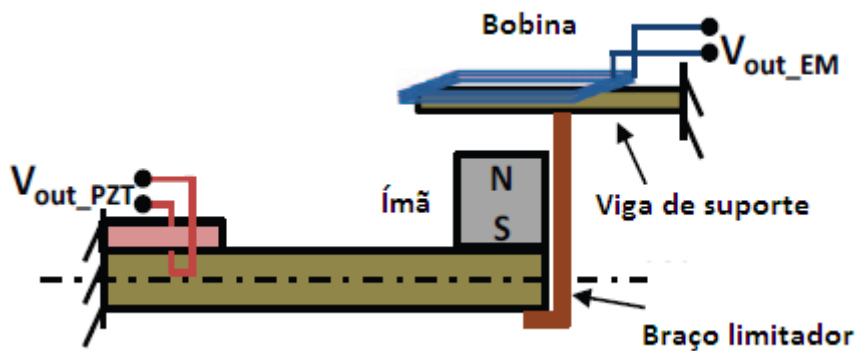


Figura 2.3 – Modelo de microgerador híbrido (BEKER *et al.*, 2011)

Ideias para gerar energia a partir de fontes ambientais estão em alta, contudo a quantidade de energia que pode ser gerada costuma ser sobre-estimada e os custos envolvidos subestimados, os baixos níveis de energia gerados podem ser facilmente 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, autoestradas e ferrovias.

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.

Nesse contexto, a literatura tem revelado que os geradores baseados em elementos piezoelétricos, possuem maior densidade de energia e elevada eficiência de conversão, melhor acoplamento eletromecânico e grande potencial de miniaturização com estruturas simples facilitando sua integração com as tecnologias de sistemas microeletromecânicos (MEMS) e circuitos integrados (CI) e ainda a possibilidade de fabricação em massa, quando comparado aos sistemas citados anteriormente.

2.3 CAPTAÇÃO DE ENERGIA UTILIZANDO MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS.

Os materiais piezoelétricos têm propriedades que lhes permitem gerar energia elétrica ou mecânica, por alteração do seu estado mecânico ou elétrico respectivamente. Consideram-se dois efeitos principais, o efeito piezoelétrico direto e o efeito piezoelétrico inverso. 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).

O efeito direto pode ser utilizado no desenvolvimento de microgeradores. 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.

Na atualidade, diferentes formas e configurações dos dispositivos de captação, assim como diversos tipos de elementos piezoelétricos e formas de análise da eficiência dos transdutores piezoelétricos, têm sido proposta pela literatura.

O tipo de material piezoelétrico mais utilizado para converter vibrações mecânicas em uma forma utilizável de energia elétrica é a cerâmica de titanato zirconato de chumbo (PZT). No entanto, o PZT é frágil, apresentando assim limitações às deformações. Além disso, quando submetidos a movimentos de alta frequência, as piezocerâmicas são susceptíveis a trincas por fadiga podendo ser danificadas. Como alternativa para aplicações onde o elemento piezoelétrico esteja exposto a grandes deformações e/ou altas frequências, pesquisadores têm desenvolvido elementos piezoelétricos poliméricos, como o *Polyvinylidene Fluoride* (PVDF), trazendo como principal característica grande poder de flexão (ABDELKEFI, 2012). Segundo PARES (2006) o PZT tem sido utilizado por muitos grupos de pesquisa por possuírem como principal característica alto coeficiente piezoelétrico, sendo amplamente utilizado para converter conservativamente energia mecânica em elétrica.

Considerando que a fonte de energia a ser explorada seja a vibração, a geometria mais comum utilizada em grande parte dos estudos, ilustrada na Figura 2.4 (a), constitui-se de uma viga metálica retangular ou *cantilever* - 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. 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.

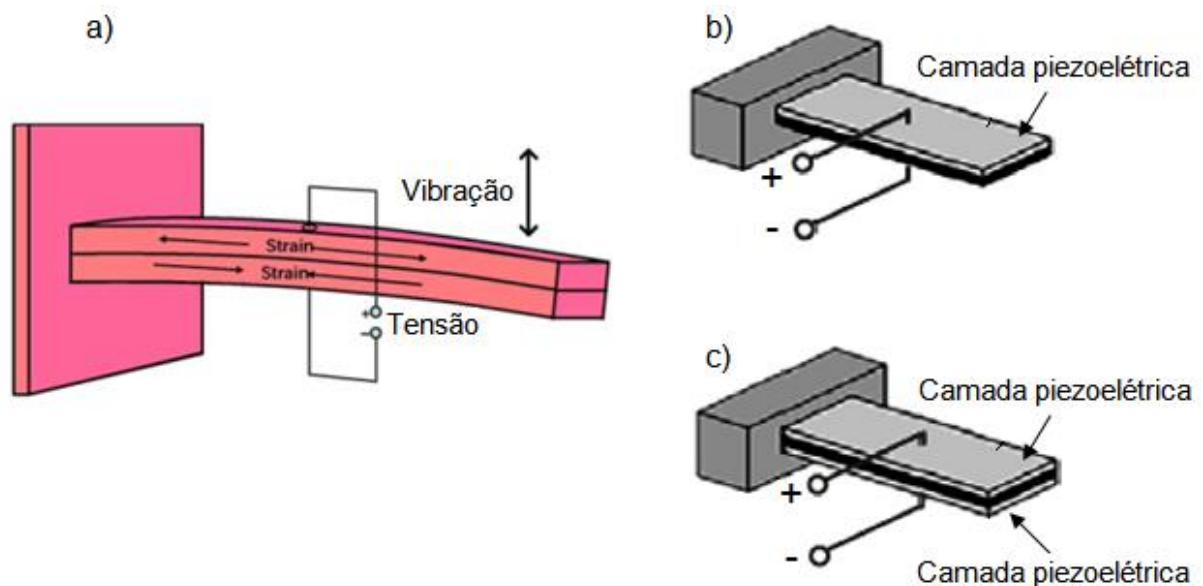


Figura 2.4 – Configuração básica para captação de energia piezoelétrica a partir de vigas em balanço (a); *unimorph* (b); *bimorph* (c) (RAMADASS *et al.*, 2010)

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

FANGA *et al.* (2006) apresentaram o projeto de um microgerador piezoelétrico para conversão de vibração em eletricidade, utilizando-se da configuração mostrada na Figura 2.5. A adição de uma massa presa à extremidade

livre tem 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. Com uma camada de 1,66 μm de PZT, o microgerador concebido resultou em um nível de tensão e potência de saída de 898 mV e 2,16 μW para uma carga de 21.4 K Ω operando na faixa ressonante com frequência em torno de 608 Hz.

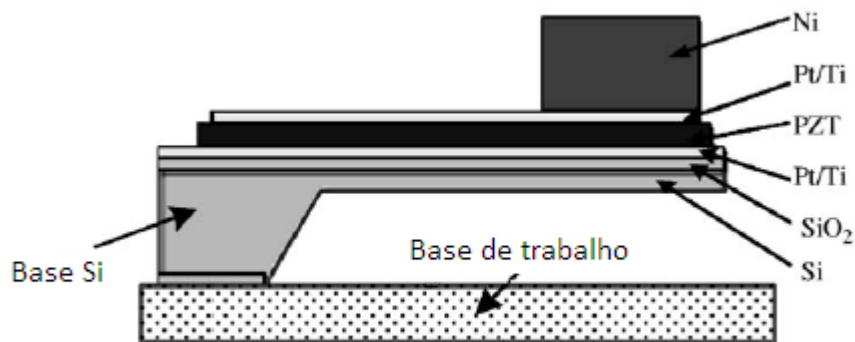


Figura 2.5 – Seção transversal do gerador (FANGA *et al.*, 2006)

KOYAMA *et al.* (2008) analisaram um dispositivo de colheita de energia, a partir da configuração mostrada na Figura 2.6, que utiliza como elemento piezoelétrico uma fina película de *polyurea*. Por se tratar de um polímero o mesmo suporta grandes deformações, apresentando tensão de ruptura mais elevada que os elementos cerâmicos como o PZT. O estudo se refere, quanto ao desempenho do microgerador com relação a eficiência da conversão de energia mecânica em elétrica. A eficiência foi calculada utilizando o modelo de análise de elementos finitos (FEA), modificando algumas características dimensionais do *hardware*, na busca da melhor configuração, objetivando elevar a densidade de energia elétrica fornecida pelos geradores. O resultado calculado pelo FEA previu que a maior eficiência de conversão pode ser obtida com uma viga de menor espessura, diminuindo assim sua frequência natural de vibração, e menor comprimento.

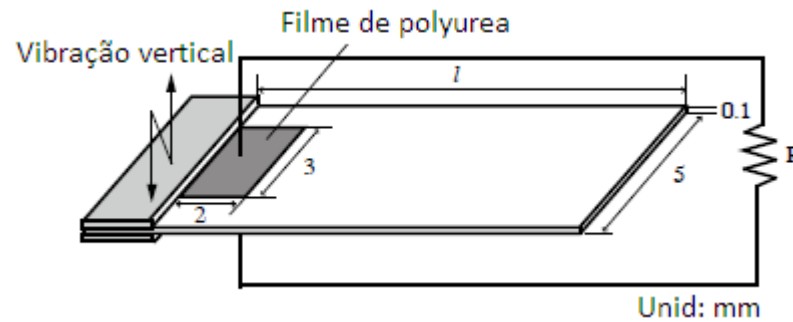


Figura 2.6 – Configuração final do dispositivo analisado (KOYAMA *et al.*, 2008)

KOYAMA *et al.* (2009) investigaram duas diferentes configurações de colagem de elementos piezoelétricos (PZT) nas vigas de alumínio, como mostrada na Figura 2.7. A eficiência de conversão das configurações foi calculada através da FEA. As vibrações fundamentais de flexão foram observadas nas vigas e a saída de potência elétrica foi medida através da ligação de uma resistência de carga. Os pesquisadores concluíram que a maior potência de saída poderia ser obtida com a configuração de elementos menores. Os resultados experimentais e calculados mostraram uma boa concordância. A potência máxima de saída de 2,8 mW e a eficiência de conversão de 8,07% foram conseguidos com a velocidade de vibração de 0,7 mm/s e uma resistência de carga de 51 k Ω .

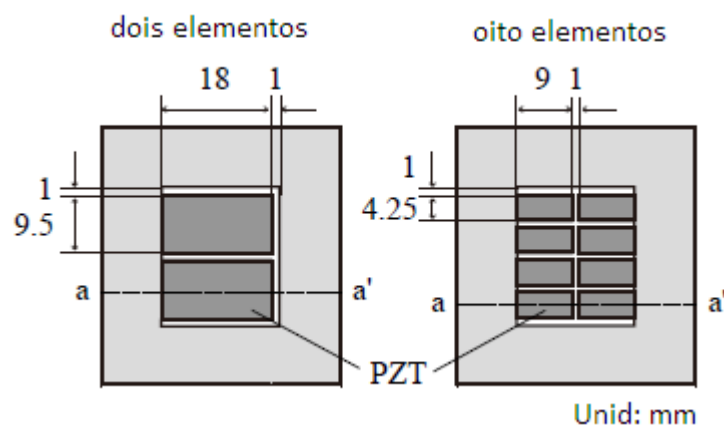


Figura 2.7 – Configurações dos conjuntos de vigas e PZTs – vista superior (KOYAMA *et al.*, 2009)

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.* (2009) desenvolveram um circuito piezoelétrico acoplado 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, como mostrado na Figura 2.8. 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 natural nessas condições.

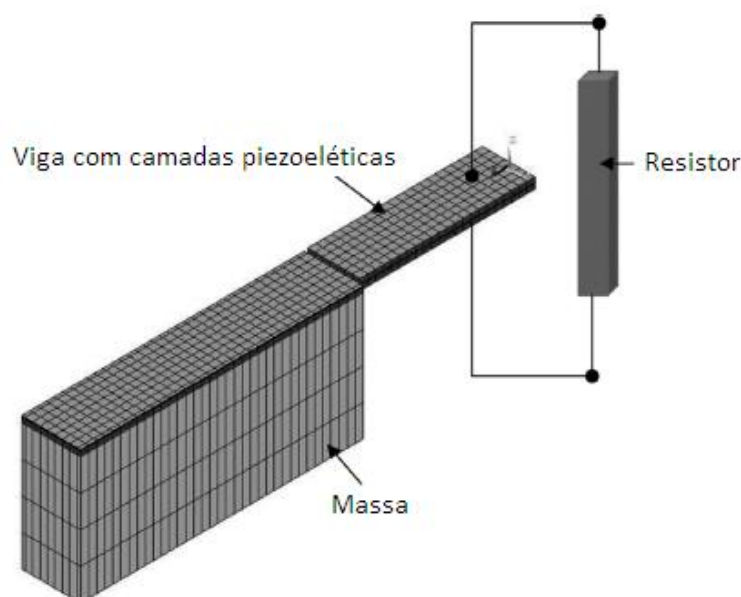


Figura 2.8 – Modelo CPC-FEM desenvolvido ligado diretamente a uma resistência (ZHU *et al.*, 2009)

Em outro trabalho, ZHU *et al.* (2009) 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. Na Figura 2.9 é

mostrado o CPC-FEM desenvolvido. Esse método tem sido utilizado para obter resultados simulados de: corrente que flui e a tensão desenvolvida através da resistência de carga, a potência dissipada no resistor, a amplitude de deslocamento correspondente à frequência e a frequência de ressonância. Valores esses, diretamente relacionados as variações de parâmetros geométricos como comprimento, largura e espessura da viga, comprimento, largura e altura da massa.

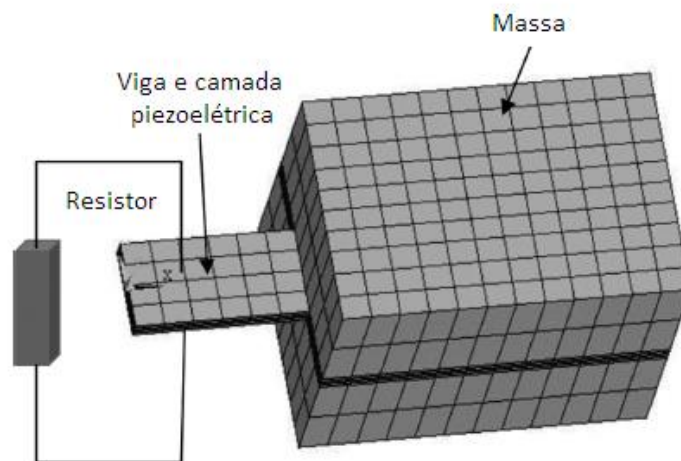


Figura 2.9 – Modelo CPC-FEM desenvolvido (ZHU *et al.*, 2010).

ZHU *et al.* (2009) apresentaram um estudo experimental sobre o desempenho de saída de energia elétrica do PEHD já otimizado quando ele está diretamente ligado a diferentes valores de carga resistiva. Segundo os autores, a principal motivação do trabalho foi; baseado em experimentos, obter a compreensão de como uma carga resistiva, ligada ao PEHD *vibration-based*, pode afetar o desempenho da tensão e potência de saída. Com o PEHD otimizado, mostrado na Figura 2.10, sendo excitado com uma frequência de operação de 87 Hz e uma aceleração de 0,23 g, foram gerados os valores de potência e tensão de 370 μ W e 15,5 V respectivamente, conectado a uma carga de 325 K Ω . Analisando a Figura 2.10 temos: 1) PEHP com volume total de 1 cm³, 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*.

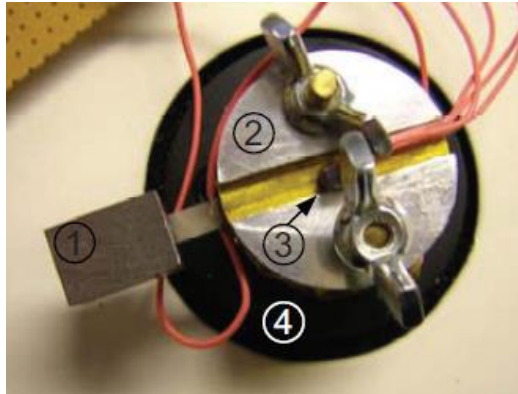


Figura 2.10 – Protótipo do PEHD fixado no *shaker* através do suporte de alumínio (ZHU *et al.*, 2009)

JANPHUANG *et al.* (2011) apresentaram as características e o desempenho de um captador de energia baseado na tecnologia de dispositivos microeletromecânicos (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 2.11. 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.

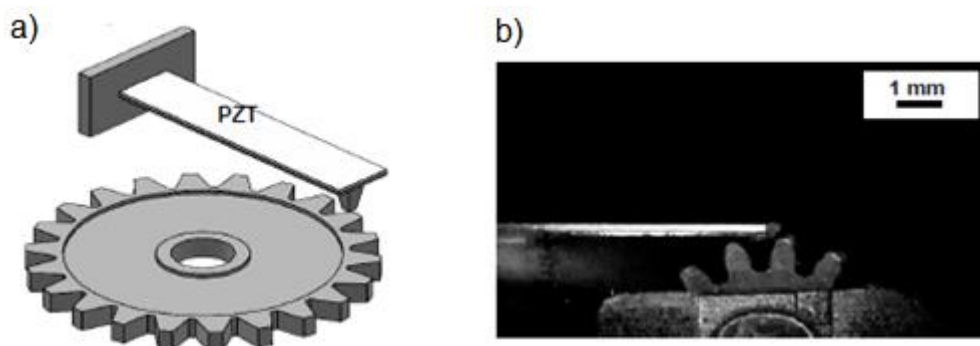


Figura 2.11 - a) Esquemático da captação de energia por impacto mecânico; b) Imagem do dispositivo de colheita montado sobre a caixa de engrenagens (JANPHUANG *et al.*, 2011).

Avaliações sob a melhor configuração para melhorar a captação e conversão de energia a partir da vibração por meio de vigas, com foco na forma e tipo de material do *cantilever*, tipo e localização do material piezoelétrico na estrutura, têm sido relatadas em vários trabalhos. Alguns investigadores, como ROUNDY, *et al.* (2005), observaram que uma forma trapezoidal de viga é mais eficiente de que a forma retangular, devido a maior uniformidade de tensão mecânica na superfície da viga. SHEBEEB *et al.* (2010) analisaram por meio de simulações via ANSYS®, os efeitos da distribuição de tensão mecânica e deformação ao longo das superfícies de três diferentes formatos de vigas e os consequentes valores de saída de energia elétrica dos geradores piezoelétricos correspondentes. As formas retangular, trapezoidal e triangular, mostradas na Figura 2.12, foram analisadas no intervalo de frequência entre (50 Hz – 150 Hz) com as mesmas condições de excitação de entrada e mesmo tamanho volumétrico. Os resultados mostraram que o valor máximo de tensão/deformação foi produzido na forma triangular, com igual distribuição na área da superfície da viga. Por simulações analíticas o valor de potência máxima de 5 mW a uma frequência de 85 Hz foi produzida com a configuração triangular.

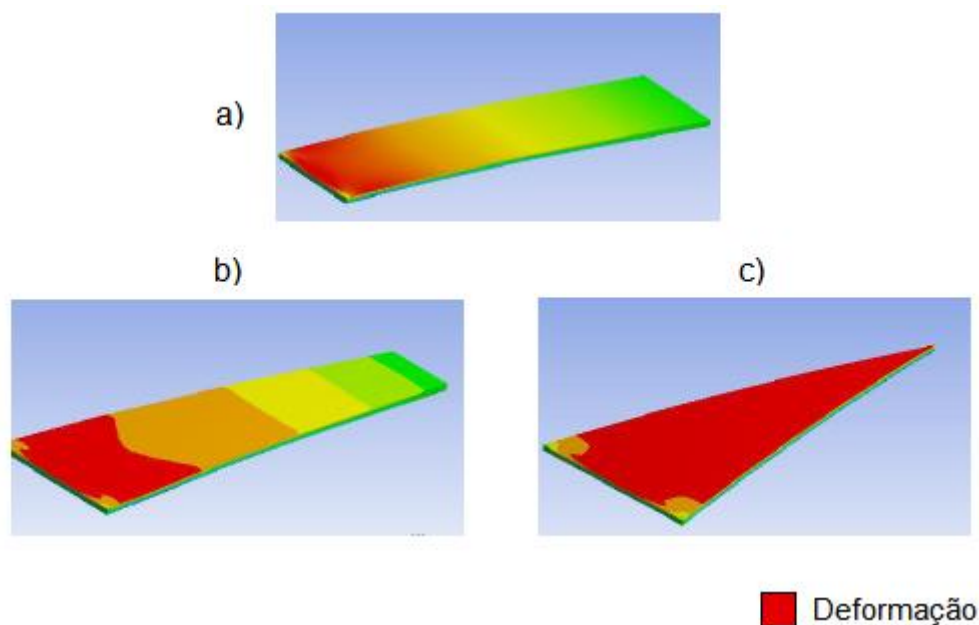


Figura 2.12 – Distribuição da deformação: a) viga retangular; b) viga trapezoidal; c) viga triangular (SHEBEEB *et al.* 2010)

LEE *et al.* (2009) Desenvolveram um dispositivo de colheita de energia piezoelétrica capaz de atuar em múltiplas frequências de ressonância e impedir o efeito de cancelamento existente em captadores piezoelétricos baseados em vigas quando os mesmos estão sobre influencia de certos modos de vibração, como mostrado na Figura 2.13. Para impedir o efeito de cancelamento, as vigas com uma dupla camada de PZT (*bimorph cantilever*) são separadas no ponto de inflexão onde é anexada uma massa de prova. Após uma cuidadosa calibração com o modelo de elemento finitos, o protótipo já otimizado, mostrado na Figura 2.14, foi fabricado e utilizado em um sistema de climatização para alimentar um sensor sem fio de monitoramento de temperatura em tempo real. Nesse caso específico o dispositivo foi desenvolvido para maximizar a tensão de saída, visto que o sensor necessita de 5,3 V e 2,7 V para sondagem e transmissão dos dados, respectivamente. O sistema de climatização em que o transdutor piezoelétrico foi aplicado mostrou dois picos de ressonância no domínio de frequências de interesse, de modo que a estruturada do gerador é composta por dois segmentos. Em casos de serem utilizados mais de três picos de ressonância, um dispositivo diferente deverá ser concebido com mais segmentos. Por exemplo, quando se deseja utilizar os três primeiros modos de vibração, o PZT deverá ser segmentado em três pontos diferentes de flexão.

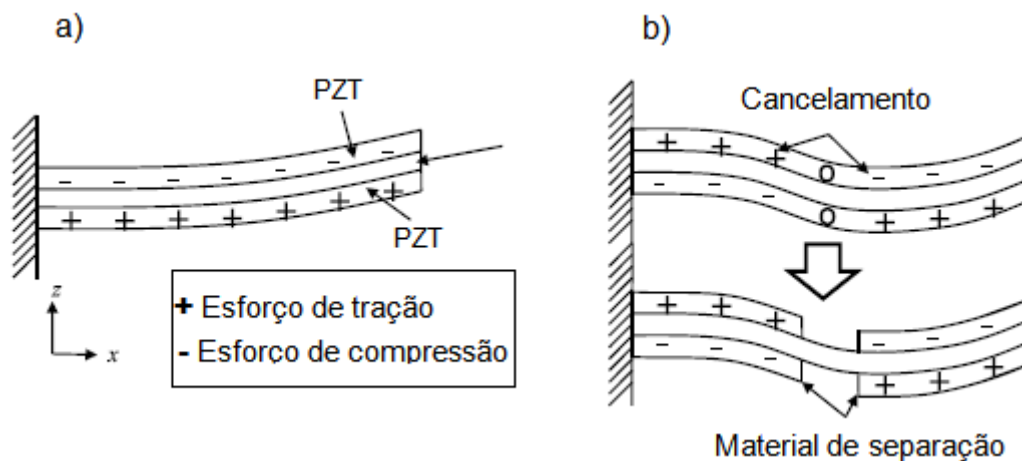


Figura 2.13 – Efeito de cancelamento: a) primeiro modo (não há cancelamento); b) segundo modo (LEE *et al.* 2009)

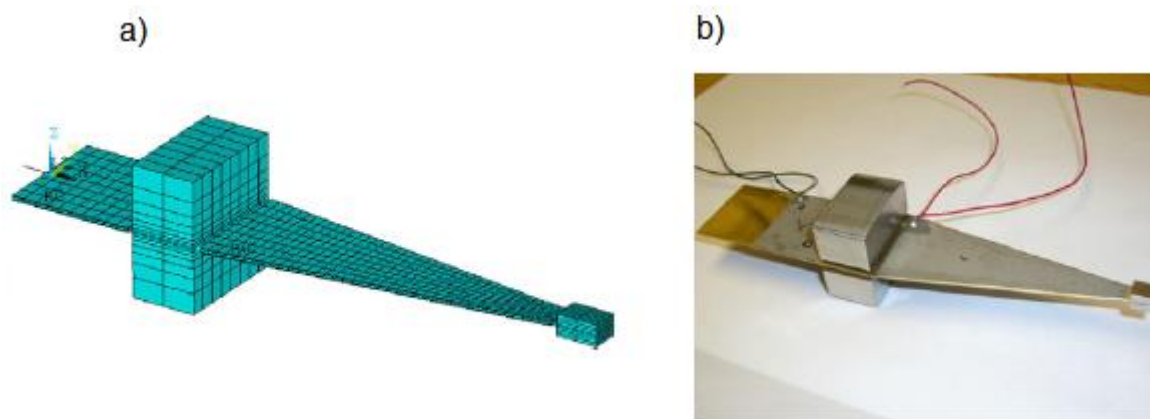


Figura 2.14 - Transdutor piezoelétrico: a) modelo FEA; b) protótipo (LEE *et al.* 2009)

A utilização das configurações baseadas em vigas para captadores de energia envolvem alguns inconvenientes no ponto de vista prático. A ocupação de um espaço considerável por sua massa de prova e a parte adicional de fixação, além de que certa quantidade de energia pode ser perdida em caso de folga após um prolongado tempo de exposição do dispositivo à vibração, são exemplos.

Pesquisas têm sido realizadas e propostas de novas configurações que ultrapassem essas e outras limitações dos dispositivos de colheita baseados em vigas têm sido apresentadas. LEE *et al.* (2011) propuseram a utilização de adesivos piezoelétricos multimodais aplicados diretamente na fonte de vibração, ou seja, películas de captação de energia que utilizam vibrações multimodais aumentando a eficiência de colheita de energia. Um modelo computacional (por elementos finitos) 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 foi utilizado dois estudos de caso: a aplicação da película na fuselagem de uma aeronave e no painel de um transformador de potência. No caso da aeronave, fazendo uso da película multimodal de PZT com área de 12,5 x 10,5 cm e uma espessura de 1,02 mm, mostrada na Figura 2.15 (b), a potência por unidade de aceleração de 1,836 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. No caso do transformador de potência, o campo magnético alternado provoca forças eletromagnéticas flutuantes nos enrolamentos produzindo vibrações harmônicas na estrutura. Com uma película multimodal de PZT com 1,02 mm de espessura, mostrada na Figura 2.16 (b) foi alcançado 7,80 mW com uma frequência de 120 Hz (primeiro modo) e 5,38 mW em 240 Hz (segundo modo), contra 8,0 mW (primeiro modo) e 2,98 mW (segundo modo) da configuração unimodal, um acréscimo de 81% no primeiro modo e 20% na potência total para configuração multimodal.

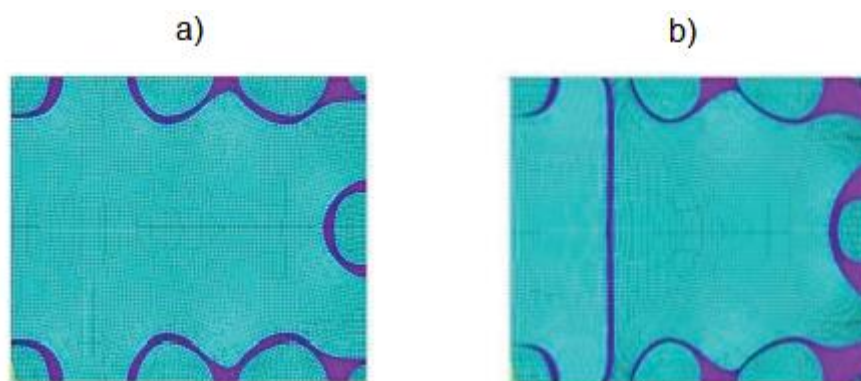


Figura 2.15 – Retirada de material piezoelétrico nas linhas de inflexão. a) unimodal (primeiro modo); b) multimodal (primeiro e segundo modo) (LEE *et al.* 2011)

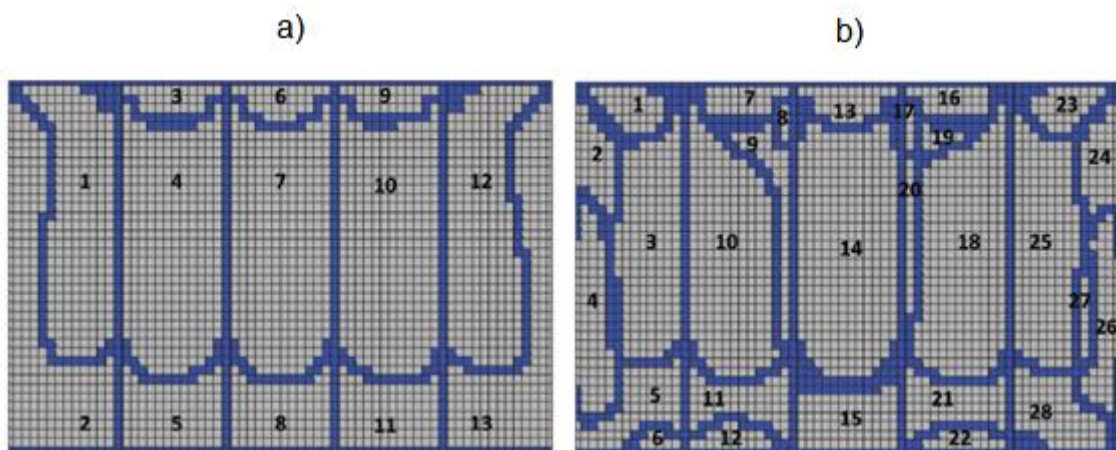


Figura 2.16 – Linhas de inflexão no material piezoelétrico (transformador). a) unimodal (primeiro modo); b) multimodal (primeiro e segundo modo) (LEE *et al.* 2011)

FENG *et al.* (2011) Desenvolveram, a partir de uma proposta inovadora, um amortecedor de choques alto-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 2.17. 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.

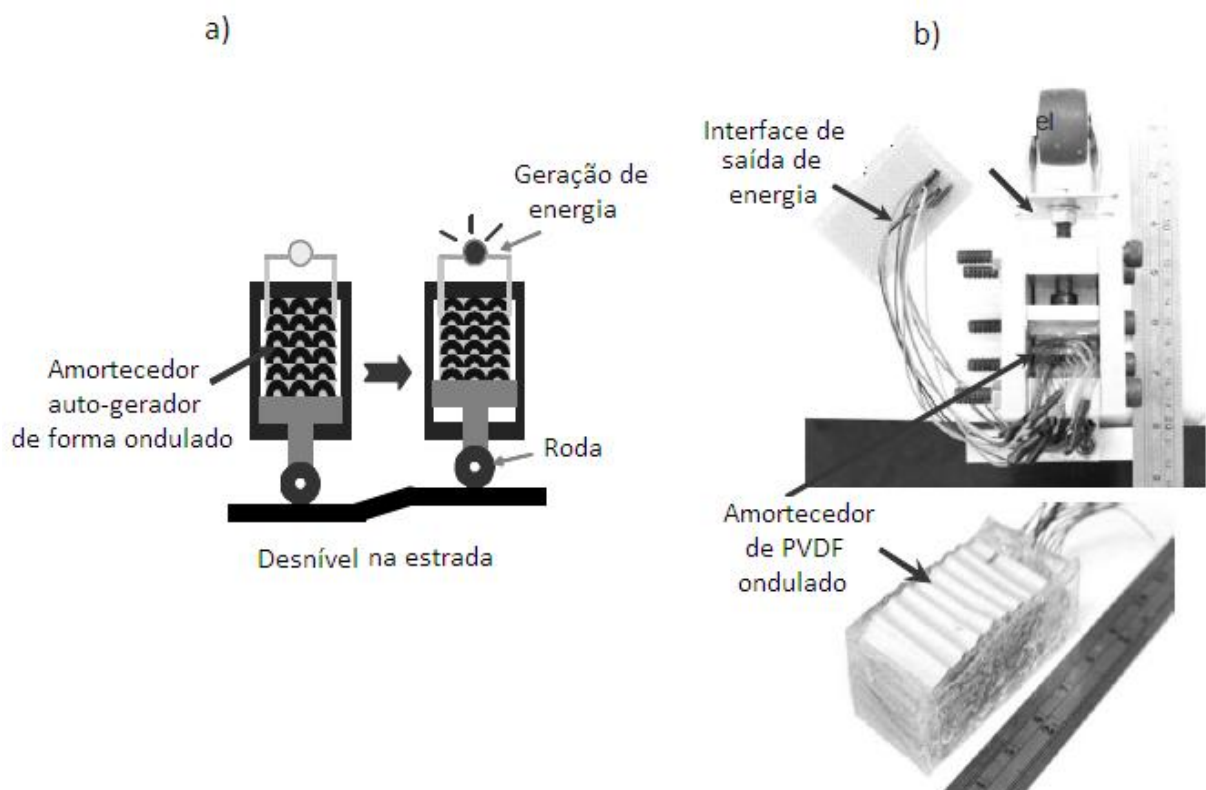


Figura 2.17 – a) Modelo de proposta do amortecedor de choques alto-gerador; b) Módulo de uma roda para simulação em estrada de teste (FENG *et al.*, 2011)

ROCHA *et al.* (2010) descreveram a utilização de polímeros piezoelétricos para captar energia no caminhar das pessoas, a partir da fabricação de um sapato capaz de gerar e acumular energia elétrica, Figura 2.18. O elemento utilizado foi o fluoreto de polivinilideno- β (β -PVDF) em conjunto com os componentes eletrônicos necessários para aumentar a eficiência de transferência e armazenagem de energia.



Figura 2.18 – Gerador proposto: a) dois filmes do polímero acima do solado; b) Circuito implementado para o protótipo final (ROCHA *et al.* 2010)

HOWELLS (2009) desenvolveu um dispositivo com quatro unidades geradoras de energia elétrica acopladas ao salto de uma bota. Cada unidade é um pequeno gerador que utiliza elementos piezoelétricos (PZT-5A) para converter a compressão mecânica causada ao caminhar de uma pessoa em energia elétrica. O sistema é composto por duas partes principais – o gerador por impacto do salto e o circuito eletrônico. O dispositivo, mostrado na Figura 2.19, possui uma massa de 0,455 Kg e tem dimensões de 8,89 cm de comprimento, 7,94 cm de largura e 4,29 cm de altura. O circuito eletrônico tem uma área de 5,2 cm² e 1,7 cm de altura com uma massa de 10 g. Quando o utilizador comprime o dispositivo ao caminhar, um sistema mecânico converte o movimento linear em rotação de um came que flexiona os *bimorphs* de PZT-5A individualmente. Devido à disposição física das unidades geradoras no dispositivo, os sinais elétricos gerados oscilam com uma defasagem de 90°. O circuito eletrônico retifica os sinais de tensão CA de cada fase do gerador e produz pulsos DC que carregam um capacitor de armazenamento, o descarregando em seguida através de um conversor DC-DC, que converte a energia armazenada em um impulso de saída regulado em 12 V. Em média, o sistema produziu uma potência de 0,0903 W por compressão.



Figura 2.19 – Dispositivo gerador (HOWELLS 2009).

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), mostrado na Figura 2.20, 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 $2,8 \text{ mW cm}^{-3}$.

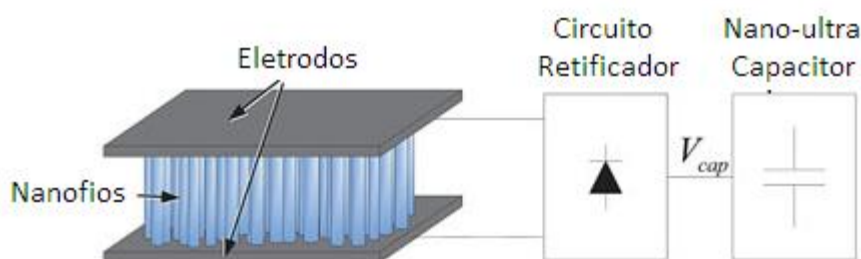


Figura 2.20 – Nano gerador piezoelétrico (JORNET *et al.*, 2012)

3 PROPOSTA DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

3 PROPOSTA DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA POR MEIO DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

Os principais meios estudados e utilizados para o desenvolvimento de geradores de energia elétrica a partir de fontes limpas são baseados na recuperação da energia cinética, que pode ser definida como sendo a energia relacionada com o movimento de um corpo. Portanto é uma fonte de energia naturalmente abundante no nosso meio e facilmente observada no dia-a-dia como no movimento humano ou de veículos, nas vibrações de estruturas e máquinas, vento, fluxo de água, etc. Nos últimos anos o interesse pela utilização dessa potência disponível aumentou consideravelmente no que diz respeito à conversão em energia elétrica em pequenas quantidades, que sejam suficientes para utilização em aplicações de baixo consumo. Como já informado e discutido anteriormente no texto, as principais técnicas existentes na literatura atual para produzir eletricidade em baixa escala através do movimento, baseiam-se em mecanismos eletromagnéticos, eletrostáticos e piezoelétricos. Como tantos outros pesquisadores, HU *et al.* (2010) destacaram que os dispositivos de recuperação de energia que fazem uso dos materiais piezoelétricos, têm recebido maior atenção devido a 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.

Portanto, o foco deste trabalho foi o uso de cerâmicas piezoelétricas para produção de energia elétrica a partir da deformação das mesmas. A configuração do gerador, aqui proposto, permite que a recuperação de energia se dê pela deformação por compressão de elementos cilíndricos de PZT. Antes de uma exposição detalhada do desenvolvimento do sistema estudado, deve ser apresentada uma abordagem teórica sobre conceitos relacionados ao trabalho, destacando as teorias sobre a piezoeletricidade.

3.1 PIEZOELETRICIDADE

A piezoeletricidade, junção do termo grego *piezein* (apertar/pressionar) com eletricidade, se trata 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, em guitarras e outros 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 pirita, 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. Logo foi visto a necessidade do desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos 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 tetra hidratado 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 de titanato de bário e niobato de chumbo após serem submetidas a um processo de polarização elétrica, marcando o início da geração das piezocerâmicas. Os primeiros estudos do titanato zirconato de chumbo (PZT), material utilizado neste trabalho, começaram a ser publicados a partir de 1954. A cerâmica de PZT é um material com composição de chumbo associada a uma composição variável de zircônio e titânio, sendo uma solução sólida do zirconato de chumbo com o titanato de chumbo. O PZT é um dos ferroelétricos mais estudados nos últimos anos (BRITANNICA, 2012, CASIMIRO *et al.*, 2009, PAES, 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. 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 3.1 (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 (PAES, 2006, SAKAMOTO, 2006,). Nesta situação, o material de PZT não apresenta características piezoelétricas devido a orientação aleatória entre os domínios. O processo de polarização 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 3.1 (b).

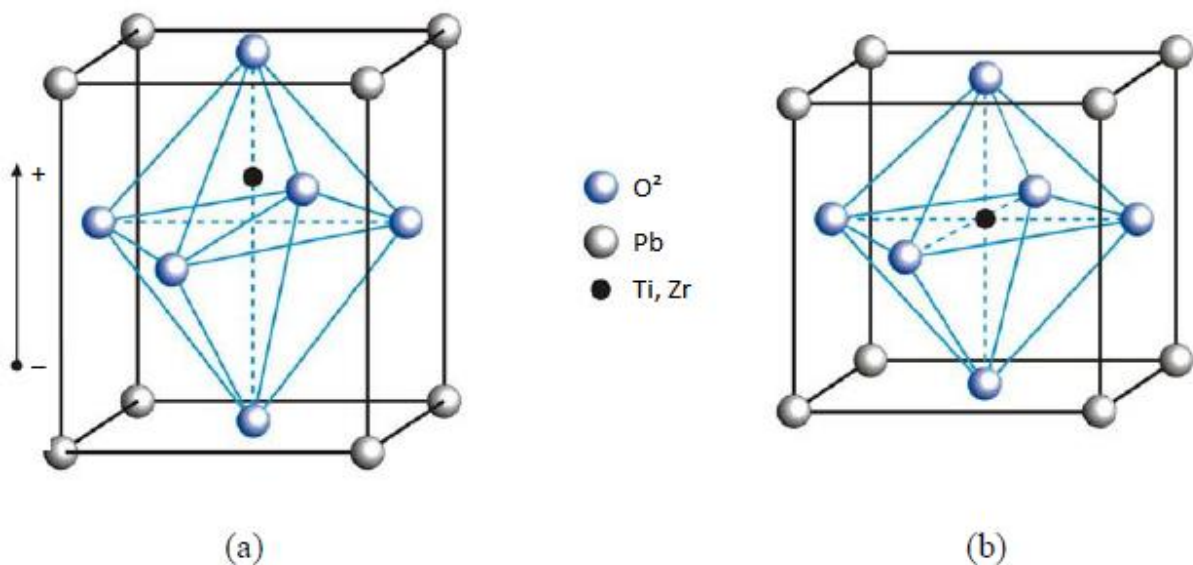


Figura 3.1 - Estrutura atômica do PZT. (a) Estado tetragonal distorcido; (b) Estado cúbico (SAKAMOTO, 2006)

Em um segundo momento, no material ainda aquecido, aplica-se um campo elétrico intenso (na ordem de kV/mm, de acordo com GODOY (2008)) fazendo com que as células unitárias se expandam e que os domínios orientem-se no sentido do campo, como mostrado na Figura 3.2 (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 permanece polarizada no sentido do campo

antes aplicado, como ilustrado na Figura 3.2 (c), garantindo ao PZT, agora polarizado, características piezoelétricas.

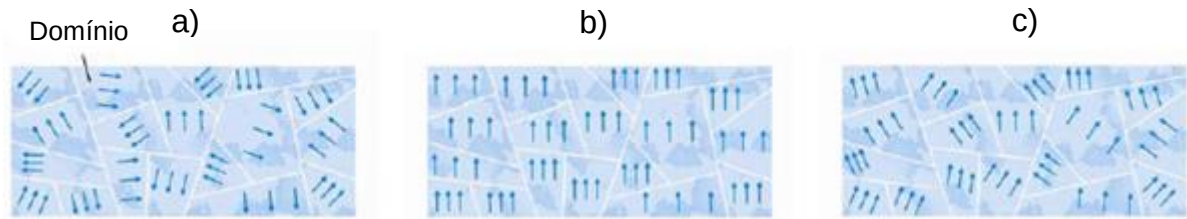


Figura 3.2 - Polarização de uma cerâmica ferroelétrica. (a) Material sem polarização; (b) Aplicação de campo elétrico; (c) Após a polarização (SAKAMOTO, 2006)

3.1.1 Piezoeletricidade linear

A forte interação eletromecânica nos materiais piezoelétricos pode ser descrito 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 energias, onde D (N/m) é o vetor de deslocamento elétrico, d (m/V) as propriedades piezoelétricas, σ (N/m²) a tensão mecânica, ε_{11} (F/m) os coeficientes dielétricos, E (V/m) o campo elétrico, S (N/m²) a deformação e s as propriedades elásticas. 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 (SOUTO, 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).

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

3.1.2 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 3.3 (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, aparecerá uma tensão elétrica com polarização invertida como mostrado na Figura 3.3 (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 3.3 (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.

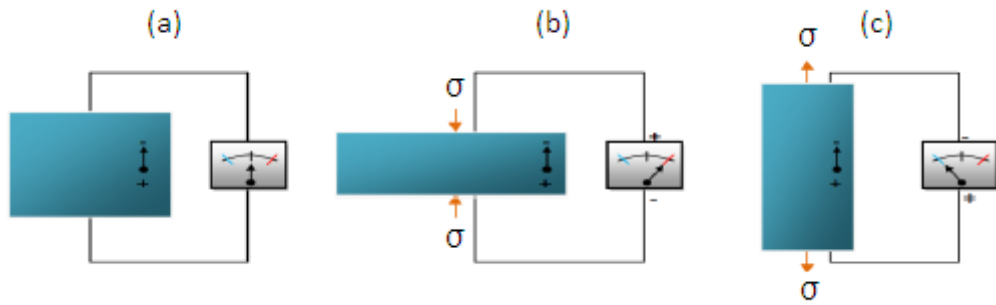


Figura 3.3 - Esquema representativo do efeito piezoelétrico direto
(CASIMIRO *et al.*, 2009)

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 às 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 3.4.

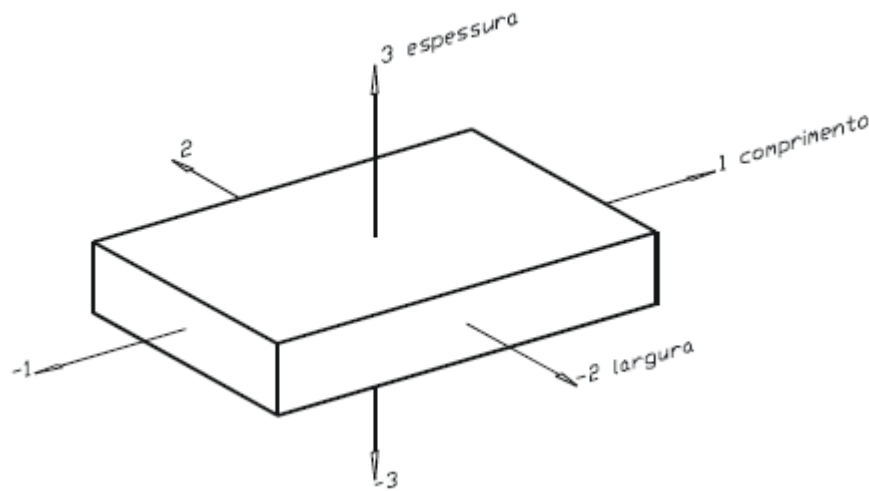


Figura 3.4 - Direções de deformação e de polarização de uma placa piezoelétrica (SOUTO, 2008)

Partindo dessas informações, pode ser visto na Figura 3.5 o comportamento das deformações de uma placa piezocerâmica em relação à 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):

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

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

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

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

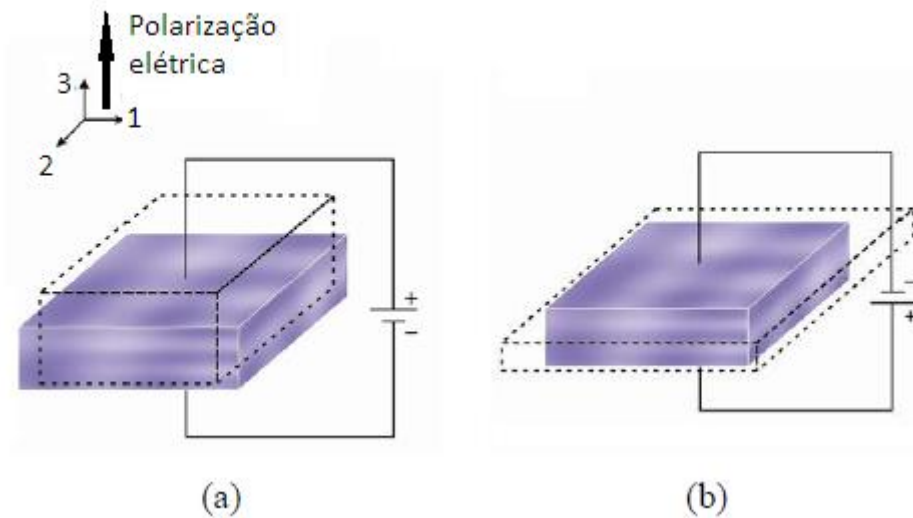


Figura 3.5 - Piezocerâmica polarizada. (a) Campo elétrico com sentido oposto à polarização elétrica; (b) Campo elétrico com o mesmo sentido da polarização elétrica (SAKAMOTO, 2006)

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 3.5 (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 3.5 (b). Esta correspondente mudança da forma do material quando certa tensão elétrica é aplicada em algumas de suas superfícies, possibilita a utilização dos materiais piezoelétricos como atuadores em estruturas.

3.2 DISCUSSÕES A CERCA DA PROPOSTA DE COLHEITA E CONVERSÃO DA ENERGIA CINÉTICA EM ELÉTRICA

Na busca de recuperar e converter a grande quantidade de energia cinética disponível nos mais variados sistemas existentes no nosso meio, seja ele industrial, residencial, biológicos entre outros, modelos de captadores de energia baseados no efeito piezoelétrico direto têm sido extensamente estudados nos últimos anos e vão de dispositivos com volumes de alguns mm^3 , a exemplo dos biomédicos implantáveis e sistemas microeletromecânicos, até mecanismos com vários cm^3 como os acoplados em equipamentos industriais e em pavimentos urbanos para aproveitar o movimento humano ou de veículos. Características como o tipo, formato e dimensões dos elementos piezoelétricos também são alvos de intensa pesquisa. De modo geral, a escolha do material piezoelétrico, para a aplicação tecnológica, é feita a partir do conhecimento das propriedades elásticas, dielétricas e piezoelétricas do elemento, condições que determinarão a eficiência do material no sistema.

Além das análises paramétricas, recém citadas, utilizadas para melhorar a configuração e a eficiência na colheita de energia piezoelétrica, o coeficiente de acoplamento eletromecânico (k) 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. Existem dois modos práticos de acoplamento, o modo 31 e o modo 33, como ilustrado na Figura 3.6. O modo 33 é definido por uma força aplicada na mesma direção da polarização do elemento piezoelétrico, Figura 3.6 (a). No modo 31 a força é aplicada na direção perpendicular à direção de polarização do elemento, Figura 3.6 (b). Convencionalmente, o modo 31 tem sido o modo de acoplamento mais comumente utilizado devido a maior simplicidade de aplicação, no entanto, de acordo com a literatura, o modo 31 produz um coeficiente de acoplamento menor do que o modo 33.

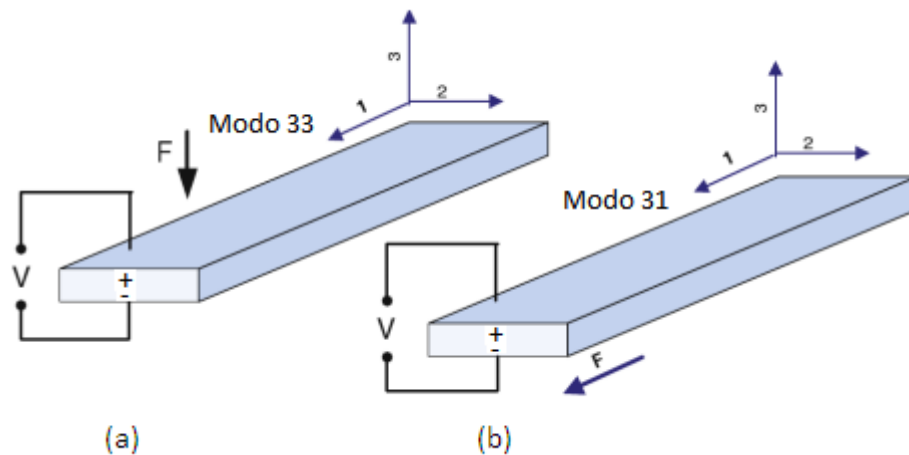


Figura 3.6 – Modos de operação de um elemento piezoelétrico. (a) modo 33; (b) modo 31 (PRIYA e INMAN, 2009)

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* (viga em balanço) operando no modo 31, ambas as configurações com o mesmo volume, observou-se que, embora a pilha fosse mais robusta e possuísse 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. Isto é devido à 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, o *cantilever* com a configuração 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.

O tipo de material piezoelétrico selecionado também tem grande influência sobre a funcionalidade e desempenho do dispositivo gerador. Até a data, uma série de diferentes materiais piezoelétricos têm sido desenvolvidos. O tipo mais comum, utilizado em aplicações de captação de energia, é o PZT. Por se tratar de um

material cerâmico o PZT é de natureza extremamente frágil, apresentando limitações quanto a absorção de deformações sem que haja danos a sua estrutura, além de serem susceptíveis a trincas por fadiga quando submetidos a cargas cíclicas de alta frequência.

Como já comentado, a maioria dos mecanismos de recuperação de energia, por meios piezoelétricos, são baseadas em estruturas de vigas ou placas. Do ponto de vista prático estes mecanismos apresentam inconvenientes como perdas de energia devido ao aparecimento de folgas após um prolongado tempo de exposição do dispositivo à vibração e, principalmente, um considerável espaço ocupado pelo elemento piezoelétrico além do volume da massa de prova e parte adicional de fixação. Partindo dessas considerações, foram investigadas neste trabalho as características de piezocerâmicas de PZT com geometria cilíndrica tubular tendo como propósito o desenvolvimento de um gerador de energia elétrica na busca da conversão de uma quantidade utilizável de potência elétrica e de ultrapassar as limitações dos dispositivos de captação baseados em *cantilever*.

A geometria do elemento piezoelétrico estudado está ilustrada na Figura 3.7. Se trata de um cilindro vazado (oco) de PZT com 10 mm de altura, 10 mm de diâmetro externo (D), 8 mm de diâmetro interno (d) e parede com 1mm de espessura, ocupando assim uma área de base de 78,54 mm².

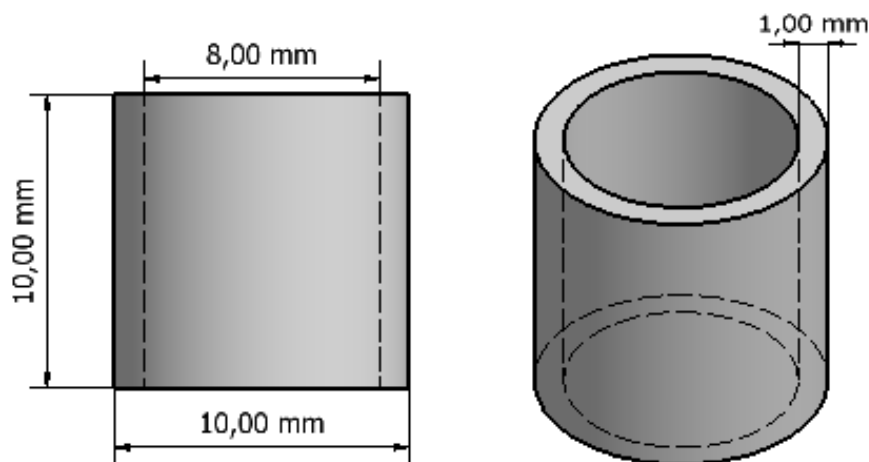


Figura 3.7 – Dimensões físicas do cilindro de PZT

Ao analisar-se dimensionalmente o PZT não mais como um cilindro e sim como uma forma retangular correspondente, como ilustrado na Figura 3.8, percebe-se que a área ocupada pelo elemento piezoelétrico, nesta geometria, equivale a $314,16 \text{ mm}^2$, valor bem superior ao da forma cilíndrica equivalente.

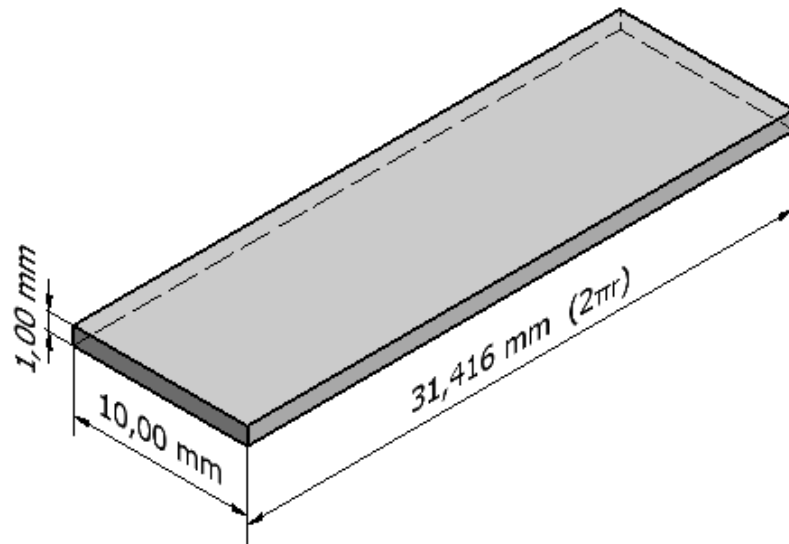


Figura 3.8 – Forma retangular correspondente ao cilindro de PZT

Diante disso, conclui-se que o elemento piezoelétrico na forma cilíndrica, ocupa uma área consideravelmente menor quando comparado com o elemento na forma de placa, o que possibilita o desenvolvimento de um gerador de energia elétrica formado pela associação de cilindros de PZT que além de ser fisicamente pequeno seja capaz de suportar uma considerável compressão mecânica.

Tendo como objetivo conceber e desenvolver o gerador piezoelétrico foram discutidos possíveis formas ou configurações geométricas deste dispositivo. Essa definição inicial da geometria do gerador possibilitou o desenvolvimento das simulações iniciais. Então, simulações foram desenvolvidas com o elemento piezoelétrico individualmente e logo em seguida em conjunto fazendo parte do gerador.

Nos capítulos que se seguem estão contidas informações detalhadas do desenvolvimento da proposta de estudo e concepção de um gerador de energia elétrica baseado em cilindros piezoelétricos. O capítulo 4 é dedicado as discussões em torno das simulações via *software*, mais especificamente nos procedimentos e

análises realizadas utilizando o pacote de elementos finitos ANSYS. Também são relatados todos os equipamentos e dispositivos envolvidos no desenvolvimento da estrutura de testes práticos. O capítulo 5 contém os resultados e discussões relacionados às simulações e ao experimento prático e no capítulo 6 estão as conclusões além das considerações sobre possíveis trabalhos futuros.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são abordadas as análises via *softwares* desenvolvidas devido a necessidade de um entendimento prévio do comportamento eletromecânico do elemento gerador aqui proposto, e a posterior montagem experimental detalhando os componentes utilizados na implementação da mesma.

4.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL

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). Pesquisadores como, KOYAMA *et al.* (2008), TANG *et al.* (2010), ZHU *et al.* (2009) 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 para cada parâmetro geométrico, e uma compreensão física de como cada parâmetro 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.

4.1.1 Desenvolvimento das simulações via *software*

Os modelos numéricos criados neste trabalho para as simulações computacionais do elemento piezoelétrico são desenvolvidos utilizando o *software* comercial ANSYS, que utiliza o método de elementos finitos (MEF). Este método é atualmente empregado em uma série de análises no ramo da engenharia. O MEF é 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. O elemento utilizado neste trabalho para as simulações do cilindro piezoelétrico é o SOLID226, 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 4.1.

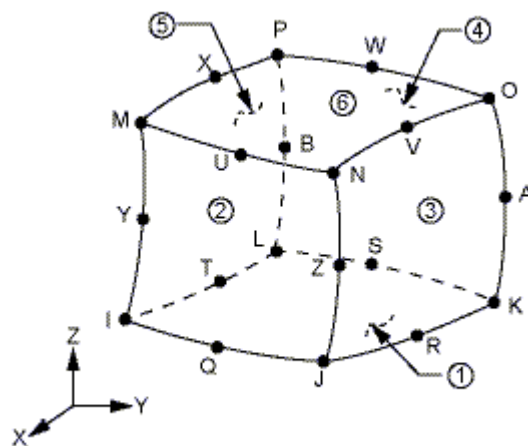


Figura 4.1 - Elemento sólido SOLID226 para simulação do piezoelétrico (ANSYS 14, 2011)

As simulações desenvolvidas foram baseadas na modelagem numérica que relaciona as interações eletromecânicas do PZT. O modelo requer uma matriz de constantes dielétricas (Equação 4.1) 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 4.2) 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 4.3) que relaciona os parâmetros elásticos do material piezoelétrico, ou seja, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e coeficiente de cisalhamento (S). 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).

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}/\epsilon_0 & 0 & 0 \\ & \epsilon_{11}/\epsilon_0 & 0 \\ Sim & & \epsilon_{11}/\epsilon_0 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

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

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

Os parâmetros piezoelétricos utilizados no desenvolvimento do modelo numérico e no preenchimento das equações acima citadas encontram-se listados na Tabela 4.1. Estes dados são provenientes da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante da cerâmica piezoelétrica em estudo.

Tabela 4.1 – Parâmetros piezoelétricos.

PZT (C-64)			
Fator de acoplamento eletromecânico	x10 ⁻²	K_{31}	35
		K_{33}	73
Constantes dielétricas		$\varepsilon_{11}/\varepsilon_0$	1960
		$\varepsilon_{23}/\varepsilon_0$	1850
Constantes de carga piezoelétricas	x10 ⁻¹² m/V (C/N)	d_{31}	-185
		d_{33}	435
		d_{15}	670
Módulo de Young	x10 ¹⁰ N/m ²	$\gamma_1^E=1/S_1^E$	5.9
		$\gamma_3^E=1/S_3^E$	5.1
Coeficiente de Poisson			0.34
Densidade	x10 ³ kg/m ³	ρ	7.7

Os modelos numéricos construídos para as simulações computacionais do cilindro piezoelétrico, têm em comum a utilização dos parâmetros citados anteriormente, a geometria mostrada na Figura 4.2 (a) e a malha de elementos finitos ilustrada na Figura 4.2 (b).

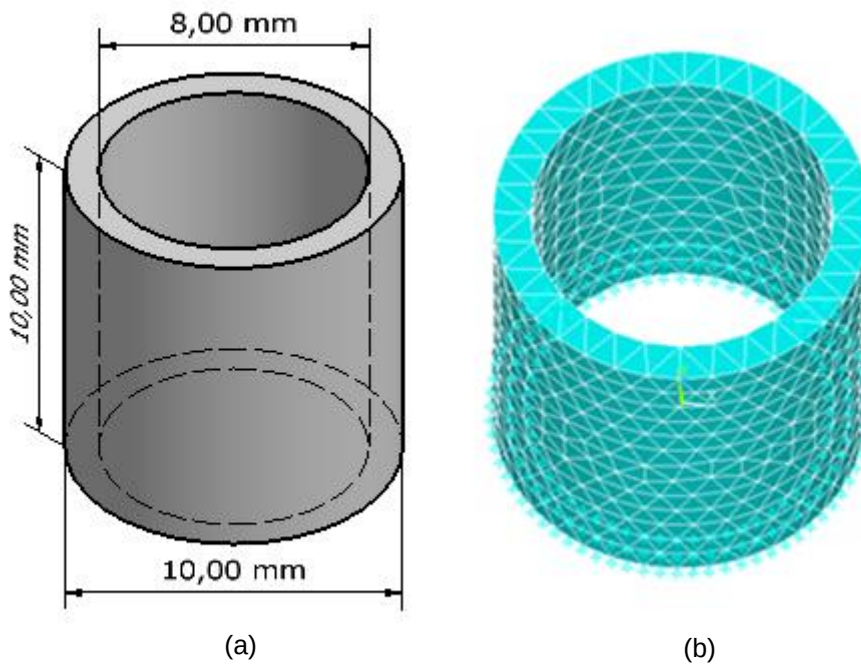


Figura 4.2 – Cilindro piezoelétrico na simulação. (a) geometria; (b) malha de elementos finitos

A malha é o processo no qual a geometria é discretizada em elementos e nós. Esta malha, juntamente com as propriedades do material é usada para representar matematicamente a rigidez e a distribuição de massa na estrutura (ANSYS 14, 2011). A malha representada possui 5103 elementos.

A primeira análise realizada foi a modal. Esta análise determina as características de vibração (frequências naturais e modos de vibração) de uma estrutura ou um componente de máquina. Ela também pode servir como ponto de partida para análises mais detalhadas como a harmônica e a transiente. As frequências naturais e modos de vibração são parâmetros importantes no projeto de uma estrutura para as condições de carregamento dinâmico (ANSYS 14, 2011).

Tomando como exemplo o mecanismo presente na maioria dos trabalhos científicos publicados na área de captação de energia piezoelétrica, que são 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. Diante desses fatos, pesquisadores da área utilizam-se das técnicas de modelagem numérica baseadas na análise de elementos finitos para predição do comportamento mecânico de estruturas em teste por meio de simulações computacionais. A análise modal permitiu a esses autores, o acesso as frequências de ressonância e aos modos de vibração da estrutura em estudo, além do conhecimento das regiões onde há o maior deslocamento e a maior deformação, essa última é extremamente importante para a localização adequada do elemento piezoelétrico na viga. Assim, o MEF é uma ferramenta de estudo que oferece meios de melhorar a eficiência dos captadores de energia, pois permite que ajustes geométricos do dispositivo sejam feitos e testados no modelo virtual de modo que a sua frequência natural coincida com as vibrações do ambiente em que o gerador será inserido. Após suas análises SAADON *et al.* (2011) revelaram que os parâmetros mais importantes que influenciam a frequência natural são a espessura da viga, a espessura da camada piezoelétrica e comprimento da viga.

No caso dos captadores MEMS 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 mecânica causado pelo acréscimo dessa massa é irrelevante.

Neste trabalho, as simulações computacionais realizadas envolvem somente a célula cilíndrica de PZT, desconsiderando todos os efeitos do acoplamento mecânico existentes na montagem experimental; isso se deve a alta complexidade em torno do desenvolvimento de um modelo numérico que envolvesse vários componentes e diferentes tipos de materiais.

A segunda análise numérica foi desenvolvida com o objetivo de expor o comportamento da célula de PZT quando submetida a uma taxa cíclica de

deslocamento dentro de um intervalo de frequência conhecido. Assim sendo, o elemento foi sujeito a uma análise harmônica com o intuito de obter como resposta o comportamento do deslocamento em função da frequência.

As análises harmônicas são utilizadas para determinar a resposta do estado estacionário de uma estrutura a cargas harmônicas variáveis no tempo, permitindo, portanto, verificar se sua estrutura irá superar ou não com sucesso a ressonância, fadiga e outros efeitos nocivos causados pelas vibrações forçadas. Nessa análise, todas as cargas, bem como a resposta da estrutura variam sinusoidalmente com a mesma frequência. Uma análise harmônica típica irá calcular a resposta da estrutura a cargas cíclicas por uma gama de frequência e obter um gráfico de alguma resposta (geralmente deslocamentos) em função da frequência (ANSYS 14, 2011).

Quando os objetos de estudo são configurações com baixo valor de frequência natural, a análise harmônica realiza-se em meio a uma faixa de frequência que engloba ao menos uma das frequências naturais do sistema.

As análises harmônicas desenvolvidas neste trabalho consideraram um deslocamento cíclico aplicado na face superior da célula de 1×10^{-7} m (valor especulado), o qual é avaliado no intervalo de frequência que vai de 1 a 350 Hz. A face inferior do cilindro encontra-se parcialmente engastada, com os movimentos no sentido -z inibidos, como mostrado na Figura 4.3.

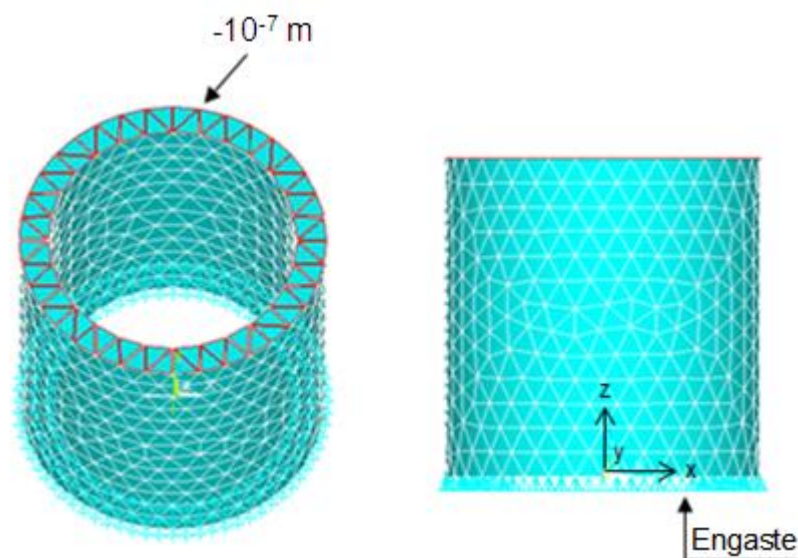


Figura 4.3 – Cilindro submetido à análise harmônica

4.2 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento experimental, pleiteou-se a concepção de uma estrutura que fosse 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. A geração de energia elétrica por meio da utilização do efeito piezoelétrico direto se dá pela aplicação de uma ação mecânica que resulte na deformação do elemento piezoelétrico. Tal ação pode ser proveniente da exploração de uma fonte de energia limpa e disponível naturalmente no ambiente, normalmente uma forma de energia cinética como o vento, ondas marítimas ou vibrações. Dentre essas, a vibração mecânica se caracteriza como uma boa opção de fonte de energia primária por ser comum em ambientes fabris – máquinas e equipamentos industriais; ambientes públicos – no movimento humano e de veículos; e ambientes residenciais – em alguns eletrodomésticos, por exemplo. Assim sendo, foi desenvolvida uma estrutura capaz de simular um ambiente no qual a célula de PZT pudesse ser submetida a diferentes faixas de frequências e de amplitudes de vibração mecânica.

4.2.1 Estrutura experimental

A estrutura experimental foi projetada e montada no Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas (LaSEA). Em primeiro momento, a estrutura foi construída tendo em vista uma configuração mecânica que fornecesse a uma célula piezoelétrica cargas cíclicas de compressão, tomando como base o esquema ilustrado na Figura 4.4.

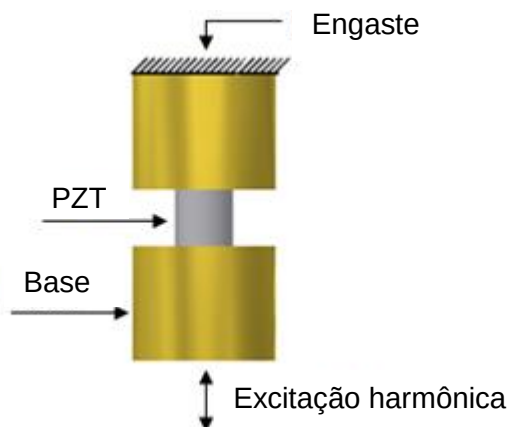


Figura 4.4 – Esquema para compressão de um cilindro piezoelétrico

Desse modo, seguindo o princípio de funcionamento esquematizado na Figura 4.4, utilizou-se como fonte de vibração o excitador eletromagnético - *shaker* ET-140 da *Labworks Inc.* (uma máquina de vibrações que permite regular a frequência e a amplitude de oscilação da estrutura) o qual foi colocado em uma base formada por chapas de aço que auxilia na montagem do aparato mecânico em que a célula piezoelétrica está envolvida, como o esquematizado na Figura 4.5.

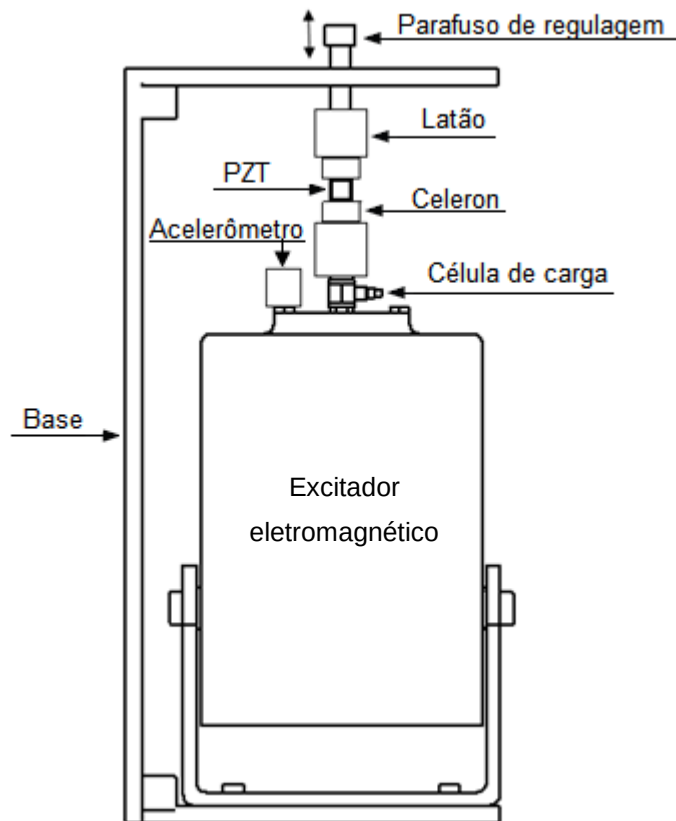


Figura 4.5 – Esquema do aparato mecânico montado para o estudo da piezocerâmica

Analisando a configuração mostrada na Figura 4.5 é possível constatar que o movimento vibratório proveniente do excitador eletromagnético é transmitido à célula de PZT pela região inferior da mesma enquanto a parte superior permanece fixa à estrutura da base, causando assim a compressão do elemento piezoelétrico. O nível de compressão, e, conseqüentemente, de deformação sofrida pela célula, depende diretamente da frequência e da amplitude de vibração transmitida do atuador à estrutura. A célula de PZT está em meio a quatro peças, sendo duas de

latão e duas de celeron, ambos os materiais com rigidez mecânica relativamente elevada, de modo que o amortecimento mecânico e a deformação sejam mínimos evitando a dissipação de energia mecânica sob os mesmos, garantindo que os níveis de força e de vibração vindos da fonte sejam transmitidos quase que integralmente ao elemento piezoelétrico. Tais peças servem de suporte para o PZT, onde as de latão estão em contato direto com a parte superior do atuador e a parte superior da base de sustentação onde está atrelada ao parafuso regulador de altura. O celeron é constituído em tecido de algodão e resina fenólica prensados, dando origem a um material duro e denso, muito resistente ao desgaste e ainda isola eletricamente o PZT de toda estrutura metálica do protótipo. Além disso, essas peças nivelam e estabilizam o elemento na estrutura, fazendo com que a carga mecânica seja aplicada à célula de maneira uniforme. Uma foto das peças de latão, celeron e do cilindro de PZT estão mostradas na Figura 4.6.

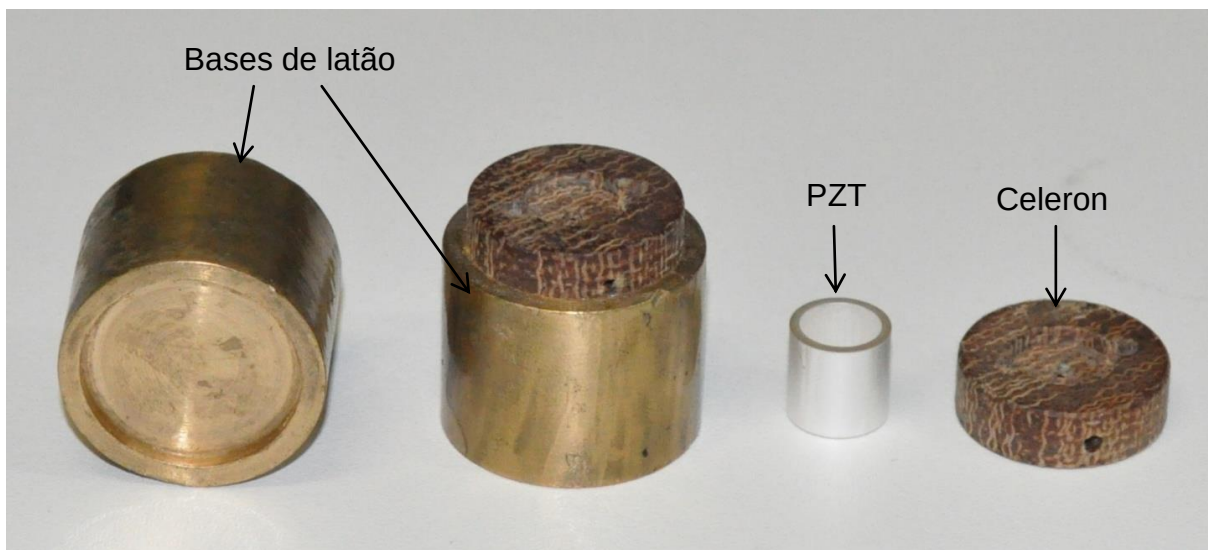


Figura 4.6 – Elemento piezoelétrico e suas bases de acomodação

Para fazer a leitura dos sinais de vibração mecânica e da força de compressão exercidos sobre a célula, foram utilizados um acelerômetro e um sensor de força. O modelo do acelerômetro é o SN 393B04, produzido pela PCB *PIEZOTRONICS^{INC.}*, com capacidade de medir aceleração em uma faixa de ± 5 g com sensibilidade de 1 V/g ou 102 mV/(m/s²) e capacidade de operar entre a faixa de 0,06 a 450 Hz com erro de $\pm 5\%$. O sensor de força utilizado foi o modelo

208C03 também produzido pela PCB *PIEZOTRONICS*^{INC.}, com capacidade de medida de compressão de 2,224 kN com sensibilidade de 2248 mV/kN. Cada um dos sensores é interligado a um condicionador de sinais, modelo 480E09 da PCB *PIEZOTRONICS*^{INC.}. A Figura 4.7 mostra os sensores utilizados.

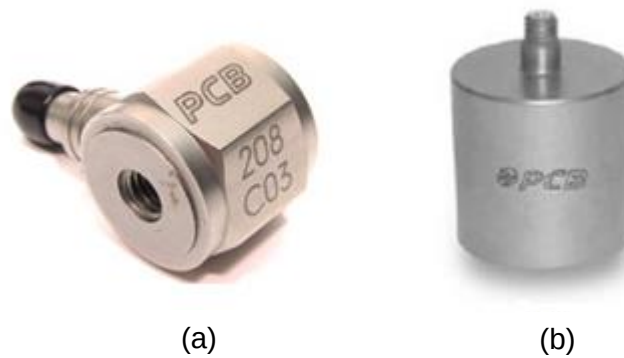


Figura 4.7 – Sensores. (a) Sensor de força 208C03; (b) acelerômetro 393B04

Na Figura 4.8 está mostrada a montagem experimental dos componentes recém-comentados, acomodados entre o atuador e a estrutura de base.

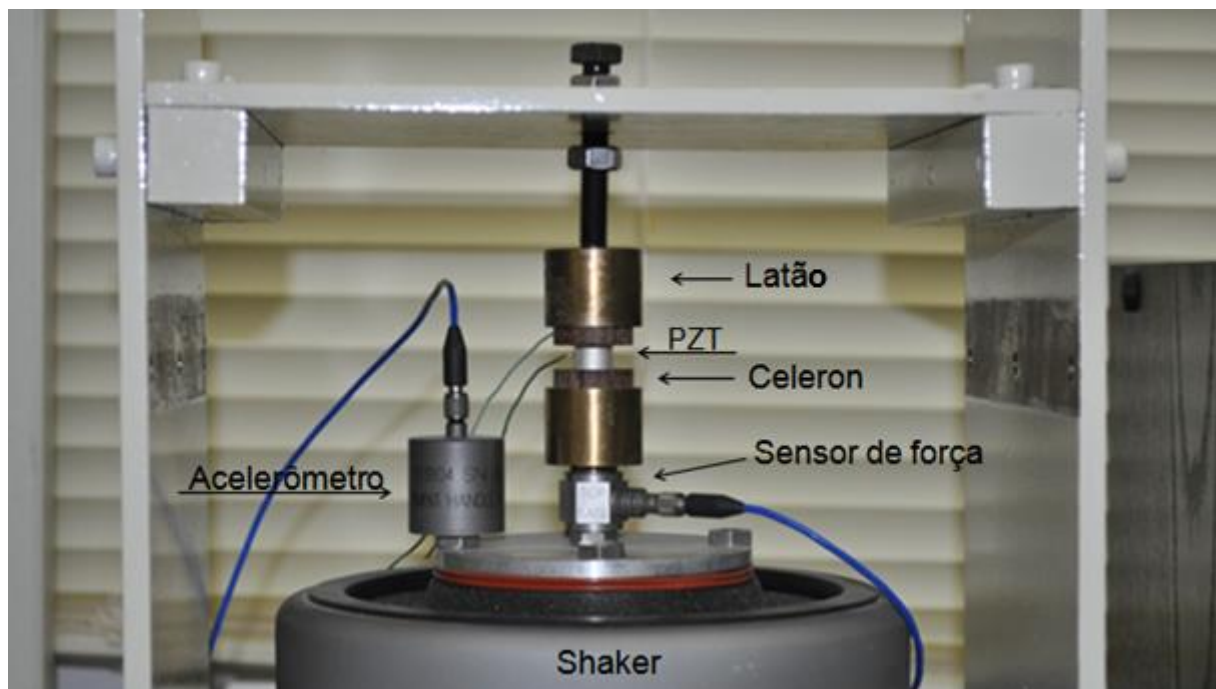


Figura 4.8 – Montagem experimental para estudo do PZT

Em um segundo momento, foi concebida uma estrutura capaz de comportar três células piezoelétricas, possibilitando assim, a análise do comportamento conjunto das mesmas. As bases de celeron que comportam as células estão mostradas na Figura 4.9. Na Figura 4.10 é apresentado a montagem experimental.

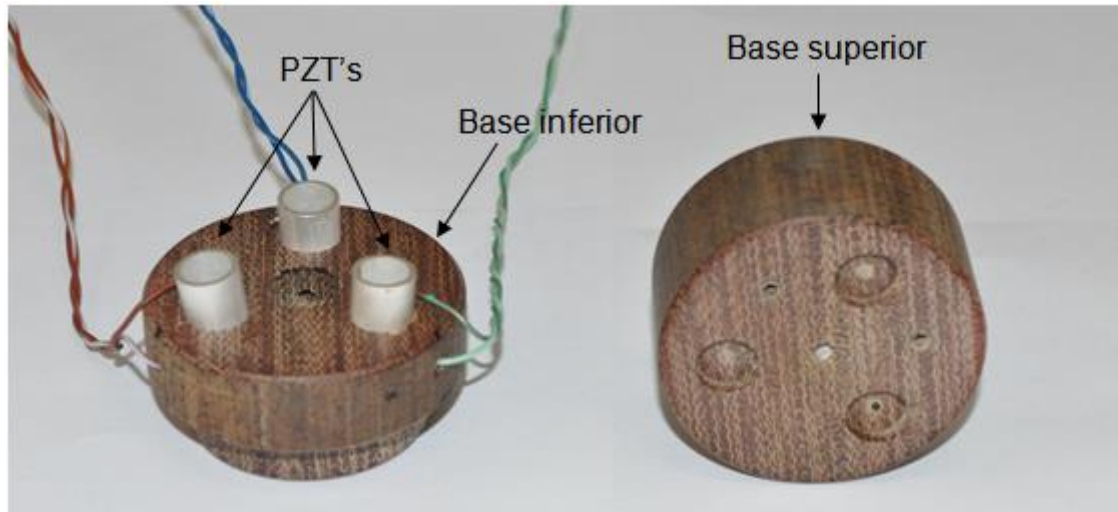


Figura 4.9 – Bases de acomodação para o conjunto de três células

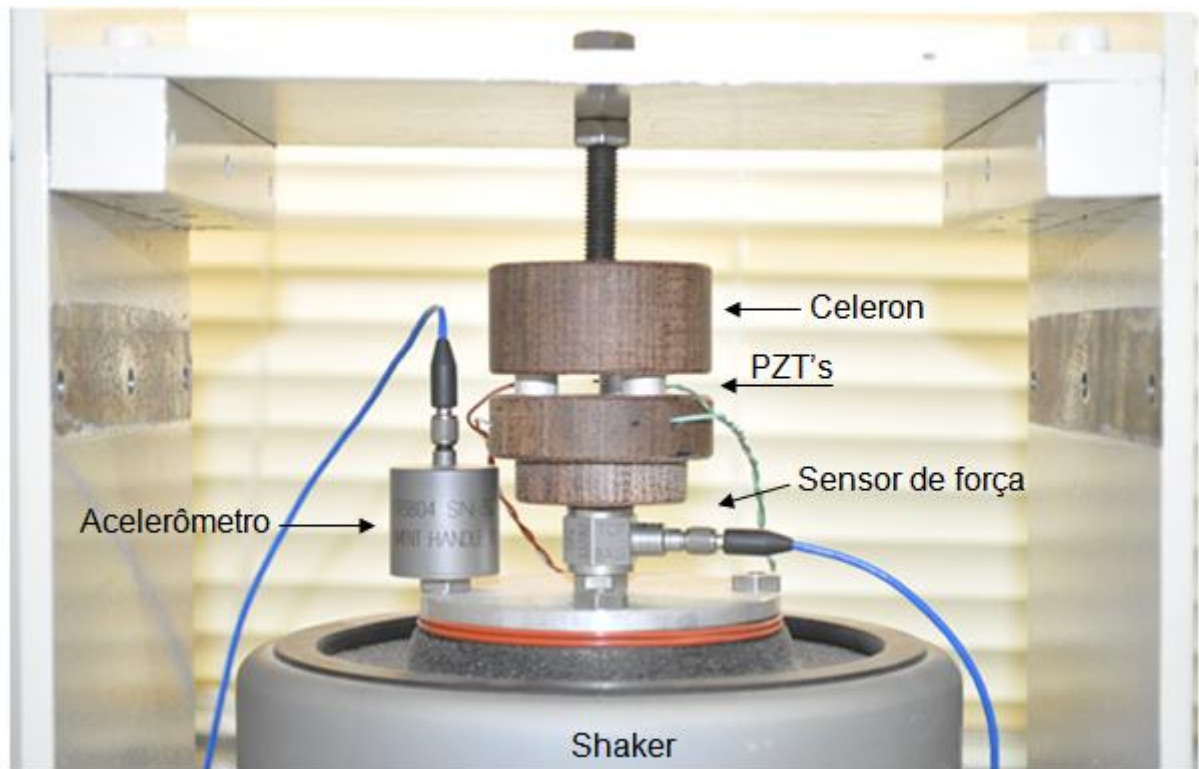


Figura 4.10 – Montagem experimental para estudo do conjunto de PZT's

De modo geral, toda a planta experimental está instrumentada com osciloscópio, gerador de funções, fonte de tensão, atuador eletromagnético, amplificador de potência, elemento piezoelétrico, sensor de carga e acelerômetro, módulos condicionadores de sinais, placa de aquisição de dados e computador, como esquematizado na Figura 4.11.

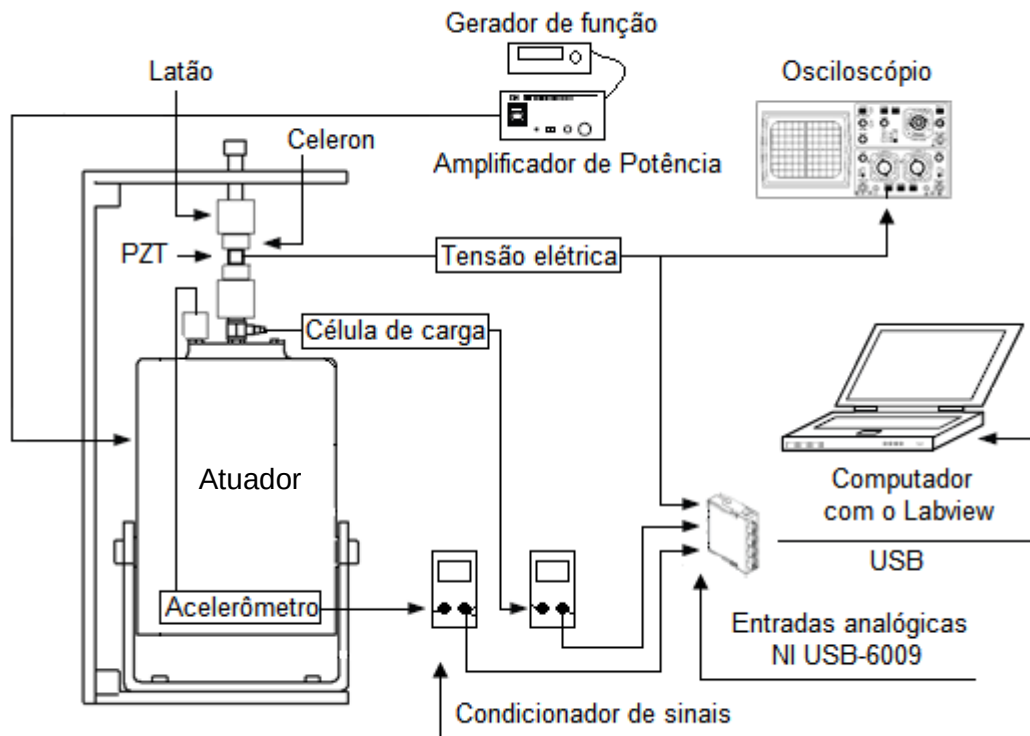


Figura 4.11 – Esquemático da montagem experimental

Os dados de frequência e amplitude de vibração de saída do atuador são ajustados através do gerador de funções que está conectado ao amplificador de potência que por sua vez alimenta o atuador. O sensor de força está conectado diretamente a parte superior do atuador, onde serve de base de fixação para uma série de componentes, entre esses o cilindro piezoelétrico. O acelerômetro, utilizado para captar a aceleração aplicada ao sistema, foi também conectado na parte superior do excitador e o mais próximo possível da base da pilha de componentes; esse dispositivo capta variações de aceleração e as transformam em um sinal elétrico analógico. O sistema para a aquisição dos dados gerados pela planta experimental é baseado no *hardware* e *software* da *National Instruments*. Os sinais de interesse são colhidos pelos sensores, condicionados e enviados para o módulo

de aquisição NI USB-6009, recebidos via USB pelo 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 são analisados diretamente com o auxílio do osciloscópio de 10 M Ω . A fotografia da bancada de trabalho experimental está mostrada na Figura 4.12.



Figura 4.12 – Bancada de trabalho experimental

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão relatados os resultados e discussões a cerca das simulações computacionais e experimentais realizadas no intuito de caracterizar a célula cilíndrica de PZT como um elemento gerador de energia elétrica.

Em primeiro momento são mostradas as frequências naturais e os respectivos modos de vibração do modelo virtual como resultado de uma análise modal. Em seguida os níveis de deslocamentos nodais e a quantidade de tensão elétrica gerada quando a célula é submetida a um deslocamento de $0,1\ \mu\text{m}$, 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 força de compressão mecânica e a aceleração a qual as estruturas foram submetidas, analisados em um intervalo de frequência de 10 a 350 Hz (por ser formado por frequências comuns em ambientes fabris, públicos, residenciais e etc.), com níveis de amplitude de excitação distintos.

5.1 MODELAGEM NUMÉRICA

Carregando os parâmetros do cilindro piezoelétrico em estudo no modelo de análise modal desenvolvido, tem-se que as três primeiras frequências naturais são: 19,526 kHz; 25,635 kHz e 30,138 kHz. O segundo e o terceiro modo de vibração encontram-se ilustrados nas Figuras 5.1 e 5.2. O primeiro modo não é visualmente perceptivo por se tratar de um movimento axial apenas.

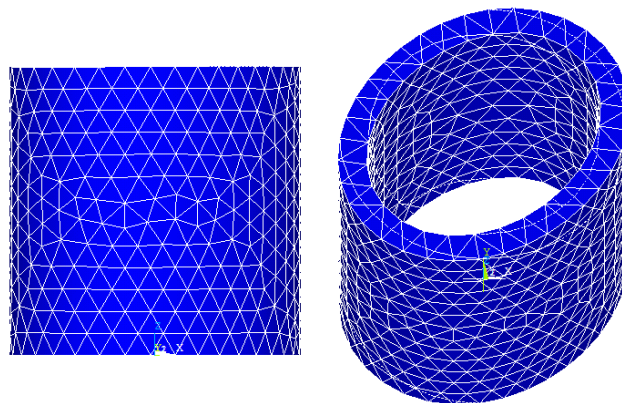


Figura 5.1 – Segundo modo de vibração (25,635 kHz)

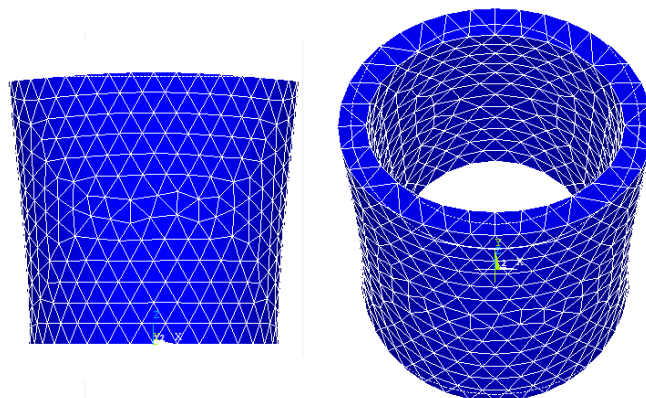


Figura 5.2 – Terceiro modo de vibração (30,138 kHz)

A partir dessas simulações, constatou-se a inviabilidade de trabalhar com a célula de PZT em frequências próximas a suas faixas de ressonância devido a magnitude das mesmas, uma vez que, nas aplicações práticas, os geradores piezoelétricos são normalmente acoplados a fontes de vibrações com valores de frequências bem menores. Outro problema é a limitação de submissão do elemento piezoelétrico aqui em estudo, às altas frequências de trabalho, por se tratar de um material cerâmico.

O interessante de se poder trabalhar com os mecanismos captadores de energia piezoelétrica nas frequências próximas às naturais, se dá por ser a faixa de frequências onde ocorrem os maiores níveis de deslocamentos nodais e possivelmente as maiores deformações na estrutura do material, por conseguinte uma maior quantidade de energia elétrica pode ser gerada.

Em um segundo momento, foi desenvolvido um modelo de análise harmônica utilizando-se dos parâmetros do cilindro de PZT. Com a excitação de deslocamento harmônico aplicado à célula, o deslocamento nodal resultante foi significativo apenas na direção z , causando assim apenas um movimento de compressão. Ou seja, para a magnitude de deslocamento aplicado na direção z no intervalo de frequências considerado, os níveis de movimentos cisalhantes (direções x e y) foram mínimos. O movimento de compressão pode ser visto via *software*, como mostrado na Figura 5.3.

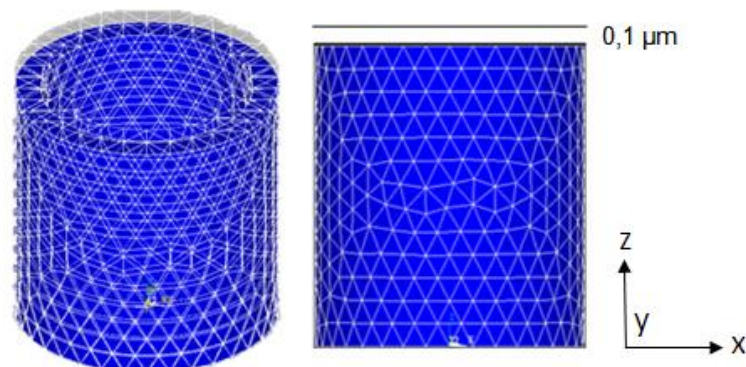


Figura 5.3 – Elemento Piezoelétrico comprimido

Por se tratar de um material cerâmico e possuir uma geometria cilíndrica de espessura considerável, a célula de PZT possui alta rigidez mecânica, característica que inibe o nível de deslocamento nodal e consequentemente a deformação da estrutura.

Para o deslocamento forçado de 1×10^{-7} m aplicado à estrutura, o deslocamento máximo observado na direção z foi exatamente de 1×10^{-7} m, referente a região superior do cilindro piezoelétrico. Quanto mais próximo da face inferior (área engastada) menor é o nível de deslocamento, como ilustrado na Figura 5.4. A barra gráfica indica o nível de deslocamento ocorrido em diferentes regiões do cilindro. A extremidade direita da barra corresponde à região inferior do PZT e indica que o deslocamento na direção z é zero, enquanto, a extremidade esquerda indica que o deslocamento na região superior do cilindro é de 1×10^{-7} m.

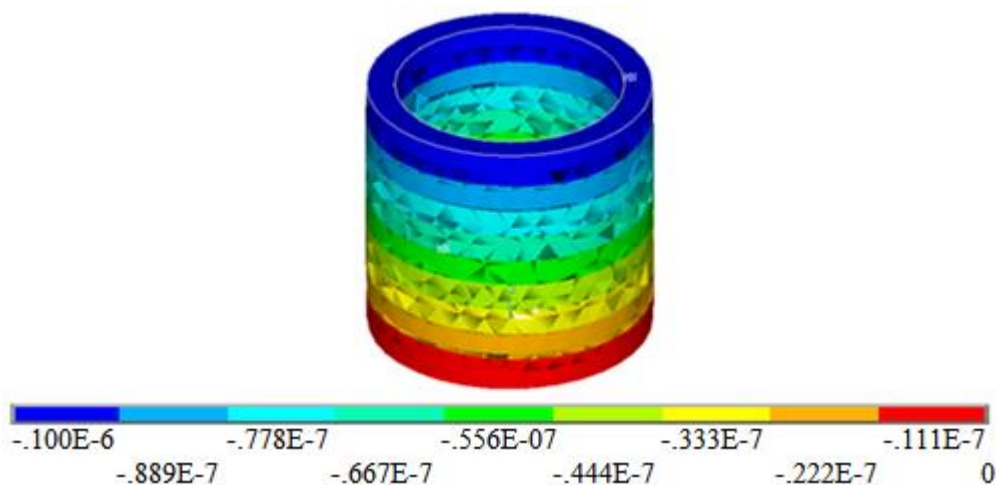


Figura 5.4 – Deslocamento em z

Na Figura 5.5 estão contidos os deslocamentos nas direções x, y e z referentes à excitação na frequência de 300 Hz. O valor observado a esquerda do gráfico é equivalente à região inferior do elemento e diz respeito somente aos deslocamentos nas direções x e y, uma vez que o movimento nodal em z nessa região é zero. Já se compararmos a Figura 5.4 com a 5.5, pode ser visto através das barras gráficas que o nível de deslocamento em x e y é praticamente inexistente na região superior da célula.

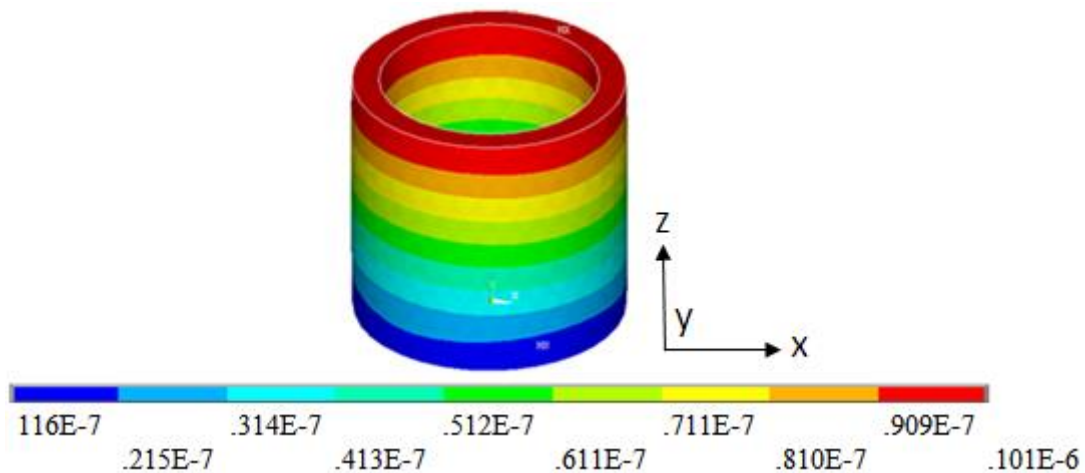


Figura 5.5 – Deslocamentos em x, y e z

Ao analisar o comportamento de alguns nós pertencentes ao elemento discretizado, observou-se que não houve alteração no valor do deslocamento no intervalo de frequência utilizado, devido ao seu baixo valor se comparado à frequência natural do piezoelétrico. O gráfico ilustrado na Figura 5.6, corresponde ao deslocamento na direção z do nó 193 pertencente a região superior do cilindro. Note que o seu valor de deslocamento é igual em todo o intervalo de frequência.

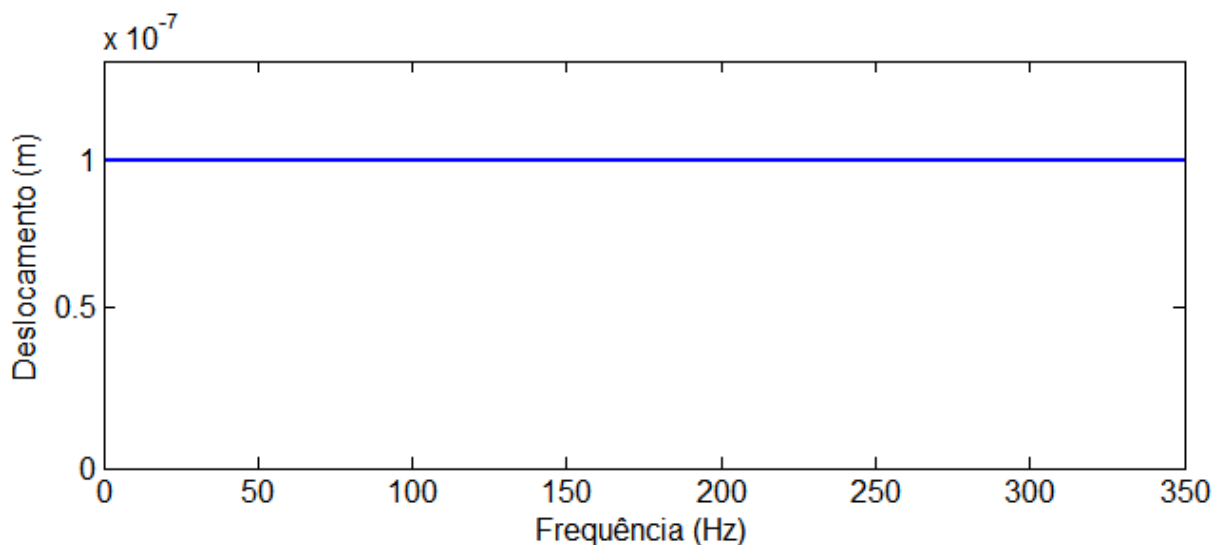


Figura 5.6 – Deslocamento em função da frequência

Considerando uma simulação harmônica em que uma das frequências naturais do elemento em estudo faça parte do intervalo em análise, pode-se então, observar o efeito de tal frequência sob o deslocamento nodal. O gráfico mostrado na Figura 5.7 se refere ao comportamento do deslocamento na direção z do nó 193 em um intervalo de frequência de 19 kHz a 20 kHz. Esse nó pertence à região superior do cilindro que quando excitado em 19,546 kHz (correspondente a primeira frequência natural) apresenta o maior nível de deslocamento.

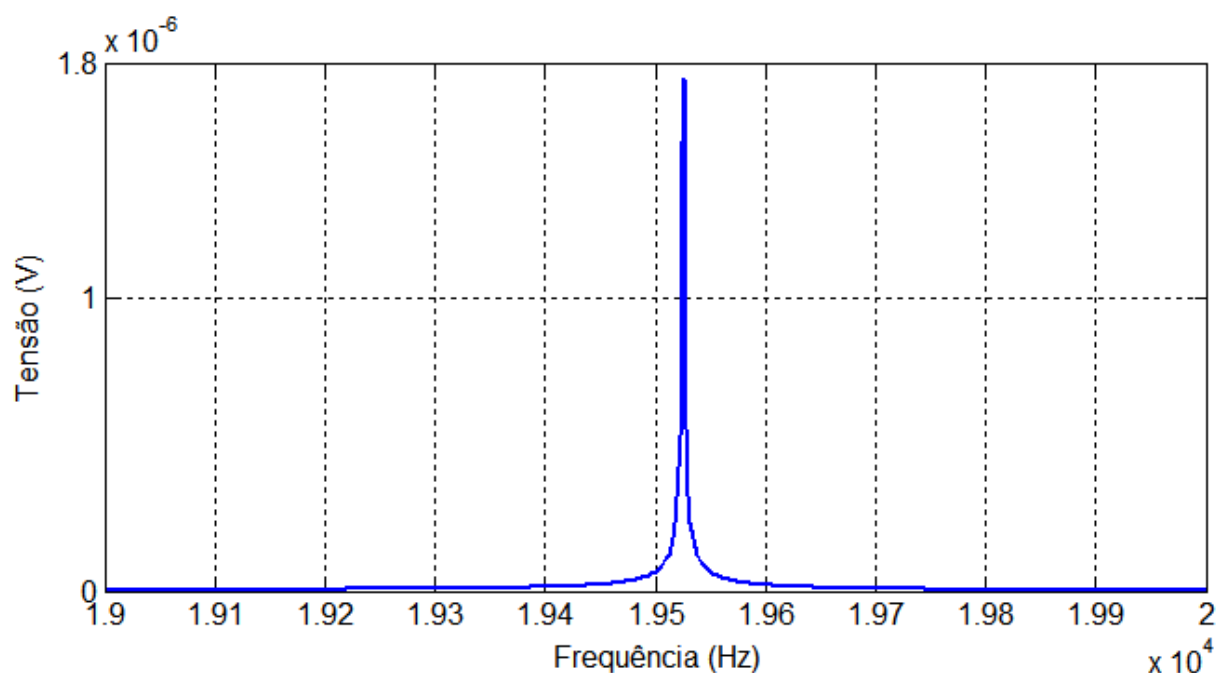


Figura 5.7 – Deslocamento do nó 193 na frequência de ressonância

O gráfico mostrado na Figura 5.7, se caracteriza apenas como um dado informativo do comportamento da célula quanto ao seu nível de deslocamento nodal quando excitada em uma de suas frequências naturais, lembrando que o intervalo de frequência de análise, tanto via *software* quanto experimental, utilizado neste trabalho vai de 10 a 350 Hz.

Outra análise harmônica, desta vez dedicada a investigar se o elemento piezoelétrico com a configuração geométrica aqui proposta é ou não capaz de gerar energia elétrica, foi desenvolvida. As condições de contorno mecânicas foram mantidas (engaste na direção z da face inferior e deslocamento harmônico de $0,1\ \mu\text{m}$ na face superior), mas, novas configurações relacionadas às condições de contorno elétricas foram carregadas no modelo no intuito de polarizar o elemento. Assim, os nós da área interna foram configurados como sendo a área comum (zero volts ou '-') e os nós da área externa foram interligados e configurados como '+'. Diante dessas considerações, o modo de acoplamento eletromecânico do sistema é o 31. O modelo polarizado está mostrado na Figura 5.8.

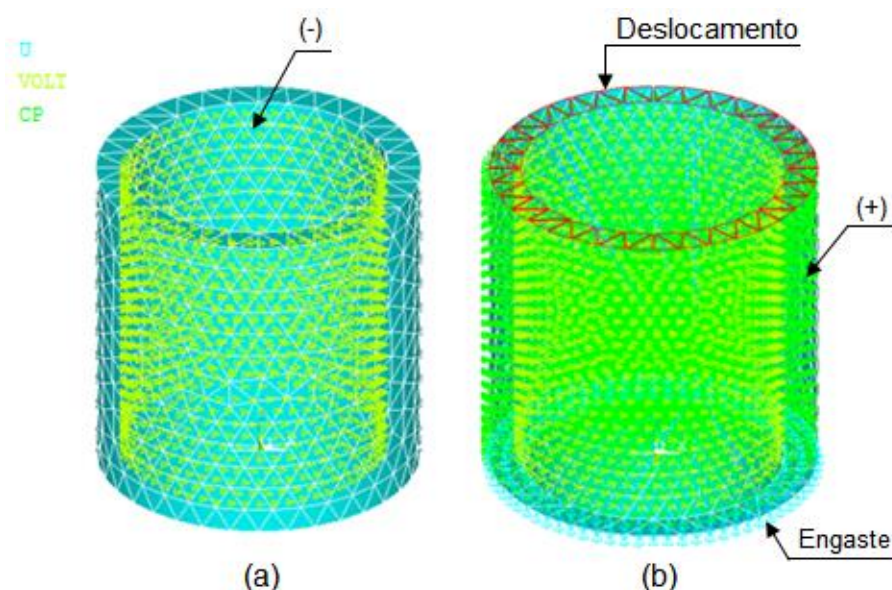


Figura 5.8 – Configurando as condições de contorno elétrica na célula (polaridade).
(a) área interna polarizada (-); (b) área externa polarizada (+)

A Figura 5.9 mostra os níveis de potencial elétrico gerados relacionando-os com diferentes regiões na célula quando excitada em 300 Hz. Os níveis mais elevados de tensão elétrica correspondem às regiões que sofreram maior deformação mecânica.

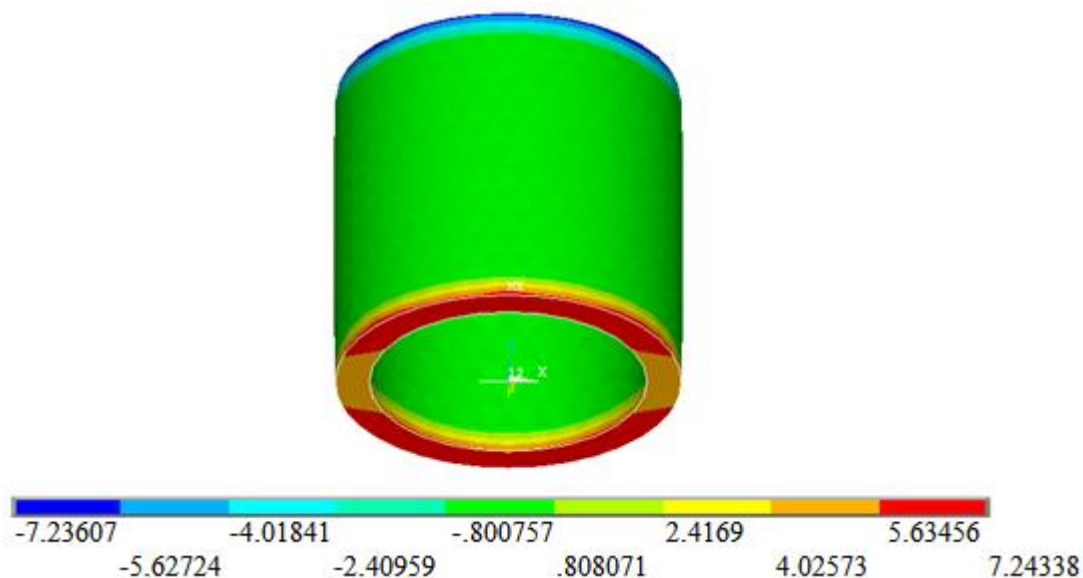


Figura 5.9 – Tensão elétrica gerada em 300 Hz

Ao observar o comportamento de alguns nós pertencentes ao elemento discretizado, observou-se que não houve alteração no valor do potencial elétrico gerado no intervalo de frequência utilizado, isso já era esperado, pois, os níveis de deslocamento e conseqüentemente de deformação foram praticamente invariantes durante esse mesmo intervalo. O gráfico ilustrado na Figura 5.10 equivale ao maior valor de tensão elétrica, indicado pelo ANSYS, equivalente a 7,3 V que corresponde ao nó 185 que se localiza próximo a região engastada. Note que o valor é igual em todo o intervalo de frequência.

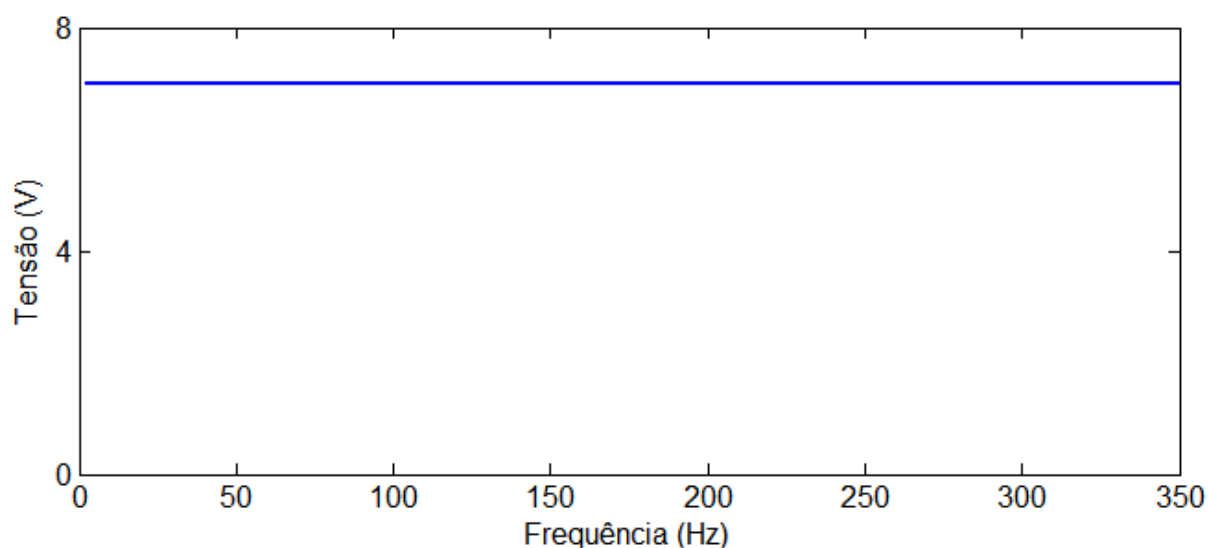


Figura 5.10 – Tensão elétrica no nó 185

Considerando uma simulação harmônica em que uma das frequências naturais de vibração do elemento em estudo faça parte do intervalo em análise, pode-se então, observar o efeito de tal frequência sob o potencial elétrico gerado. O gráfico mostrado na Figura 5.11 se refere ao comportamento da tensão elétrica do nó 185 (mesmo nó avaliado na Figura 5.10) em um intervalo de frequência de 19 kHz a 20 kHz. Pode ser visto graficamente que quando excitado em 19,546 kHz (correspondente a primeira frequência natural) o nível de tensão elétrica que fora dessa faixa de frequência era de 7,3 V, passa a atingir o valor de 18,974 kV na ressonância.

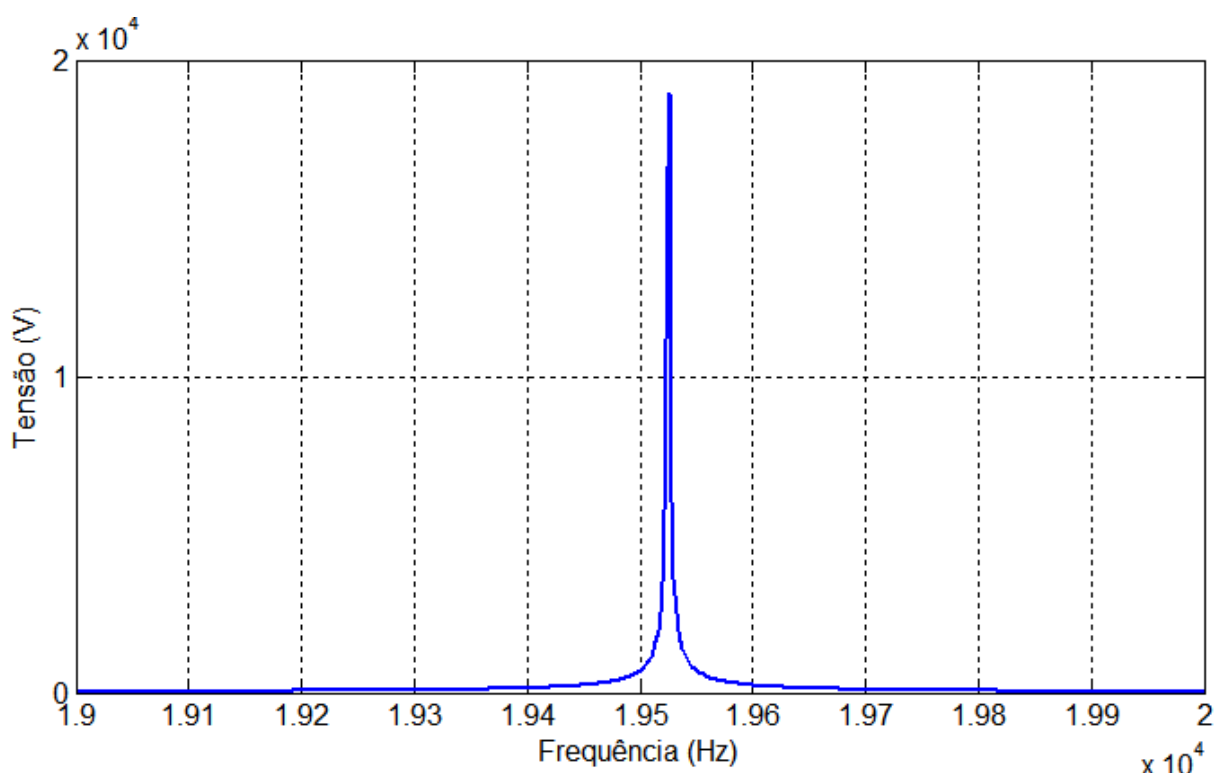


Figura 5.11 – Tensão elétrica no nó 185 na frequência de ressonância

Lembrando mais uma vez que os gráficos mostrados nas Figuras 5.7 e 5.11 se caracterizam apenas como dados informativos do comportamento da célula quanto aos seus níveis de deslocamento nodal e tensão elétrica quando excitada em uma de suas frequências naturais.

A partir dessas análises computacionais, foi possível verificar que o elemento piezoelétrico de PZT com geometria cilíndrica, é capaz de produzir energia elétrica quando comprimido verticalmente. O desenvolvimento dessas simulações foi

imprescindível para o decorrer do trabalho, visto que, durante os primeiros meses da pesquisa ainda não tinha-se células de PZT à disposição para testes, assim sendo, os primeiros resultados favoráveis a viabilização do desenvolvimento de uma pesquisa que envolvesse a utilização de elementos piezoelétricos cilíndricos para geração de energia elétrica, foram frutos das simulações computacionais.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A partir da estrutura detalhada no Capítulo 4 foram, em primeiro momento, realizadas as experimentações envolvendo uma célula de PZT. Como já informado anteriormente, os dados de frequência e amplitude de vibração de saída do atuador são ajustados através do gerador de funções que está conectado ao amplificador de potência que por sua vez alimenta o excitador eletromagnético. Sabendo disso, inicialmente o gerador de funções foi regulado para fornecer um sinal de frequência variando entre 10 e 350 Hz com amplitude de 100 mVpp. Na Figura 5.12 mostra-se o gráfico da tensão elétrica de saída e da força de compressão sobre o elemento piezoelétrico quando a estrutura foi submetida a essas características de vibração. A partir do gráfico, constata-se que quando a estrutura é excitada com uma frequência em torno de 10 Hz a célula sofre uma força de compressão de 5 N e gera uma tensão de 3,8 VCA de pico-a-pico. Esses valores sofrem uma pequena diminuição até 3,9 N e 3 V apresentando pouca variação destes entre 50 e 125 Hz, de onde passam a crescer atingindo os valores de 4,3 V e 4,95 N em 141 Hz. Entre o intervalo de 141 a 146 Hz a tensão elétrica e a força de compressão caem abruptamente para 1 V e 1,6 N respectivamente. A partir de 146 Hz voltam a crescer junto com a frequência, atingindo o potencial elétrico máximo de 10,8 V em uma frequência de trabalho de 295 Hz e sob uma força de 11,6 N. A partir desse ponto os valores decrescem com o acréscimo da frequência chegando a 1,3 V e 1 N em 350 Hz.

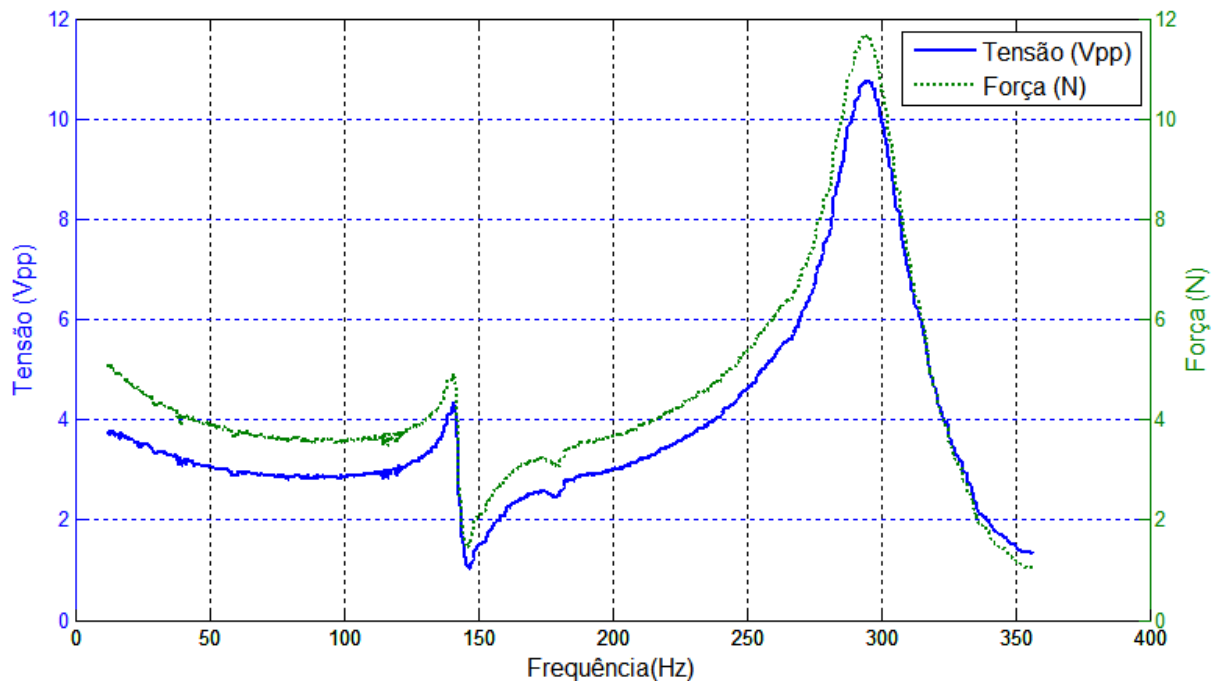


Figura 5.12 – Tensão elétrica e força de compressão em função da frequência

A partir desses dados, foi possível observar a correspondência eletromecânica do fenômeno piezoelétrico pelo comportamento dinâmico do gráfico que relaciona tensão elétrica e compressão mecânica, mostrando que quanto mais a célula é comprimida e conseqüentemente mais deformada, um maior nível de tensão elétrica é gerado. A força de compressão e o potencial elétrico assumem valores máximos em torno de 295 Hz. Possivelmente, pelo fato da frequência de excitação fornecida pelo atuador ter coincidido com a frequência natural do acoplamento mecânico experimental.

Com o objetivo de verificar se os picos de tensão elétrica e força de compressão 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 NI USB-6009 através da célula piezoelétrica e tratada no *LabView*. Na Figura 5.13 mostra-se o espectro de potência obtido no ensaio por impactos.

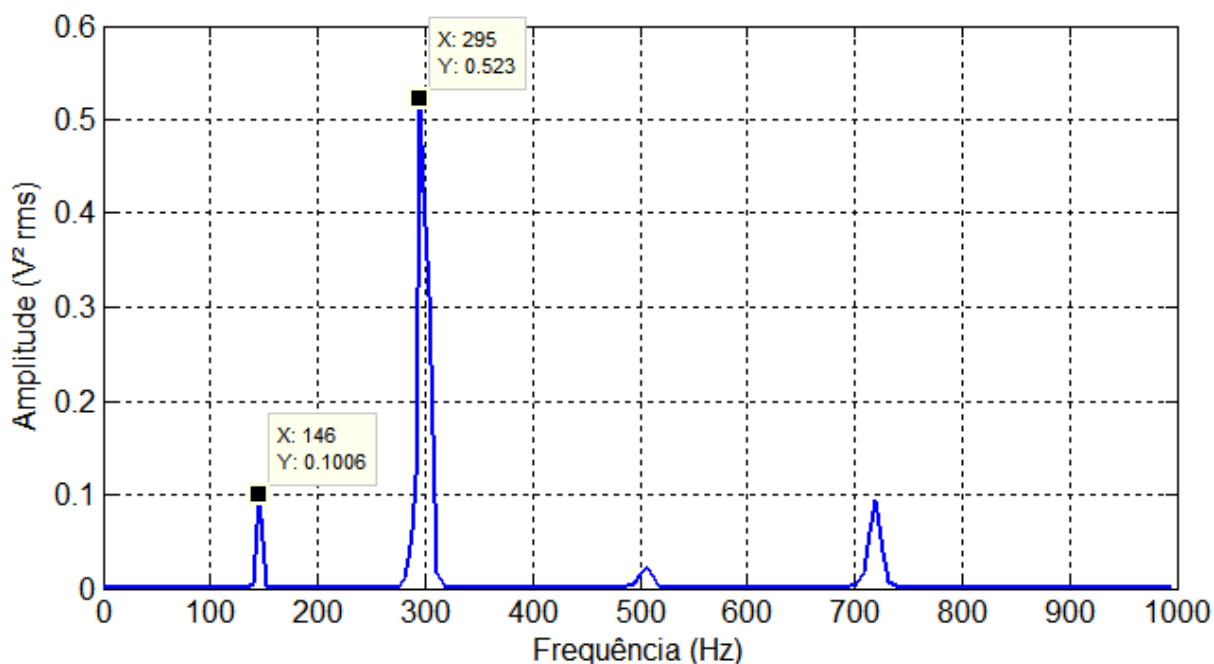


Figura 5.13 – Espéctro com as frequências naturais da estrutura experimental

No gráfico da Figura 5.13 apresenta-se uma clara predominância de algumas frequências em relação às demais que equivalem às frequências naturais (aquelas que foram excitadas) da estrutura. Percebe-se que entre 10 e 350 Hz (faixa de frequência utilizada nas análises deste trabalho), existe a concentração de energia entre dois pequenos intervalos de frequência atingindo valores máximos em 146 e 295 Hz que, equivalem a duas frequências naturais do sistema sendo que em 295 Hz a concentração de energia é mais elevada. A partir desses resultados, é possível afirmar que o comportamento dinâmico do gráfico que relaciona tensão e força, mostrado na Figura 5.12, corresponde ao comportamento da estrutura experimental quando excitada mecanicamente, ou seja, as frequências onde ocorrem os níveis mais altos de tensão elétrica e força de compressão coincidem com as frequências naturais da estrutura.

Em outra investigação experimental, foi analisado o comportamento do excitador eletromagnético sem carga, como mostrado na Figura 5.14, ou seja, toda a estrutura montada sobre o atuador foi retirada (mantendo-se somente o acelerômetro). Nessas condições, o mesmo foi submetido ao teste de impactos, semelhante ao realizado com a estrutura completa. Na Figura 5.15 mostra-se o sinal proveniente do acelerômetro durante os ensaios.



Figura 5.14 – Excitador eletromagnético sem carga

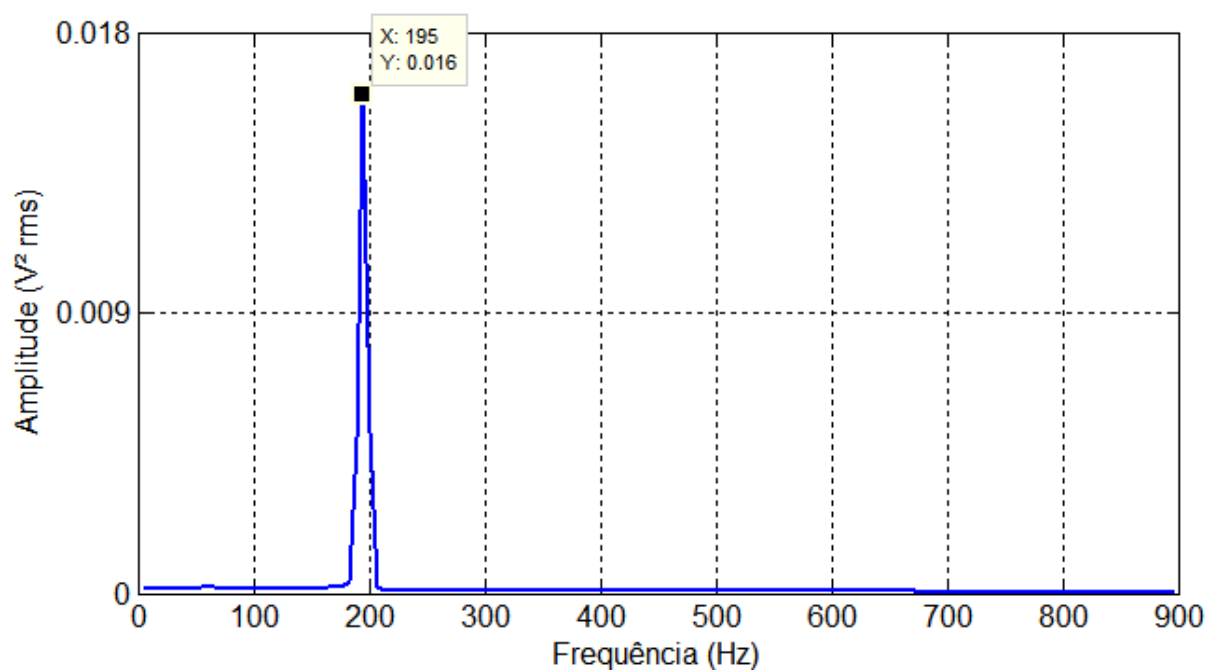


Figura 5.15 – Espéctro com a frequência natural do atuador

A partir do gráfico da Figura 5.15 pode ser visto a concentração de energia em um pequeno intervalo de frequências, onde o valor máximo foi atingido em 195 Hz, correspondendo assim, a uma das frequências naturais do atuador.

Tratando-se ainda do atuador sem carga, o mesmo foi posto em funcionamento utilizando diferentes amplitudes de tensão de alimentação e analisado no intervalo de frequência de 10 a 500 Hz. Na Figura 5.16 é mostrado o sinal proveniente do acelerômetro durante um dos ensaios.

O comportamento dinâmico do sinal adquirido nas análises do atuador sem carga corresponde ao existente entre as frequências de 141 Hz e 146 Hz, quando o mesmo está acoplado à estrutura. Essa correspondência pode ser vista graficamente na Figura 5.16, onde estão relacionados os sinais de aceleração (atuador sem carga) e tensão elétrica (atuador com carga).

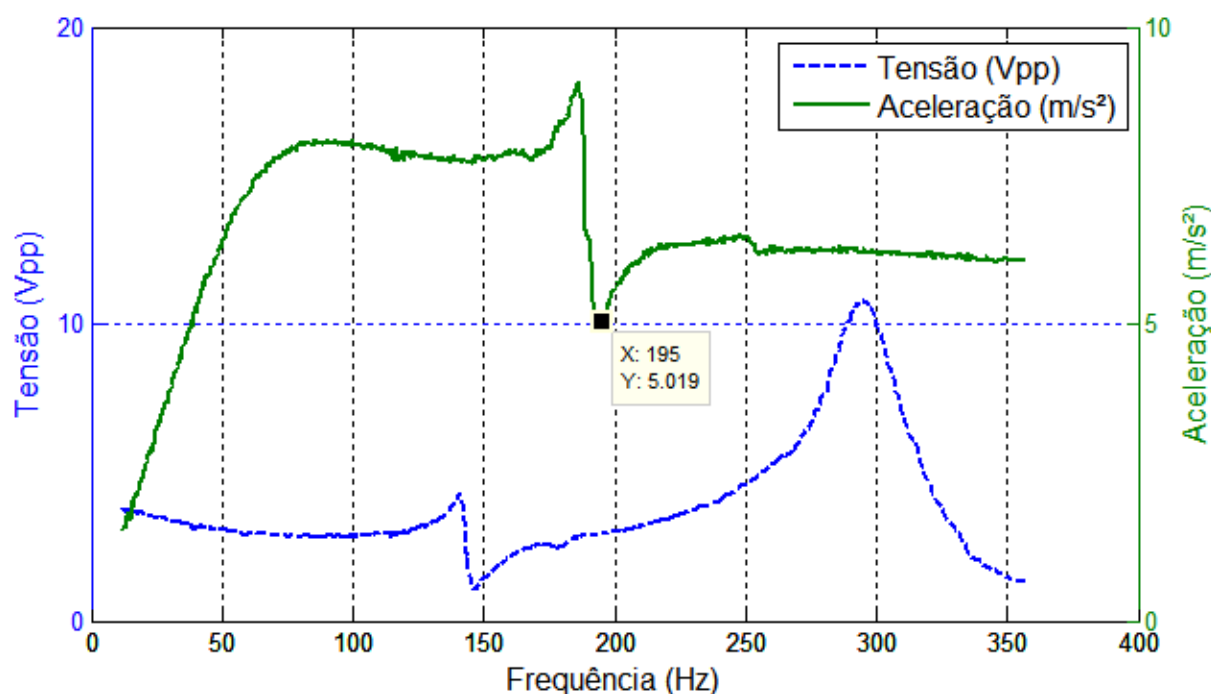


Figura 5.16 – Comportamento do sinal de aceleração do *shaker* atuando sem carga e do sinal de tensão elétrica gerado no PZT em função da frequência

Para a análise do atuador com carga pode ser visto que o sinal de tensão elétrica apresenta uma diminuição abrupta em 146 Hz e a predominância de valores em torno de 295 Hz, correspondentes a duas frequências naturais do conjunto experimental. Por conseguinte, é possível concluir que quando o atuador é conectado à estrutura de testes sua frequência natural desloca-se de 195 Hz para 146 Hz; provavelmente pelos efeitos do acoplamento mecânico entre o atuador e o restante da estrutura experimental. Ou seja, essas análises permitiram que na

interpretação gráfica dos sinais de tensão elétrica, força de compressão e aceleração colhidos da estrutura de testes, a diminuição dos valores dos sinais, em torno da frequência de 146 Hz, seja relacionado a uma frequência natural do atuador e que o ponto onde o sinal em análise atinge valor máximo, 295 Hz, seja relacionado à frequência natural do restante da estrutura experimental.

Com os motivos que explicam o comportamento dinâmico dos sinais aqisitados já definidos, as verificações práticas continuaram a ser realizadas.

O gráfico ilustrado na Figura 5.17 relaciona os sinais de tensão elétrica e aceleração aqisitados da estrutura em função da frequência, quando a amplitude de tensão de alimentação proveniente do gerador de sinais foi de 100 mVpp. A resposta de ambos os sinais procedem com o mesmo comportamento dinâmico, ou seja, seus valores crescem e decrescem juntos (nas mesmas faixas de frequências).

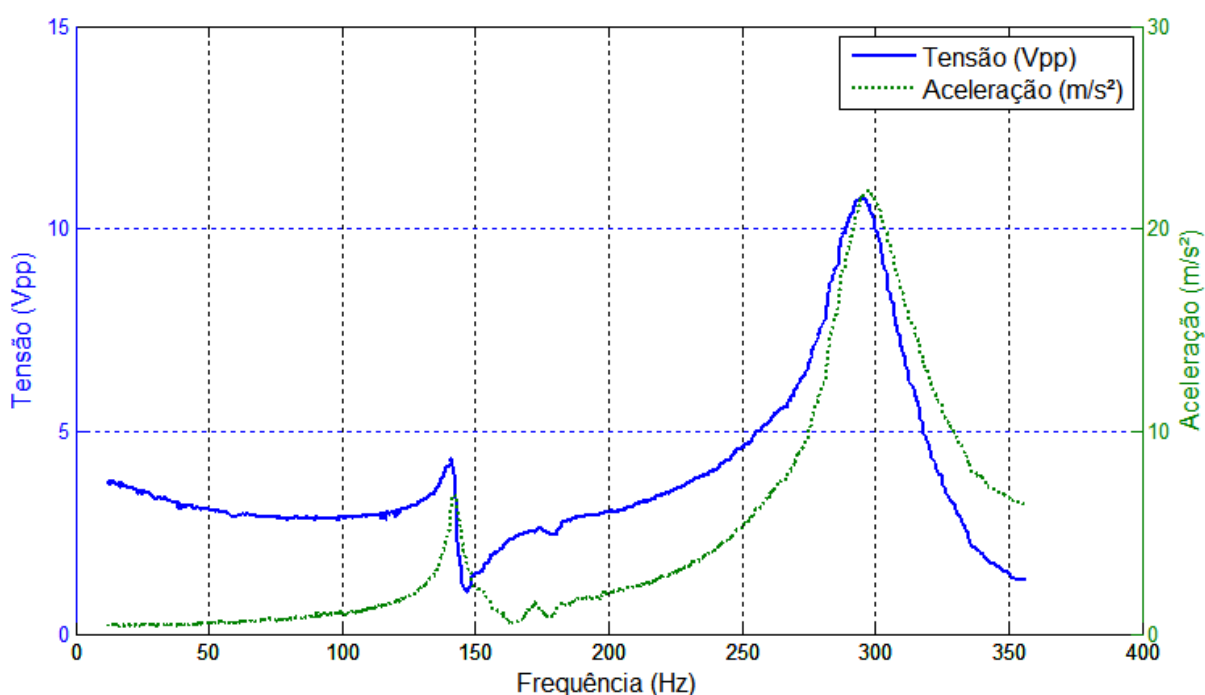


Figura 5.17 – Tensão elétrica e aceleração em função da frequência

O pequeno valor de deslocamento na frequência que pode ser observado entre os sinais de tensão e aceleração é, possivelmente, consequência da distância dentre o posicionamento do acelerômetro e do PZT na estrutura de testes. O valor máximo de tensão gerada pelo PZT foi de 10,8 V quando excitado em 295 Hz e sob uma aceleração de 21,58 m/s².

A partir do sinal de aceleração medido em uma dada estrutura é possível calcular o nível de deslocamento na mesma. O gráfico mostrado na Figura 5.18 relaciona o sinal de tensão elétrica gerada pelo PZT com o deslocamento estrutural calculado a partir do sinal de aceleração mostrado na Figura 5.17.

Ao analisar a Figura 5.18 constata-se que nas baixas frequências, quando os valores da aceleração são muito baixos, o nível de deslocamento é relativamente alto. A partir de 35 Hz, os valores do deslocamento da estrutura se mantêm na ordem de micro-metros.

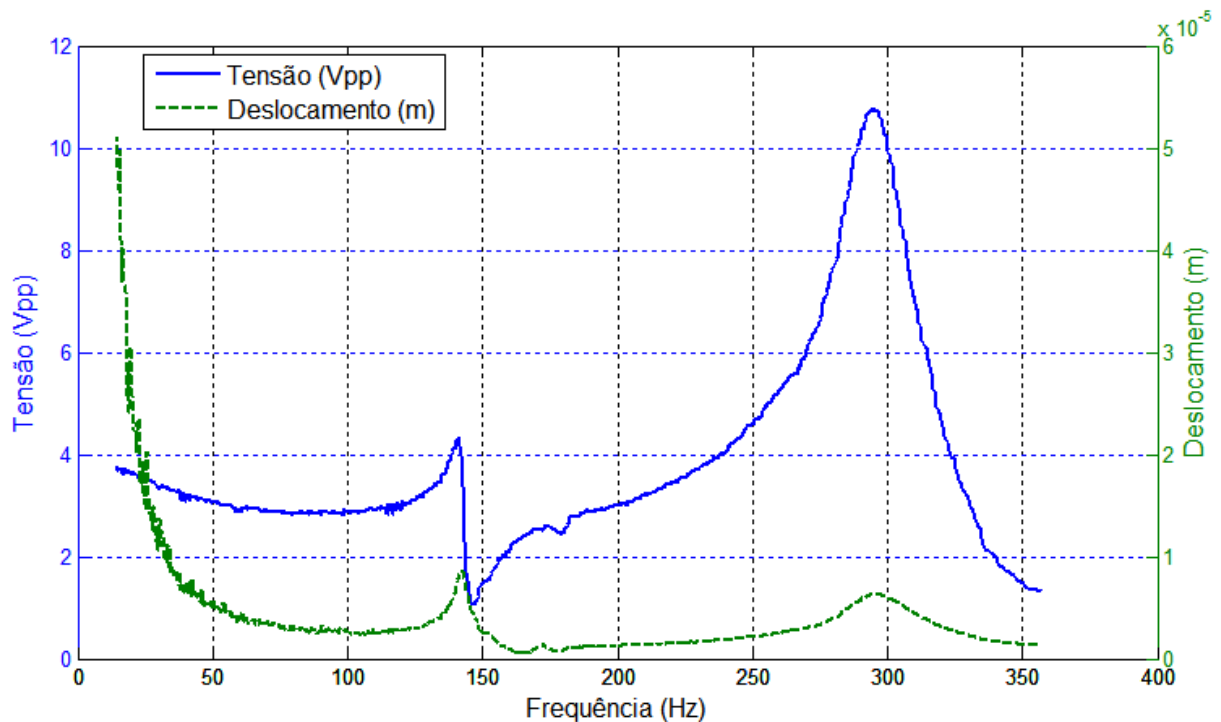


Figura 5.18 – Tensão elétrica e deslocamento em função da frequência

Até o momento, as análises experimentais permitiram a obtenção e correlação gráfica dos valores de potencial elétrico gerado, as forças de compressão sofrida pela célula e as acelerações as quais o sistema foi submetido. Outro parâmetro imprescindível para a caracterização do cilindro piezoelétrico como gerador de energia elétrica, 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 cilindro de PZT 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 5.19. 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 ($Z = |z|$).

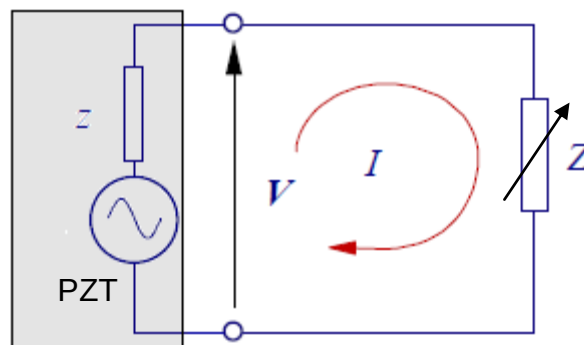


Figura 5.19 – Gerador piezoelétrico com impedância interna ' z ' alimentando uma carga de impedância ' Z '.

Com tudo, a impedância interna do elemento 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 do elemento piezoelétrico foi medida diretamente por um osciloscópio de 10 M Ω de impedância de entrada (considerada, em casos práticos, como uma medida em circuito aberto). Após essa primeira medição, os terminais do PZT foram interligados a uma década resistiva de 1111110 Ω , de acordo com a ilustração da Figura 5.19, 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.

O gráfico da Figura 5.20 mostra o comportamento da impedância do PZT e dos sinais de tensão elétrica medidos no mesmo, antes e durante o casamento de impedâncias, em função da frequência quando a amplitude de tensão de alimentação, proveniente do gerador de sinais, foi de 100 mVpp. Para a frequência de 295 Hz, onde a tensão elétrica atinge seu valor máximo, a impedância experimentalmente estimada para o cilindro de PZT correspondeu a 85 k Ω .

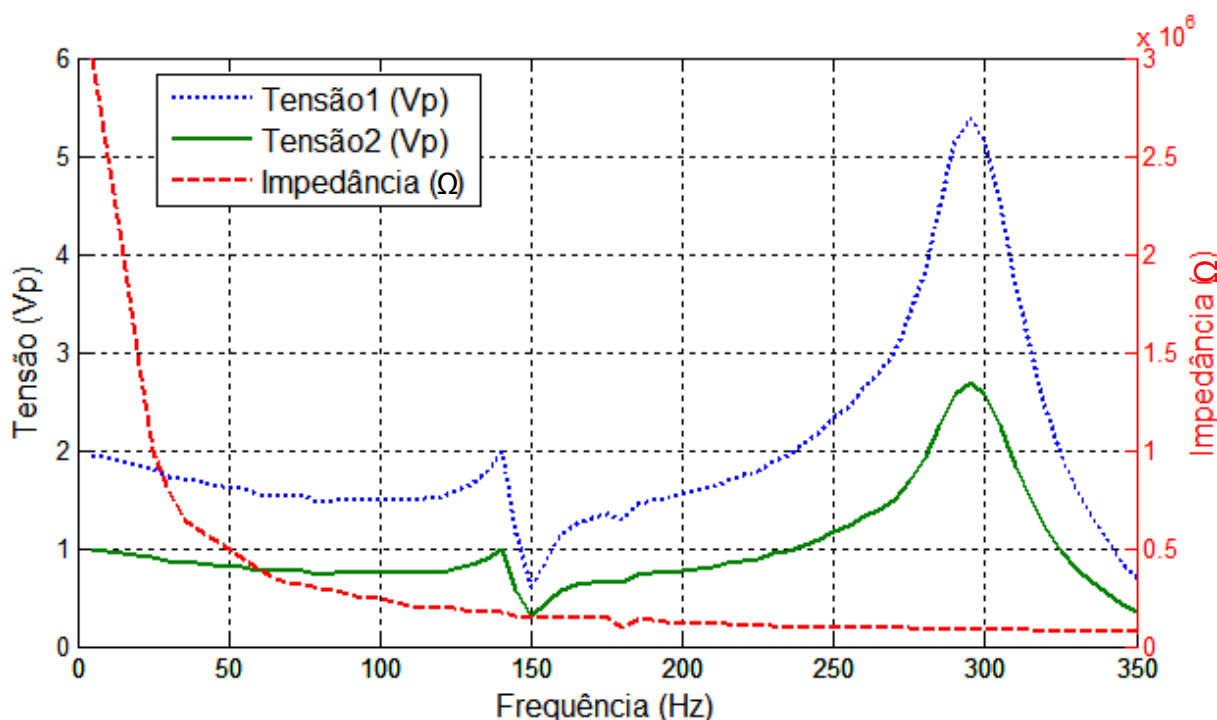


Figura 5.20 – Tensão elétrica e impedância resistiva em função da frequência

Observando a Figura 5.20, constata-se que a Tensão1, corresponde ao valor do potencial elétrico do PZT medido diretamente pelo osciloscópio de 10 M Ω . A Tensão2 corresponde ao potencial elétrico gerado pela célula nas condições de máxima transferência de potência, equivalendo exatamente a metade do valor da tensão medida em 'circuito aberto'.

Com a impedância resistiva do cilindro piezoelétrico estimada para várias frequências de trabalho entre o intervalo de 10 a 350 Hz, a quantidade de potência elétrica gerada pela célula de PZT pode ser então calculada. O gráfico da Figura 5.21, relaciona os sinais de tensão e potência elétrica gerados em função da frequência de trabalho, quando a amplitude da tensão de alimentação fornecida do gerador de sinais à fonte de excitação da estrutura foi de 100 mVpp.

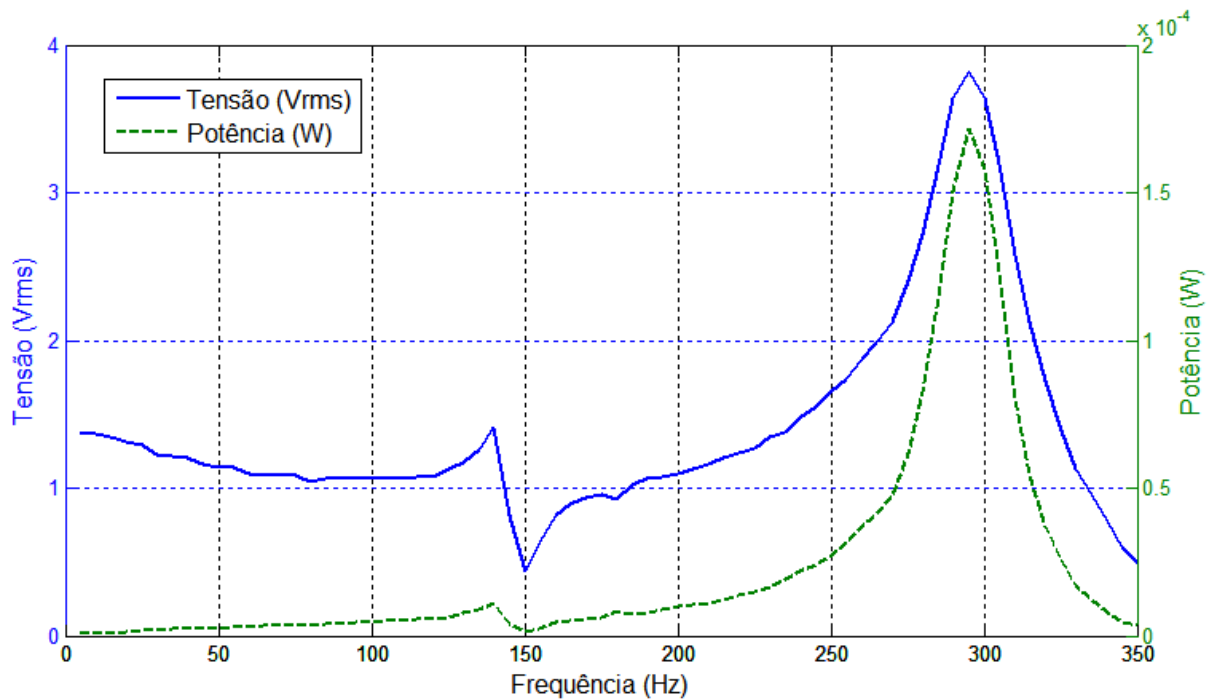


Figura 5.21 – Tensão e potência elétrica em função da frequência

Com os resultados mostrados no gráfico da Figura 5.21, a quantidade de dados passa a ser suficiente para concluir que, com a amplitude de tensão de alimentação de 100 mVpp, fornecida pelo gerador de funções ao amplificador de potência do excitador eletromagnético, uma força de compressão de aproximadamente 12 N foi imprimida sobre a célula piezoelétrica que gerou uma tensão de 3,8 Vrms e uma potência de 171 μ W sob uma aceleração de 21,58 m/s^2 e frequência de trabalho de 295 Hz.

Em um segundo momento, foi variada a amplitude de tensão de alimentação no gerador de funções de 100 mVpp para 250 mVpp, isso implica em um maior deslocamento do êmbolo do atuador. Como o movimento de subida do mesmo encontra-se parcialmente reprimido pelo engaste superior da montagem, o nível de compressão sobre a estrutura deverá ser maior. O intervalo de frequência de análise continuou sendo de 10 a 350 Hz. Na Figura 5.22 mostra-se o gráfico da tensão elétrica de saída e a força de compressão sobre o elemento piezoelétrico em função da frequência quando a estrutura foi submetida a uma amplitude de vibração mais elevada. Em 10 Hz, os valores de compressão e tensão elétrica passaram a ser de 11 N e 8,6 V, respectivamente. Sofrendo novamente uma pequena diminuição até 8,7 N e 6,5 V, e se mantendo no intervalo entre 50 e 125 Hz de onde

voltam a crescer atingindo os valores de 8 V e 9,9 N em 146 Hz. Os valores máximos de 26 V pico-a-pico e 27,5 N são atingidos quando a estrutura é excitada em cerca de 295 Hz. A partir desse ponto a tensão e a força decrescem com o acréscimo da frequência chegando a 2,9 V e 2,25 N em 350 Hz.

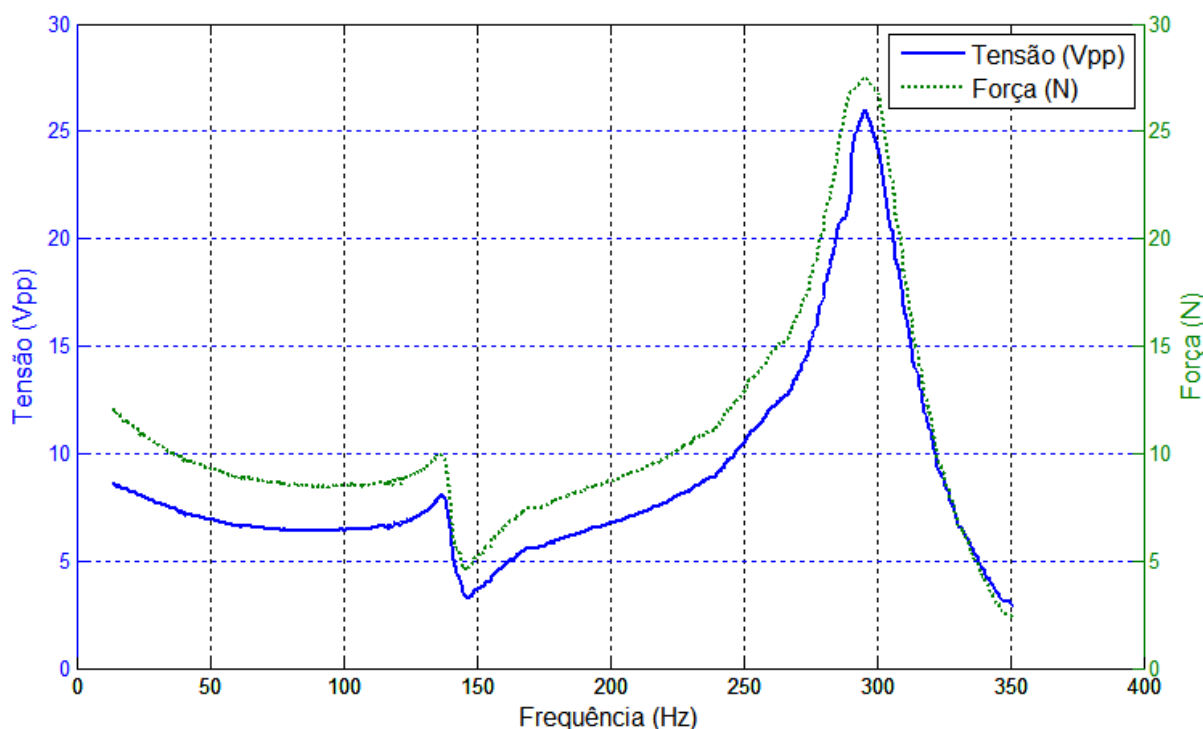


Figura 5.22 – Tensão elétrica e força de compressão em função da frequência

Ao analisar os gráficos das Figuras 5.12 e 5.22 (resultados referentes a dois diferentes níveis de amplitude de excitação da estrutura), pode-se concluir que a tensão piezoelétrica de saída é tanto maior quanto maior for a amplitude da oscilação de excitação e, por conseguinte a compressão da célula. Portanto, existe uma relação de proporcionalidade entre a tensão elétrica e a compressão mecânica sobre a célula, sendo maximizada em torno dos valores de ressonância da estrutura.

Os valores da impedância da célula de PZT também foram estimados para as frequências de trabalho da estrutura com esses novos níveis de amplitude de excitação. A Figura 5.23 relaciona os sinais de tensão elétrica medidos em circuito aberto (Tensão1) e na condição de máxima transferência de potência com suas respectivas impedância em função da frequência. Em seguida, é mostrado no gráfico da Figura 5.24 o sinal da potência elétrica, calculada a partir do sinal de impedância da Figura 5.23.

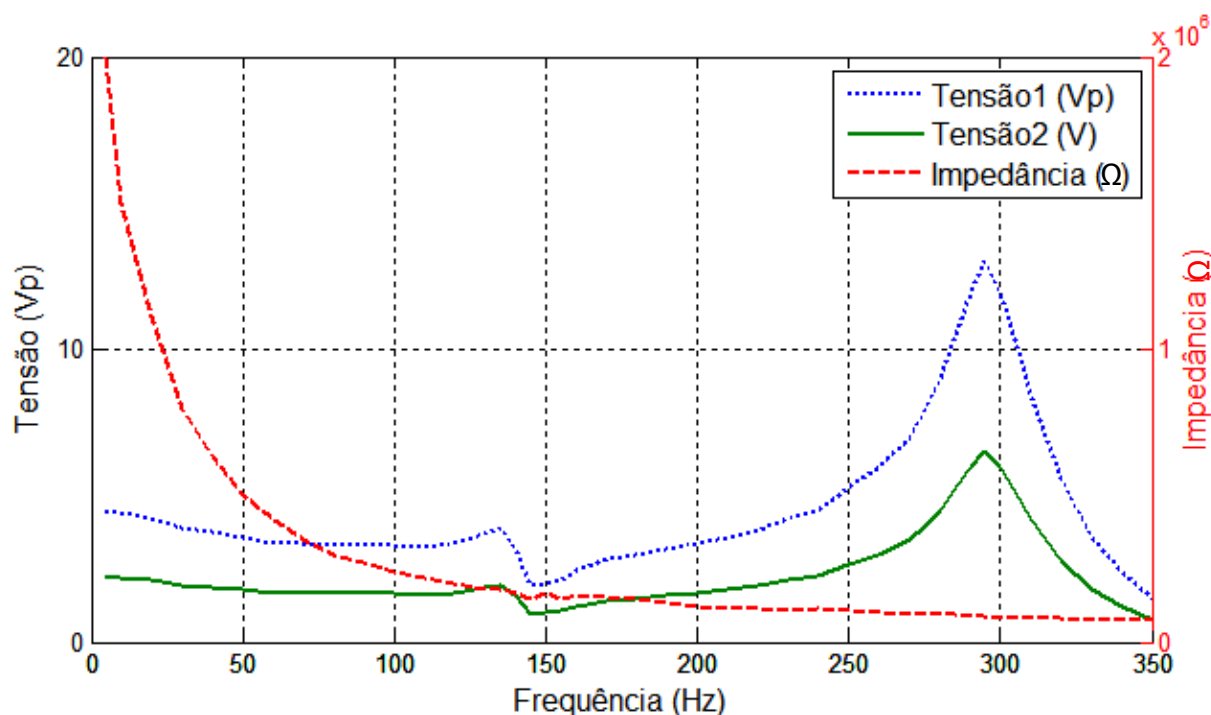


Figura 5.23 – Tensão elétrica e impedância resistiva em função da frequência

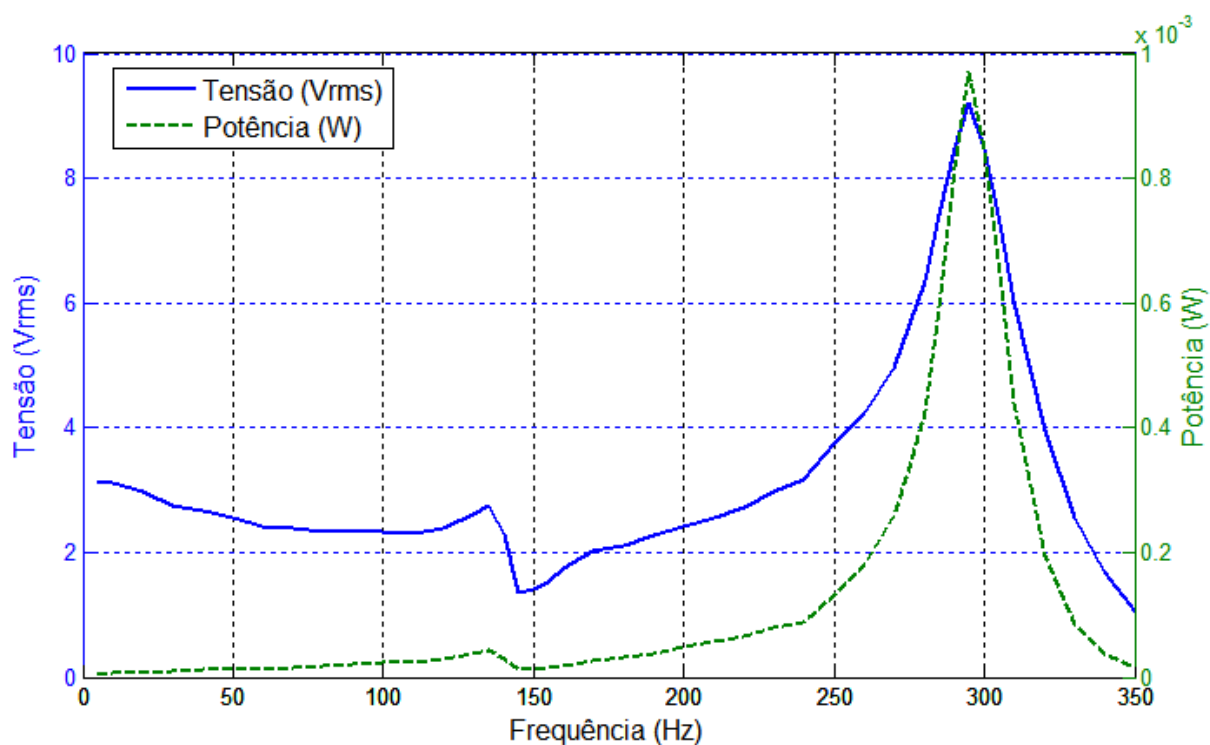


Figura 5.24 – Tensão e potência elétrica em função da frequência

Por conseguinte, temos que para a amplitude de tensão de alimentação de 250 mVpp fornecida do gerador de funções ao amplificador de potência do excitador

eletromagnético, uma força de compressão de aproximadamente 27,5 N foi imprimida sobre a célula piezoelétrica que gerou uma tensão de 9,2 Vrms e uma potência de 994 μW na frequência de trabalho de 295 Hz e uma aceleração de 50,2 m/s^2 .

Em outro ensaio, foi novamente variada a amplitude de tensão de alimentação no gerador de funções, agora de 250 mVpp para 450 mVpp, implicando, como já discutido, em um maior deslocamento do êmbolo do atuador e por conseguinte um maior nível de compressão sobre a estrutura. Nessas condições, a célula piezoelétrica gerou uma tensão média de 14,5 Vrms e potência de 2,49 mW na frequência de trabalho de 285 Hz sob uma força de compressão de 45,8 N. O deslocamento na frequência (de 295 para 285 Hz) em que os valores de tensão, potência elétrica e compressão foram máximos, ocorreu possivelmente pelos efeitos da elevação da amplitude de tensão de alimentação do atuador, e pelo conseguinte aumento de pré-carga, oferecido pelo parafuso de regulagem à estrutura, necessário para manter a estabilidade do conjunto experimental montado sobre o atuador que passa a ter um maior deslocamento de êmbolo.

Ao observar os resultados das últimas três análises experimentais citadas, pode-se concluir que a tensão e a potência piezoelétrica de saída são tanto maior quanto maior for a amplitude de oscilação da excitação fornecida a estrutura e, por conseguinte a compressão da célula. Na Tabela 5.1 estão contidos dados de saída referentes a três diferentes níveis de amplitude de excitação da estrutura experimental contendo uma célula piezoelétrica.

Tabela 5.1 – Resultados adquiridos na configuração experimental com uma célula piezoelétrica

Gerador de sinais	Frequência (Hz)	Tensão (rms)	Força (N)	Impedância ($\text{k}\Omega$)	Potência (μW)
100 mVpp	295	3,8	12	85	170,0
250 mVpp		9,2	27,5	85	995,0
450 mVpp	285	14,6	45,8	85	2 500,0

Até o momento, as análises experimentais permitiram a obtenção dos valores de tensão e potência elétrica, gerados por um cilindro piezoelétrico quando comprimido por cargas cíclicas de compressão com a frequência variando entre 10 e 350 Hz, além, de relacionar graficamente o potencial elétrico com a força de compressão e a aceleração.

Para as próximas análises, a estrutura geradora de energia constituída de um elemento piezoelétrico até então estudada, será substituída por uma nova configuração de gerador que contem, em meio a sua estrutura, três cilindros piezoelétricos, como discutido no Capítulo 4.

As características de excitação dessa nova estrutura de gerador de energia foram as mesmas utilizadas para a configuração anterior: alimentação fornecida pelo gerador de sinais equivalente a 100 mVpp para os primeiros ensaios e 450 mVpp para os ensaios seguintes, ambos analisados no intervalo de frequência de 10 a 350 Hz. Assim sendo, relacionado a primeira análise experimental da estrutura citada, no gráfico da Figura 5.25 é mostrado o sinal da tensão elétrica gerada por cada elemento piezoelétrico que compõe o gerador, relacionando-os com a força de compressão sobre a estrutura em função da frequência.

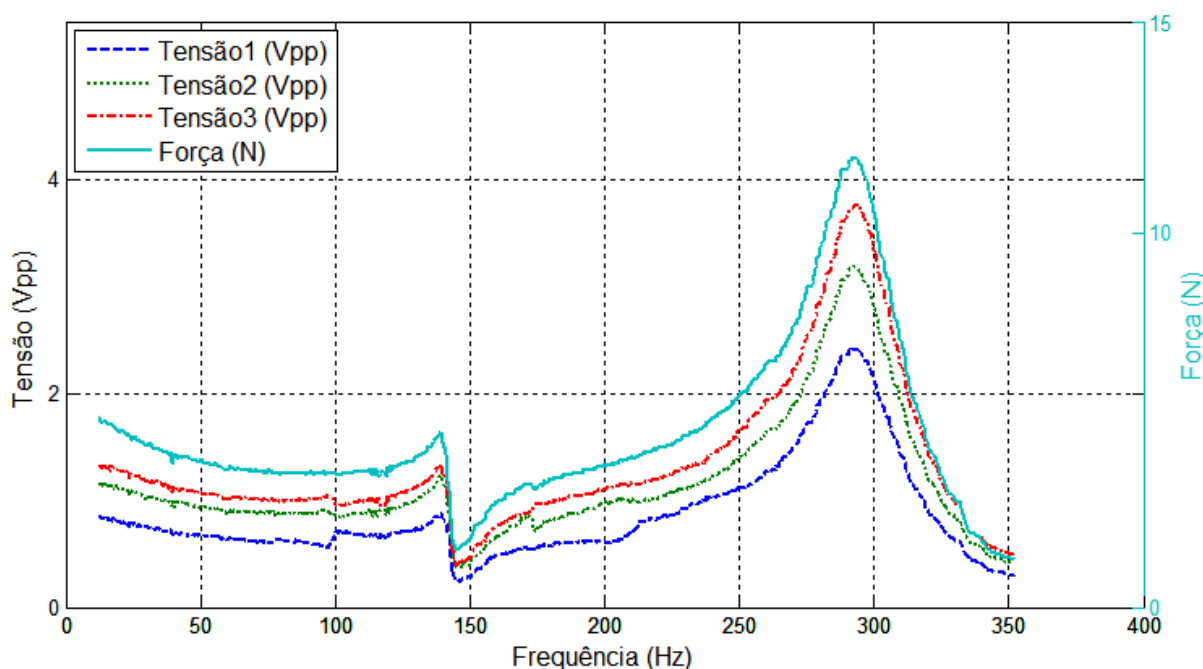


Figura 5.25 – Relação da tensão elétrica gerada em cada célula com a força de compressão sofrida pela estrutura em função da frequência

Pode ser visto na da Figura 5.25, que apesar da estrutura do gerador em estudo ser diferente fisicamente da configuração anterior, o comportamento dinâmico do gráfico não sofreu mudanças; as frequências em que os sinais de tensão elétrica e força de compressão atingem seus valores máximos continuam sendo primeiramente em 146 Hz e em seguida 295 Hz. Considerando a segunda frequência de pico, por ser onde os sinais atingem a maior amplitude, a impedância estimada para cada célula foi de 85 k Ω . A Tensão₁, relacionada ao potencial elétrico gerado na célula 1, é de 2,54 V_{pp} que por sua vez corresponde a uma tensão média de 898 mV_{rms} e uma potência elétrica gerada de 9,5 μ W. A célula 2 gerou tensão e potência elétrica de 1,14 V_{rms} e 15,4 μ W respectivamente, enquanto a célula 3 gerou 1,35 V_{rms} e 21,4 μ W. Esses valores, provenientes de cada cilindro piezoelétrico, foram medidos enquanto a estrutura que comporta as células estava sob uma força de compressão equivalente a 12 N e aceleração de 21,5 m/s².

É importante notar que para as análises desenvolvidas anteriormente envolvendo o gerador composto por apenas uma amostra de PZT, o valor da força de compressão sofrida pela célula corresponde aproximadamente ao valor da força sob a estrutura. Já para estas ultimas análises, onde o gerador é composto por três amostras, a força sofrida pela estrutura tende a ser dividida entre os cilindros de PZT. Assim, para fontes de excitação semelhantes, o nível de tensão e potência elétrica de saída do gerador formado por uma célula é mais elevado do que os níveis gerados por cada elemento piezoelétrico de um gerador formado por duas ou mais células.

Ainda analisando a Figura 5.25 pode ser visto que, embora os cilindros de PZT possuam praticamente as mesmas características mecânicas e dimensionais, os níveis de tensão elétrica gerados por cada elemento são diferentes, mesmo após um rodízio dos cilindros em relação aos pontos de encaixe nas bases da estrutura, o que elimina a possibilidade de atribuir os diferentes níveis de geração à ação de diferentes forças de compressão entre as células.

Outra maneira de analisar a quantidade de energia elétrica gerada, além da recém apresentada que foi baseada na leitura individual dos elementos ensaiados, é a de interligar os terminais das unidades geradoras entre si com base nos arranjos elétricos; série e paralelo. Na Figura 5.26 mostra-se graficamente a relação do sinal

de tensão elétrica proveniente de uma configuração em série dos cilindros piezoelétricos com a força de compressão na estrutura em função da frequência.

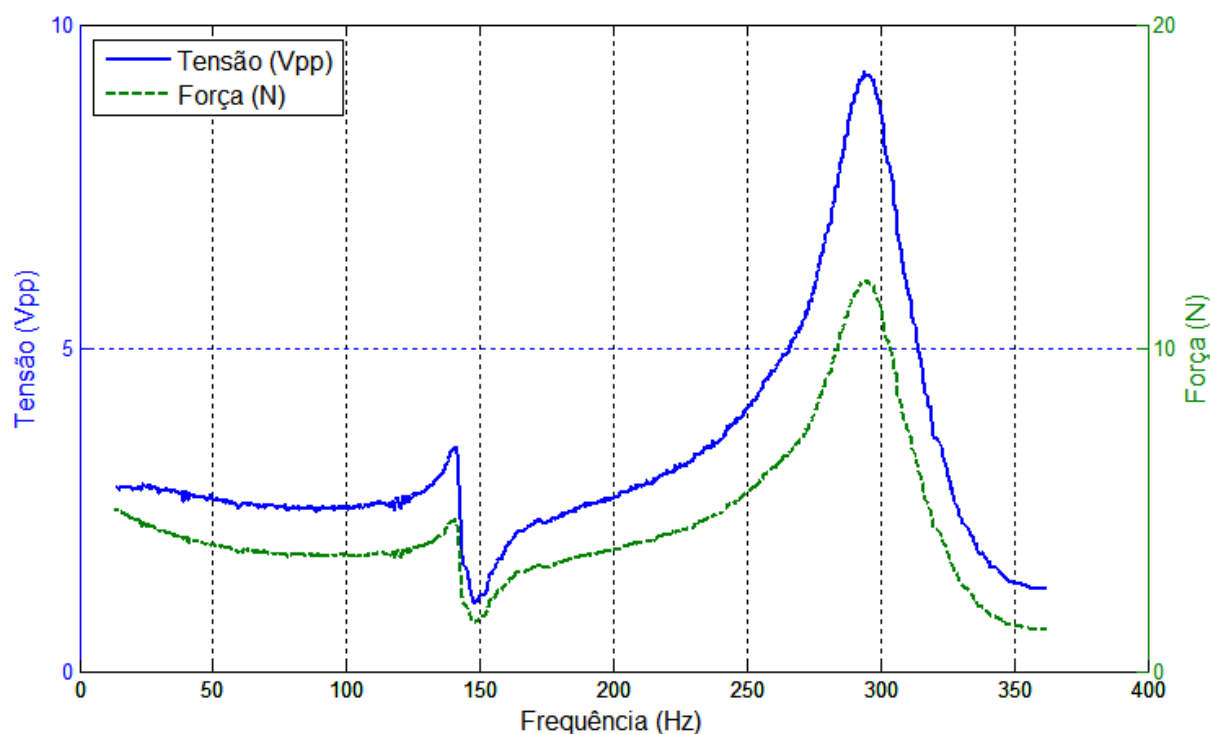


Figura 5.26 – Relação da tensão elétrica dos PZT's interligados em série com a força de compressão em função da frequência

Com essa configuração elétrica entre as células, na frequência de 295 Hz a impedância estimada foi de 255 k Ω . A tensão elétrica resultante foi de 9,2 Vpp que corresponde a um valor médio de 3,25 Vrms. Assim, a potência elétrica gerada enquanto a estrutura do gerador sofria uma compressão de 12 N e com os elementos piezoelétricos interligados em série foi de 41,5 μ W.

Na Figura 5.27 mostra-se graficamente o sinal da tensão elétrica de saída do gerador piezoelétrico enquanto suas unidades geradoras estavam interligadas em paralelo e, relaciona-o com a força de compressão sobre suas bases estruturais em função da frequência de trabalho. Para esse arranjo elétrico a impedância estimada foi de 28 k Ω , a tensão elétrica gerada foi de 3,24 Vpp ou 1,14 Vrms e potência elétrica de 46,8 μ W na frequência de trabalho de 295 Hz com o gerador sendo comprimido por uma força equivalente a 12 N.

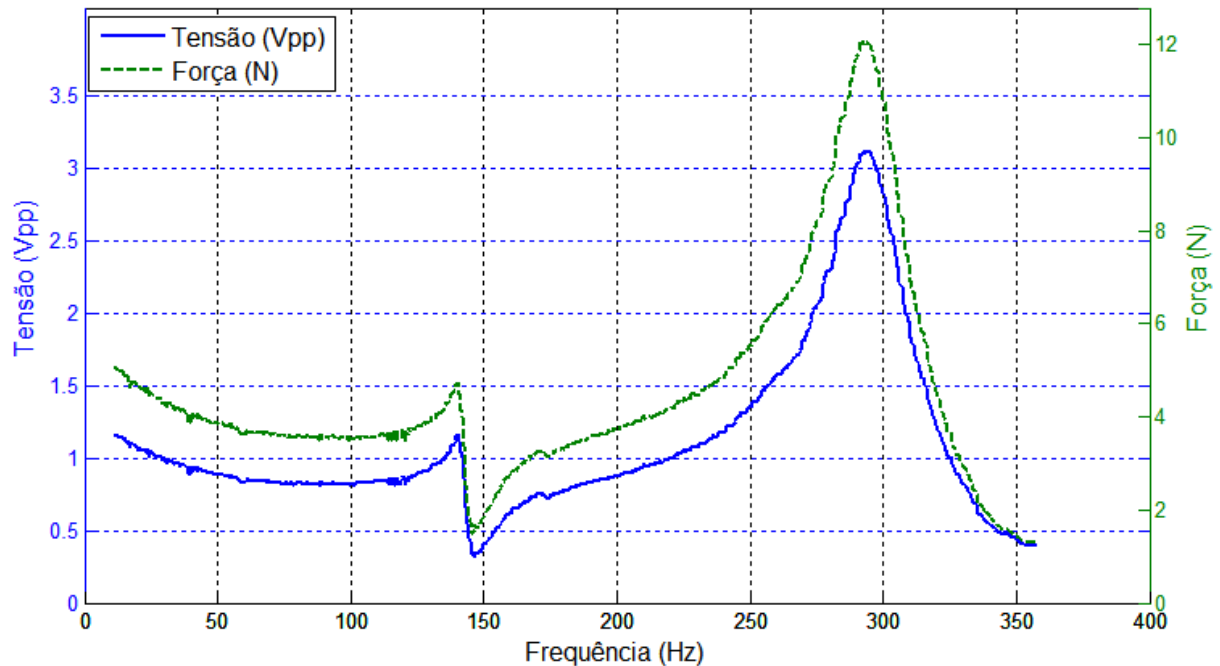


Figura 5.27 – Relação da tensão elétrica dos PZT's em paralelo com a força de compressão em função da frequência

As últimas três análises do gerador piezoelétrico apresentadas (leitura da tensão elétrica gerada por cada célula e pela interligação das mesmas em série e em paralelo), foram repetidas para a situação em que a amplitude de tensão de alimentação no gerador de funções foi elevada de 100 mVpp para 450 mVpp.

Considerando um maior nível de amplitude de excitação, na Figura 5.28 estão relacionadas graficamente as tensões elétricas geradas por cada célula com a força de compressão a qual o gerador foi submetido. De maneira geral, o comportamento dinâmico mostrado no gráfico se manteve quando comparado com o da Figura 5.25, havendo apenas um deslocamento de 10 Hz nas frequências em que os valores de tensão e compressão foram máximos, ou seja, o primeiro valor de pico do sinal passou a ser atingido em 136 Hz e o segundo e mais elevado em 285 Hz. Esse deslocamento na frequência natural da estrutura experimental, novamente ocorreu possivelmente pelos efeitos da elevação da amplitude de tensão de alimentação do atuador, e pelo conseguinte aumento de pré-carga, oferecido pelo parafuso de regulagem à estrutura, necessário para manter a estabilidade do conjunto experimental montado sobre o *shaker* que passou a atuar com um maior deslocamento de êmbolo.

Embora a frequência de trabalho do gerador tenha passado a ser de 285 Hz, a impedância estimada para cada célula continuou sendo de 85 k Ω . Assim sendo, ao continuar analisando a Figura 5.28, observa-se que a Tensão1, relacionada ao potencial elétrico gerado na célula 1, é de 10,4 Vpp que por sua vez corresponde a uma tensão média de 3,67 Vrms e uma potência elétrica gerada de 159 μ W. A célula 2 gerou tensão e potência elétrica de 4,24 Vrms e 212 μ W respectivamente, enquanto a célula 3 gerou 5,16 Vrms e 313 μ W. Esses valores foram medidos enquanto a estrutura que comporta as células estava sob uma força de compressão equivalente a 45,8 N e aceleração de 67,4 m/s².

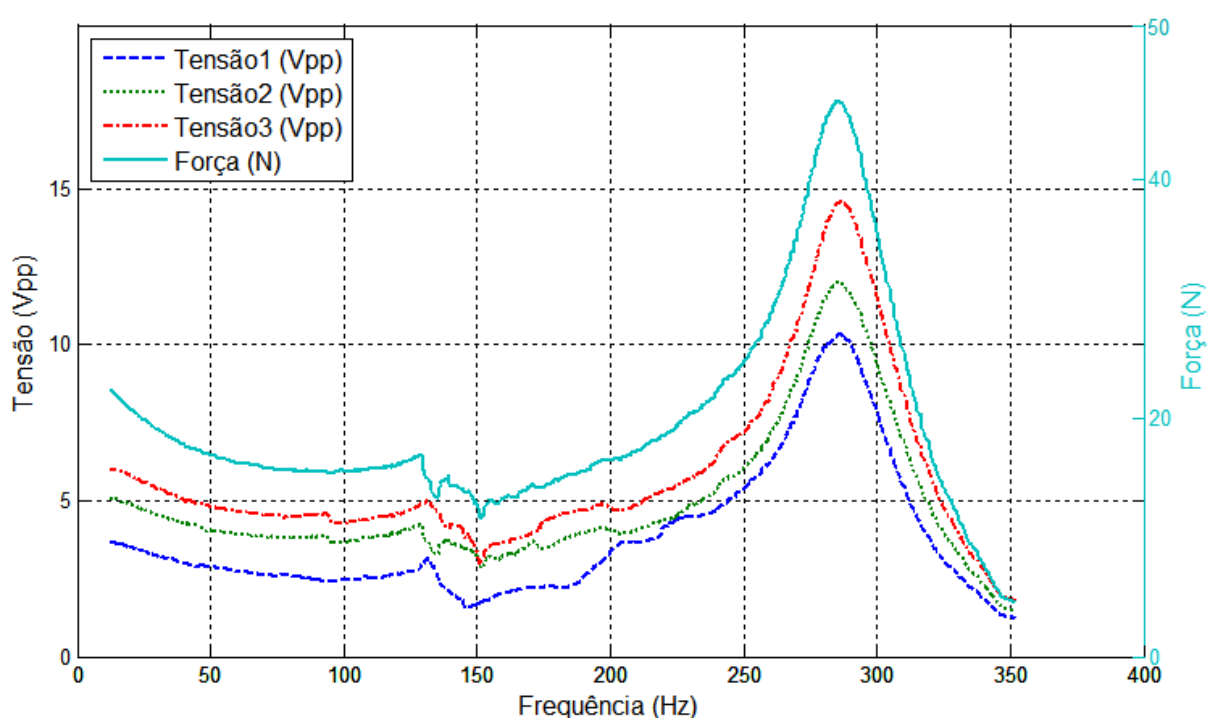


Figura 5.28 – Relação da tensão elétrica gerada em cada célula com a força de compressão sofrida pela estrutura em função da frequência

As Figuras 5.29 e 5.30 mostram graficamente os sinais das tensões elétricas geradas pelos PZT's quando interligados em série e em paralelo respectivamente. Quando arranjados em série a tensão elétrica resultante foi de 37,2 Vpp que corresponde a um valor médio de 13,15 Vrms e uma potência elétrica de 678 μ W. Em paralelo, a tensão pico-a-pico foi de 12,4 V correspondendo a 4,38 Vrms e a uma potência elétrica gerada de 686 μ W.

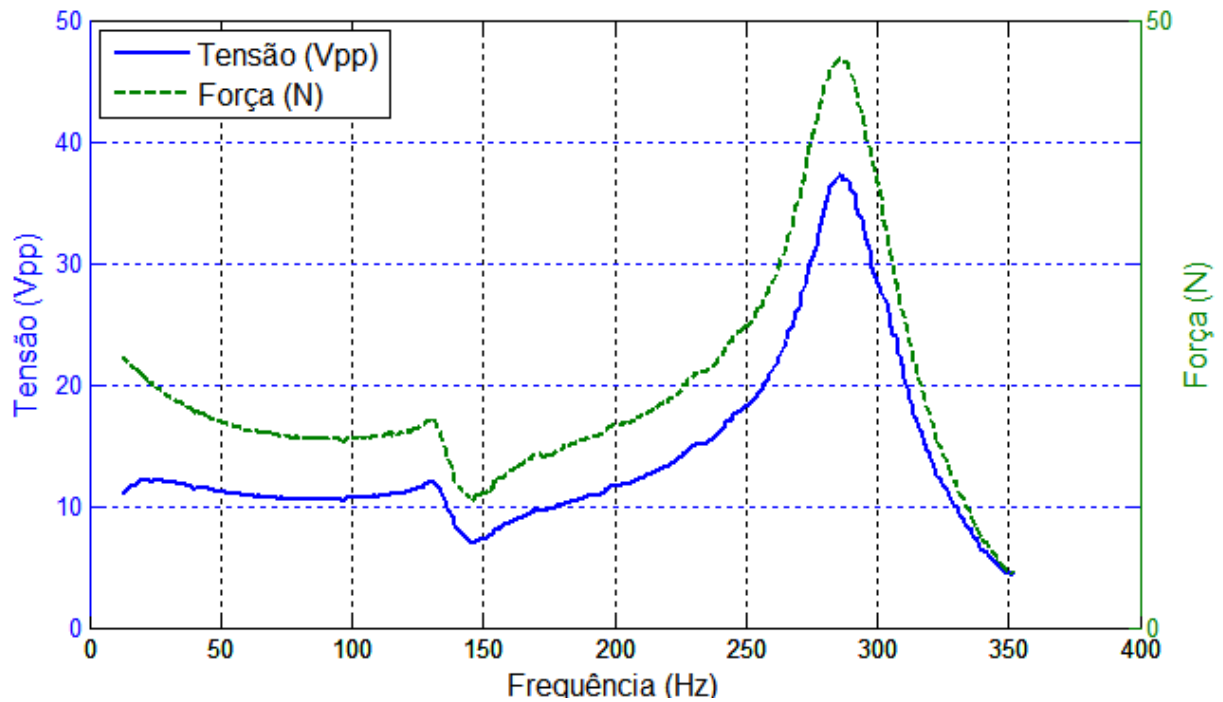


Figura 5.29 – Relação da tensão elétrica dos PZT's em série com a força de compressão em função da frequência

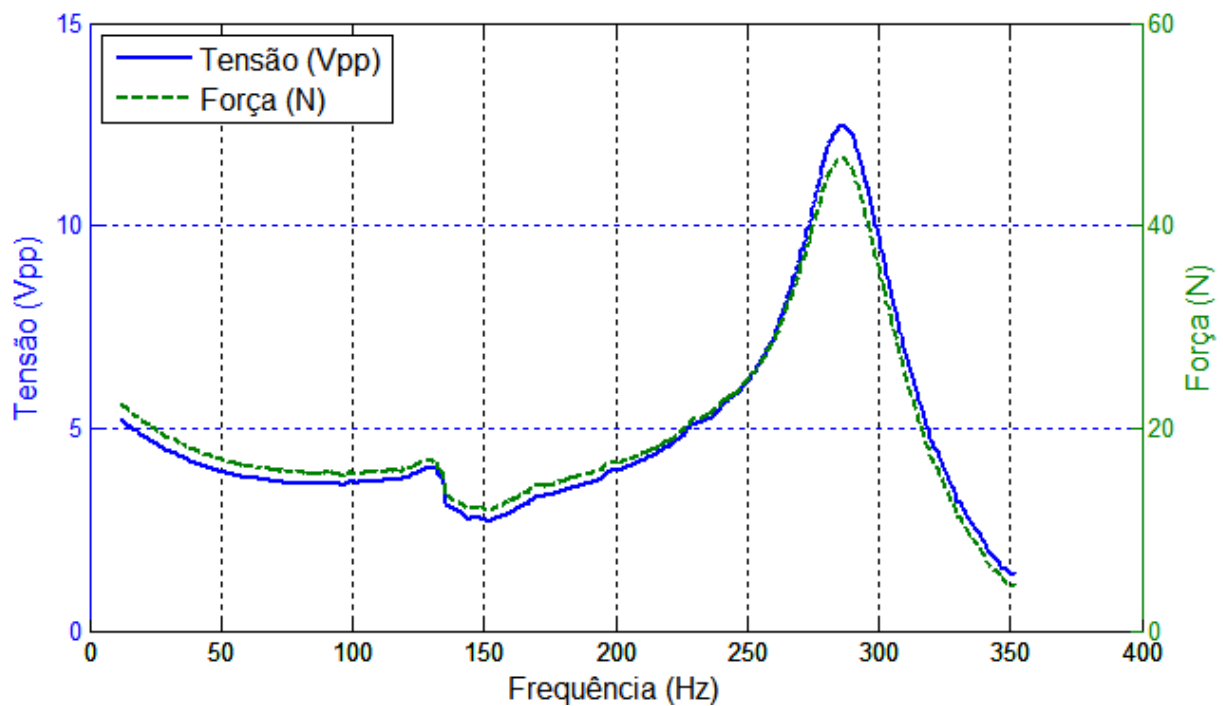


Figura 5.30 – Relação da tensão elétrica dos PZT's interligados em paralelo com a força de compressão em função da frequência

Na Tabela 5.1 estão contidos dados de saída referentes a dois diferentes níveis de amplitude de excitação da estrutura experimental contendo três células piezoelétricas.

Tabela 5.2 – Resultados adquiridos na configuração experimental com uma e com três células piezoelétricas

GERADOR COM UMA CÉLULA						
Gerador de sinais	Frequência (Hz)	Tensão (Vrms)	Força (N)	Impedância (kΩ)	Potência (μW)	
100 mVpp	295	3,8	12	85	170,0	
250 mVpp		9,2	27,5	85	995,0	
450 mVpp	285	14.6	45,8	85	2 500,0	
GERADOR COM TRÊS CÉLULAS						
Gerador de sinais	Frequência (Hz)	PZT	Tensão (Vrms)	Força (N)	Impedância (kΩ)	Potência (μW)
100 mVpp	295	Célula 1	0,89	12	85	9,5
		Célula 2	1,14	12	85	15,4
		Célula 3	1,35	12	85	21,4
		Série	3,25	12	255	41,5
		Paralelo	1,14	12	28	46,8
450 mVpp	285	Célula 1	3,68	45,8	85	159,0
		Célula 2	4,24	45,8	85	212,0
		Célula 3	5,16	45,8	85	313,0
		Série	13,15	45,8	255	678,0
		Paralelo	4,38	45,8	28	686,0

Observando os resultados apresentados na Tabela 5.2, constata-se que, para fontes de excitação semelhantes, o nível de tensão e potência elétrica de saída do gerador formado por uma célula é mais elevado do que os níveis gerados por cada elemento piezoelétrico de um gerador formado por duas ou mais células. Esses resultados já eram esperados pelo fato que na configuração formada por mais de um

elemento gerador, a força de compressão proveniente de uma dada fonte, tende a se dividir entre as células causando-as menores níveis de deformação e, por conseguinte valores de tensão e potência elétrica mais baixos. Contudo, as experimentações realizadas neste trabalho, consideraram excitações mecânicas com pequenas forças envolvidas, em situações onde os níveis de compressão mecânica são altos, como uma fábrica que possui grandes máquinas em operação ou em rodovias, uma configuração com mais de uma célula seria mais durável e garantiria mais energia útil.

6 CONCLUSÕES

6 CONCLUSÕES

Nessa pesquisa foi desenvolvido um trabalho de investigação a cerca da possibilidade de gerar energia elétrica por meio de elementos piezocerâmicos com geometria cilíndrica. Os estudos foram concentrados na verificação do comportamento eletromecânico de células de PZT baseado em análises por simulações e experimentos.

As simulações computacionais usando elementos finitos, mostraram-se de grande relevância para o desenvolvimento do trabalho, pois, a partir dessas, foi possível verificar que o elemento piezoelétrico de PZT com geometria cilíndrica era capaz de produzir energia elétrica quando comprimido verticalmente, resultados que viabilizaram a continuidade da pesquisa e nortearam o desenvolvimento estrutural para as simulações experimentais.

Os resultados experimentais obtidos de uma estrutura que emula a realidade prática de vibração/deformação, demonstraram a capacidade de geração de energia elétrica a partir de deformações relativamente pequenas da ordem dos micro-metros na célula de PZT cilíndrica, a qual foi analisada individualmente e em seguida em conjunto fazendo parte de um gerador de energia elétrica formado por três células. Mostraram também a influência esperada na geração de energia elétrica quando a frequência de excitação atingiu a frequência natural da estrutura. Fato este que determina o ponto de maior energia elétrica gerada pelo PZT.

Para as análises do gerador contendo uma célula, a potência elétrica gerada foi de 2,5 mW, enquanto o elemento gerador era submetido a uma força de compressão de 45,8 N na frequência de trabalho de 285 Hz. Para a configuração formada por três células, enquanto a estrutura que comporta as células estava sobre a força de compressão de 45,8 N na frequência de 285 Hz, os níveis de potência elétrica gerados por cada elemento piezoelétrico foram de 159 μ W, 212 μ W e 313 μ W, respectivamente.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado no trabalho desenvolvido, é possível sugerir novas investigações que venham a contribuir no entendimento das características de geração de energia elétrica por meio de materiais piezoelétricos. Como sugestões têm-se:

- Estudar o processo de fadiga do material piezoelétrico, tendo em vista, determinar características como, os níveis máximos de compressão e deformação mecânica suportados pelo cilindro piezoelétrico.
- Desenvolver um modelo numérico mais abrangente, envolvendo os elementos formadores do gerador piezoelétrico, proporcionando assim, maior proximidade entre os resultados simulados e experimentais.

REFERÊNCIAS

- ABDELKFI A. **Global Nonlinear Analysis of Piezoelectric Energy Harvesting from Ambient and Aeroelastic Vibrations**. Dissertação. Virginia Polytechnic Institute, 2012.
- BEKER I.; ZORLU O.; KÜLAH H.; MUHTAROĞLU A. **Hybrid Energy Harvesting From Keyboard**. *IEEE*, 2011.
- 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.
- 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.
- 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**. *ELSEVIER*. 5th International Conference on Technological Advances of Thin Films & Coatings. Volume 519, Issue 15, Pages 4687–4693, 31 May 2011.
- DAYAL R.; PARSA L. **Hybrid Start-up Strategy for Low Voltage Electromagnetic Energy Harvesting Systems**. *IEEE*, 2012.
- ELANZEERY H. M. G. E. M. **Novel Radio Frequency Energy Harvesting Model**. *IEEE international Power Engineering and Optimization Conference*, Malaysia, june 2012.

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*, 2012.

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.

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

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

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.

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.

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.

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. **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.; REILLY E.; LAI E.; OTIS B.; RABAEY J. M.; WRIGHT P. K. **Improving Power Output for Vibration-Based Energy Scavengers.** 2005

LUO C.; HOFMANN H. F. **Wideband Energy Harvesting for Resonant Piezoelectric Devices.** 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.

MHETRE R. M.; NAGDEO N. S.; ABHYANKAR H. K. **Micro Energy Harvesting for Biomedical Applications: A Review.** *IEEE, Interational Conference on Eletrinics Computer Technology*, pp. 1-5, 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 B. 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.

MORAES J. T. O. **Sistema de Captação de Energia (Energy Harvesting) por Dispersão Magnética em Linha de Potência.** Dissertação. Universidade Federal da Paraíba, 2013.

OTTOMAN 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.** Dissertação. Universidade Estadual Paulista Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006

PINNA L.; DAHIYA R. S.; NISI F. D.; VALLE M. **Analysis of Self-Powered Vibration Based Energy Scavenging System.** 2010

QIU J.; LIN B.; LIU P.; ZHANG S.; DAI G. **Energy Level Based Transmission Power Control Scheme for Energy Harvesting WSNs.** *IEEE*, 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.

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

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*, *electrotronics goes green*, p. 1-4, 2012.

ROCHA J. G.; GONÇALVES L. M.; ROCHA P. F.; SILVA M. P.; LANCEROS-MÉNDEZ S. **Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 3, march 2010.

ROUNDY S.; KWRIGHT P. **A Piezoelectric Vibration Based Generator for Wwireless Electronics.** 2004

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 Flexionais**. Dissertação. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista – UNESP, 2006.

SHEBEEB A.; SALLEH H. **Effect of Cantilever Shape on the Power Output of a Piezoelectric Bimorph Generator**. *IEEE*, International Conference on Semiconductor Electronics, pp. 275-278, 2010.

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

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.

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 (ICCSM), 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.

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 2009.

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, Sensors*, pp. 699-702, 2009.