

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE  
MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS**

Antônio Ramos Perlingeiro

Gilberto Maia Pimenta

Salviano Evaristo da Silva

Prof. Orientador: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Prof. Co-orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

**Rio de Janeiro**

**Julho de 2016**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ**

**GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE  
MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS**

Antônio Ramos Perlingeiro

Gilberto Maia Pimenta

Salviano Evaristo da Silva

Projeto final apresentado em cumprimento às normas  
do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ, como  
parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Luciana Loureiro da Silva Monteiro  
Prof. Co-orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

**Rio de Janeiro**

**Julho de 2016**



*“A História tem demonstrado que os mais notáveis vencedores normalmente encontraram obstáculos dolorosos antes de triunfarem. Eles venceram porque se recusaram a se tornarem desencorajados por suas derrotas.”*

*(Bryan Forbes)*

## DEDICATÓRIA

Eu, Salviano Evaristo da Silva, dedico esse projeto à minha querida mãe, Cacilda da Silva Evaristo, que me acompanhou em toda minha trajetória até aqui, e por ela irei me formar.

Dedico também à minha irmã Patrícia da Silva Evaristo, por ser meu ponto de apoio.

Dedico à Beatriz Evaristo e à Fabiana Evaristo por todo o apoio até aqui.

Dedico à minha irmã, Luciana da Silva, por ter me dado condições de chegar até aqui.

Dedico à minha namorada, Andriele de Mello Ramos, por estar comigo nas horas mais difíceis, me apoiando, inclusive, nas madrugadas de estudo e acima de tudo ser minha companheira.

Dedico também à minha amiga Carla Ramos, por ter dado a força necessária para continuar até o fim.

Eu, Antônio Ramos Perlingeiro, dedico, não somente este trabalho como a minha conclusão de curso, ao meu pai, mãe e irmão que sempre me apoiaram e deram forças para seguir em frente.

Dedico também a minha namorada e companheira que esteve ao meu lado durante toda trajetória, seus conselhos foram muito importantes.

Eu, Gilberto Maia Pimenta dedico esse projeto e toda a conclusão do curso aos meus pais, João Bosco e Susana Helena, e ao meu irmão Guilherme, por toda a estrutura que me proporcionaram para que eu pudesse ter tranquilidade para realizar o curso.

Dedico aos meus avós José Geraldo e Nair Helena que me acolheram e me deram tranquilidade para que eu completasse o curso com inteiro foco no mesmo.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradecemos à Deus por ter nos dado a oportunidade de chegar até aqui, por ter nos dado força para realizar esse sonho que é nos formar em engenheiros mecânicos

Agradecemos à professora Luciana Loureiro, por ter aceitado fazer parte desse projeto e nos apoiar em momentos difíceis, mostrando disposição para nos orientar da melhor forma.

Agradecemos ao professor Pedro Manuel, por ter aceitado fazer parte desse projeto como Co-orientador.

## RESUMO

Este projeto visa o estudo de materiais inteligentes para geração de energia limpa e renovável utilizando o conceito de *energy harvesting*, ou seja, o processo de retirar energia de fontes externas (solar, eólica, ondas, vibração, etc.). A conversão de vibração em energia elétrica é uma das formas amplamente estudadas com a utilização de elementos piezoelétricos. O desafio atual nessa área visa o desenvolvimento de dispositivos que possam converter energia em uma ampla faixa de frequência de excitação, adaptando-se a fontes disponíveis no ambiente (sintonia), uma vez que, a amplitude de saída elétrica de um gerador piezoelétrico é máxima quando excitado na frequência de ressonância e é reduzida rapidamente fora deste limite. Primeiramente analisaremos um sistema de extração linear, e em seguida devemos inserir no sistema não-linearidades, através de ímãs magnéticos. O objetivo principal da introdução de não-linearidades é tornar o sistema caótico e aumentar a extração de energia. Por fim, os resultados obtidos utilizando os sistemas linear e não-linear serão comparados para verificar o aumento da eficiência.

**Palavras-chaves:** *Energy Harvesting*, Materiais Inteligentes, Materiais Piezoelétricos, Sistemas não-lineares.

## ABSTRACT

This project aims to study intelligent materials for clean and renewable energy generation using the concept of energy harvesting, ie, the process of removing energy from external sources (solar, wind, waves, vibration, etc.). The vibration conversion into electricity is one of the ways amply studied with the use of piezoelectric elements. The challenge in this area is to develop devices that can convert energy in a wide excitation frequency range, adapting to available sources on the environment (tune), since the amplitude of the electrical output of a piezoelectric generator is maximum when excited at the resonant frequency and is quickly reduce outside this range. First, we will analyze a linear extraction system and then must insert the nonlinearities system through magnetic magnets. The main objective of introducing nonlinearities is to make the chaotic system and increase energy extraction. Finally, the results obtained using linear and non-linear systems will be compared to verify the increase of efficiency.

**Key-words:** *Energy Harvesting, Smart Materials, Piezoelectric materials, Nonlinear systems.*

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	10
1.2 JUSTIFICATIVA .....	11
1.3 OBJETIVOS .....	12
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA.....	13
2.2 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE DISPOSITIVOS LINEARES .....	15
2.3 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE DISPOSITIVOS NÃO LINEARES.....	17
2.4 APLICAÇÕES DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA	20
2.4.1 <i>Pneus capazes de gerar energia</i> .....	20
2.4.2 <i>Windstalks utiliza a força dos ventos para gerar energia</i> .....	21
2.4.3 <i>Boates com piso gerador de energia</i> .....	23
2.4.4 <i>Sistemas produtores de energia em estradas</i> .....	24
2.4.5 <i>Geradores piezoelétricos em trilhos de trem</i> .....	25
2.4.6 <i>Sistemas de captação de energia em calçadas</i> .....	26
<b>3. EMBASAMENTO TEÓRICO .....</b>	<b>28</b>
3.1 MATERIAIS INTELIGENTES .....	28
3.2 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS .....	29
3.3 EQUAÇÕES CONSTITUTIVAS UNIDIMENSIONAIS .....	32
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>34</b>
4.1 MODELO NUMÉRICO.....	34
4.2 ADIMENSIONALIZAÇÃO.....	35
4.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	36
4.3.1 PIEZOELÁSTICOS.....	36
4.3.2 PIEZOMAGNETOELÁSTICOS .....	41
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>45</b>
5.1 RESULTADOS NUMÉRICOS: PIEZOELÁSTICO VERSUS PIEZOMAGNETOELÁSTICO .....	45

<b>5.2 ANÁLISE EXPERIMENTAL CASO LINEAR .....</b>	<b>50</b>
<b>5.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL: CASO NÃO-LINEAR .....</b>	<b>52</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>56</b>

# Capítulo 1

## 1. Introdução

### 1.1 Motivação

Muito se fala na geração de energia limpa, e de produzir um equipamento capaz de se auto sustentar, porém estamos muito distantes deste desafio. Atualmente muitas pesquisas possuem esse tema como propósito, e o desenvolvimento de diferentes tecnologias e materiais torna possível a perspectiva de alcançar este objetivo.

A utilização dos chamados materiais inteligentes tem crescido consideravelmente nos últimos anos, ocupando um importante espaço no projeto de sistemas mecânicos. Esta classe de materiais, usualmente utilizada como sensores e atuadores nos chamados sistemas inteligentes, possui características adaptativas, modificando sua forma ou propriedades físicas a partir da imposição de um campo elétrico, magnético, temperatura ou carregamentos mecânicos. Em linhas gerais, pode-se dizer que, atualmente, os principais materiais inteligentes são os materiais piezoelétricos, as ligas e polímeros com memória de forma, do inglês, *Shape Memory Alloys* (SMAs) e *Shape Memory Polymers* (SMPs), as ligas magnéticas com memória de forma, do inglês, *Magnetic Shape Memory Alloys* (MSMAs), os materiais magnetostrictivos e os fluidos eletro-magneto reológicos (Lagoudas, 2008; Priya and Inman, 2009).

Ainda seguindo o tema de materiais inteligentes, temos os materiais piezoelétricos que vêm contribuindo com diversos avanços tecnológicos na engenharia em geral e no desenvolvimento de sensores e atuadores. A piezoelectricidade é uma propriedade de alguns materiais que, através de uma tensão mecânica, se tornam eletricamente polarizados, o que chamamos de efeito direto, e o contrário também é possível, quando colocado em uma diferença de potencial (DDP), sofrem uma deformação mecânica.

Os materiais que possuem essa propriedade são chamados de piezoelétricos. Na natureza esses materiais inteligentes são encontrados nos cristais de Quartzo, titânio de bário e o sal de Rochelle, porém esses materiais apesar de possuírem a propriedade de piezoelectricidade, não possuem um rendimento tão alto. Por isso, na década de 50, foram

criados alguns materiais sintéticos que conseguiam produzir um potencial maior que os encontrados naturalmente, assim como os compósitos cerâmicos derivados do  $\text{PbZrO}_3$  (zirconato de chumbo) e  $\text{PbTiO}_3$  (titanato de chumbo) conhecidos como PZT (Lead Zirconate Titanate). O desenvolvimento desses materiais cerâmico policristalinos ampliou as aplicações na área de engenharia, graças as propriedades desses novos materiais.

Recentemente, o uso de piezoelétricos na geração de energia vem chamando a atenção de diversos autores. As propostas de geração e armazenamento apresentadas surgem do conceito de *Energy Harvesting*, ou seja, o processo de retirar energia de fontes externas (solar, eólica, ondas, vibração, etc.) e armazená-la, sendo a conversão de vibração em energia elétrica uma das formas amplamente estudadas com a utilização de elementos piezoelétricos. A crescente pesquisa nesta área tem contribuído para o desenvolvimento de sistemas em escalas reduzidas e em grandes escalas, por exemplo nas estruturas aeronáuticas (Du Toit, 2005; De Marqui et al.; Erturk et al., 2009; Inman, 2009). Um desafio atual nessa área é o desenvolvimento de dispositivos que possam converter energia em uma ampla faixa de frequência de excitação, adaptando-se a fontes disponíveis no ambiente (sintonia), uma vez que, a amplitude de saída elétrica de um gerador piezoelétrico é máxima quando excitado na frequência de ressonância e reduzida rapidamente fora deste limite. Uma forma possível para atingir este objetivo é a concepção de dispositivos que operem em regimes não lineares como os piezomagnetoelásticos (De Marqui, et al. 2013; Erturk et al, 2009).

## 1.2 Justificativa

A escolha pela geração de energia limpa por piezoelétricos se dá pelo recente, e sempre presente, debate sobre novos métodos de obtenção de energia, e os piezoelétricos são materiais que estão sendo estudados com mais afinco a relativamente pouco tempo. Com um tema atual, será explorado um novo campo de estudo para que futuramente tenha mais abordagens desse tema, e assim fortalecendo o grupo de pesquisa na área de materiais inteligentes do CEFET-RJ. Também é de extrema importância que o tema “geração de energia” seja abordado, pois é um tema muito aplicado à engenharia em geral, podendo assim, incluir o CEFET-RJ nesse nicho de instituições de excelência, nesse tema muito presente na engenharia.

### **1.3 Objetivos**

O presente trabalho visa a realização de estudos experimental e numérico do uso de materiais piezolétricos para geração de energia. Serão realizados ensaios experimentais do sistema de geração de energia com materiais piezoelétricos sujeito a vibrações. Diferentes parâmetros como amplitude e frequência serão variados para verificar a resposta do sistema. Em seguida serão incluídos ímãs em diferentes arranjos nas proximidades do piezoelétrico para estudo da resposta não-linear do sistema. Por fim, será realizado o desenvolvimento e calibração de um modelo numérico do sistema de geração de energia acoplado a um circuito elétrico por um elemento piezoelétrico prevendo sua resposta nos regimes linear e não-linear.

## Capítulo 2

### 2. Revisão Bibliográfica

A utilização e dependência de fontes fósseis de energia em todo o mundo conduziram a um investimento de novos vetores de energia (Gonçalves, 2011). *Energy Harvesting* é um tema que vem ganhando atenção de muitos pesquisadores, e é considerada uma área muito promissora onde conseguimos converter parte da energia gerada por vibrações mecânicas em energia elétrica, que pode ser utilizada com outros propósitos. Diferentes tipos de estruturas podem ser utilizados com esse objetivo, incluindo pontes, prédios, aeronaves e carros (Sodano et al., 2004; Erturk et al., 2009; Erturk et al., 2010

#### 2.1 Geração de energia

Atualmente já existem formas de produzir eletricidade a partir de fontes renováveis, como acontece com a água, o vento, o sol e as marés. No entanto, não bastam apenas essas formas, é necessário inovar e, aliado a novas tecnologias e descobertas, caminhar para uma forma mais efetiva de sustentabilidade.

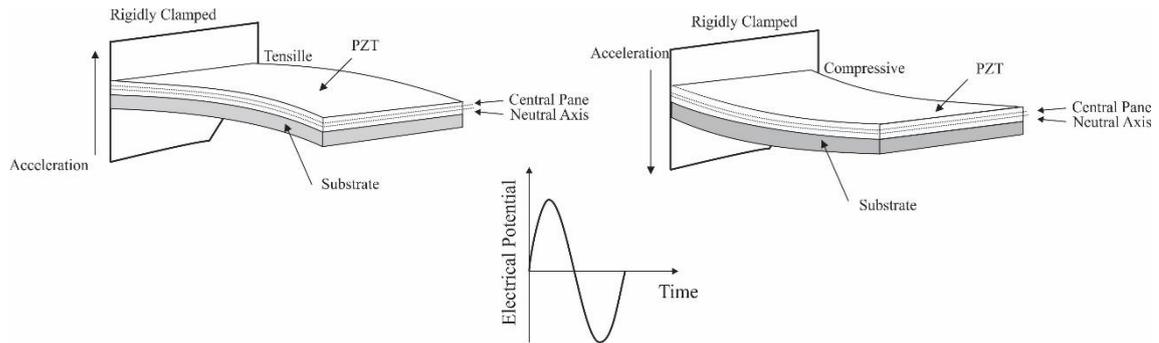
A Piezeletricidade foi descoberta pelos irmãos Pierre e Jacques Curie na França, em 1880, o efeito piezoelétrico é apresentado em cristais. Os irmãos Curie, no entanto, não previram o efeito piezoelétrico inverso. O efeito inverso foi matematicamente deduzido de princípios fundamentais da termodinâmica por Gabriel Lippmann em 1881. Os Curie imediatamente confirmaram a existência do efeito inverso, o que evidenciou de forma quantitativa a reversibilidade completa de um acoplamento eletromecânico para as deformações em cristais piezelétricos. Nas décadas seguintes, a piezeletricidade permaneceu como sendo uma curiosidade de laboratório. Mais trabalho foi feito para explorar e definir as estruturas cristalinas que tinham a propriedade de gerar corrente elétrica. Isso culminou no ano de 1910, com a publicação do livro de Woldemar Voigt *Lehrbuch der Kristallphysik* (Textbook no Crystal Física), que descreve 20 classes de cristais naturais capazes de gerar corrente quando submetidos a pressão mecânica, e rigorosamente definidas as constantes piezoelétricas usando análise tensorial.

A grosso modo, piezoelectricidade é a capacidade de alguns materiais gerarem tensão elétrica quando sofrem um esforço mecânico. O termo “piezo” é derivado da palavra grega que significa pressão. Assim como a geração de eletricidade por deformação é possível, o oposto também é. É possível também, a geração de uma deformação mecânica em resposta a uma aplicação de tensão elétrica. Dessa maneira surge o conceito de geração ou colheita de energia (*Energy Harvesting*).

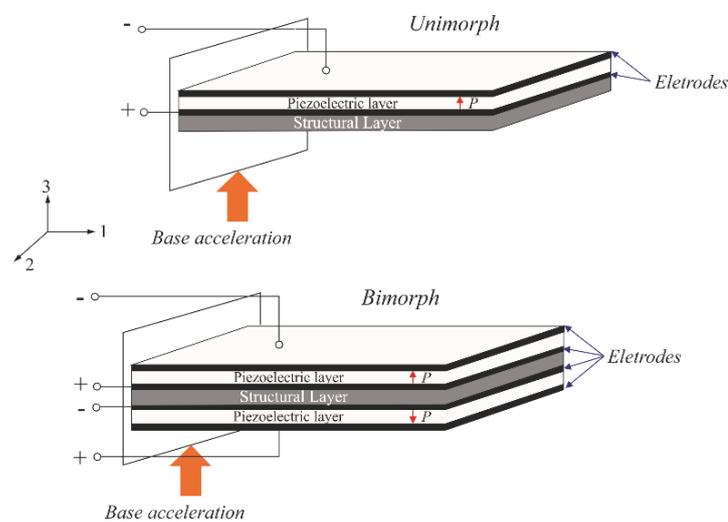
Nas técnicas de geração e captação de energia denominada *Energy Harvesting* existem quatro aplicações principais para captação de energia, o piezelétrico (SODANO et al., 2005<sup>a</sup>; SWALLOW et al., 2008), a eletromagnética (REID et al., 2007; TORAH et al., 2007), a termoelétrica (ROWE, 2005) e a fotovoltaica (LEE et al., 1994). Entretanto, a revisão será focada na geração de energia piezelétrica a partir de dispositivos lineares e não lineares.

O material piezoelétrico mais utilizado para converter vibrações mecânicas em uma forma utilizável de energia é a cerâmica de titanato zirconato de chumbo, PZT. No entanto o PZT é frágil, apresentando limitações a deformações.

Segundo PARES (2006), o PZT tem sido utilizado por muitos grupos de pesquisa por possuírem como principal característica alto coeficiente piezelétrico, sendo amplamente utilizado para converter, de modo conservador, energia mecânica em elétrica. Considerando que a fonte de energia a ser explorada é a vibração, a geometria mais comum utilizada em grande parte dos estudos ilustrada na Figura 1, 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 (RAMADASS et al., 2010). Pode ser composta por uma camada piezoelétrica, conhecida como *piezoelectric unimorph beam*, ou composta por duas camadas piezoelétricas designada como *bimorph cantilever beam*, ver Figura 2. Os bimorfos são os mais utilizados pois fornecem maiores níveis de energia de saída.



**Figura 1:** Configuração básica para captação de energia através de vigas piezoelétricas em balanço.



**Figura 2:** Tipos de geradores piezolétricos, unimorfo (acima) e bimorfo (abaixo).

Os motivos que levaram a estas configurações baseadas em vigas para conversores piezoelétricos são: 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.

## 2.2 Geração de Energia a partir de dispositivos lineares

A geração de energia a partir de dispositivos lineares é mais simples que em dispositivos não lineares. Lu, Lee e Lim (2004) utilizam um modelo de viga para análise de um gerador piezoelétrico com aplicação em MEMS, a potência de saída e a eficiência de conversão de energia são obtidas sendo a potência utilizada para avaliar o desempenho do

dispositivo. Os autores utilizam apenas um modo de vibração durante as análises, simplificando o acoplamento elétrico na equação. Um trabalho semelhante é apresentado por Chen, Wang e Chien (2006), porém os autores consideram todos os modos de vibração e representam o efeito do acoplamento eletromecânico por um coeficiente de amortecimento viscoso.

Roundy (2005) relata a dificuldade de comparar diferentes abordagens e modelos para dispositivos de geração de energia, assim o autor fornece uma teoria geral que pode ser utilizada para comparar diferentes dispositivos. A teoria demonstra que para qualquer tipo de gerador a potência de saída depende do coeficiente de acoplamento do sistema, do fator de qualidade do dispositivo e do grau para o qual a carga elétrica maximiza a transmissão de potência.

Liao e Sodano (2008) descrevem um modelo teórico que fornece uma previsão acurada de energia gerada em torno de um único modo de vibrar, a otimização dos parâmetros do sistema para alcançar a máxima eficiência é realizada através de simulações numéricas e confirmada através um modelo experimental.

Erturk e Inman (2008a) publicaram muitos trabalhos sobre geração de energia através de materiais piezoelétricos utilizando uma viga em balanço. A solução analítica de um dispositivo piezoelétrico com vibrações transversais baseado na teoria de vigas de Euler-Bernoulli possui resultados para tensão, corrente, potência elétrica e resposta em frequência. A solução analítica desse sistema foi estendida para o caso de um gerador *bimorph* também apresentado por Erturk e Inman (2009)

Guizzetti et al. (2009) apresentam uma técnica de otimização na qual a geometria de um gerador de energia formado por uma viga cantilever é variada a fim de verificar se existe uma espessura ótima para o dispositivo piezoelétrico que maximize a potência elétrica gerada, computada através do Método dos Elementos Finitos. Os resultados obtidos foram capazes de determinar uma espessura ótima para o dispositivo piezoelétrico na qual a potência máxima de saída foi obtida.

Dietl e Garcia (2010) também apresentaram uma otimização para os geradores de energia piezoelétrica. Os autores estudam três tipos de vigas, modelados com vigas Euler-Bernoulli, para analisar a influência da seção transversal no desempenho do dispositivo, com intuito de adicionar material piezoelétrico nas regiões onde existe maior deformação e remover onde a deformação é menor.

Kim e Kim (2011) propuseram vários modelos matemáticos para analisar as vigas piezoelétricas, nesses modelos o efeito da razão/comprimento e também o efeito da

distribuição da massa da extremidade foram considerados na determinação das respostas elétricas. A validação e precisão dos modelos propostos foram verificados através da comparação dos resultados para tais modelos, com modelos convencionais e com modelos de elementos finitos tridimensionais. As comparações mostraram que o modelo desenvolvido forneceu melhorias nas determinações de respostas elétricas, mostrando ser útil para o projeto de sistemas piezelétricos de conversão de energia composta por vigas.

Embora existam muitos artigos sobre geração de energia a partir de dispositivos lineares, atualmente a geração de energia a partir de dispositivos não lineares tem chamado mais atenção entre os pesquisadores. O objetivo principal nesses novos experimentos é operar em regimes não lineares e fazer com que o sistema atinja o caos gerando maiores vibrações e conseqüentemente mais energia

### **2.3 Geração de Energia a partir de dispositivos não lineares**

A ideia geral de *Energy Harvesting* é objetivo de vários esforços e pesquisas (Roundy et al., 2004; Sodano et al., 2004; Erturk et al., 2009). Estudos teóricos e práticos buscam melhorias de projeto e a otimização do desempenho da geração de energia (du Toit & Wardle, 2006; Triplett & Quinn, 2009; Mitcheson et al., 2011).

A grande vantagem do dispositivo não linear é que estes conseguem capturar energia sobre uma grande faixa de frequência de vibrações, diferente dos lineares. O mecanismo mais utilizado para gerar a não linearidade é composto por materiais magnéticos em suas extremidades, como pode ser visto nos trabalhos de Grzegorz Litak e Marek Borowiec., 2011, Mohammad Amin Karami e Daniel J. Inman., 2010, Uzun e Kurt., (2013), Mann., (2009), entre outros.

Galayko et al. (2007) apresenta análise, modelagem e projeto de um conversor de energia capacitivo baseado em vibrações, o dispositivo é composto por um ressonador mecânico, um transdutor capacitivo e um circuito de condicionamento. O conversor é tratado como um sistema não linear com um forte acoplamento entre o sistema elétrico e mecânico. A condição ótima do sistema é analisada através de simulações computacionais. De acordo com os autores, o estado do circuito de condicionamento e a magnitude da aceleração externa tem grande influência no comportamento do conversor. Isto está relacionado ao acoplamento mecânico, atribuído ao efeito da não linearidade do transdutor capacitivo.

Erturk, Hoffman e Inman (2009) analisam um dispositivo piezo-magnético-elástico para reforçar o aumento da geração de energia através do dispositivo piezoelétrico. Equações eletromecânicas não lineares descrevem o movimento do sistema, e simulações numéricas e experimentais mostram um aumento de 200% na amplitude de tensão.

Scruggs (2009) apresenta uma teoria, baseada na teoria do controle ótimo, para projetar o dispositivo de geração de energia. A teoria é aplicada em sistemas vibracionais excitados de modo aleatório em uma ampla faixa de frequência e permite que a potência gerada pelo dispositivo seja explicitamente otimizada. Essa teoria pode ser aplicada tanto para um único sistema transdutor quanto para uma rede de transdutores acoplados. O autor utiliza uma viga engastada bimorfa para contextualizar a teoria e realiza simulações numéricas para ilustrar vários aspectos de controle otimizados.

Lallart et al. (2010) estuda uma aplicação do tratamento não linear para a conversão de energia acústica introduzindo uma aproximação que permite prever o comportamento da interface proposta. Os autores levam em consideração os efeitos de amortecimento e o efeito da mudança de frequência acústica introduzida pelo processo de conversão. Os resultados demonstram que a técnica permite aumentar a largura da faixa de frequência em termos de energia convertida e nota-se um aumento significativo na energia convertida para sistemas com baixo acoplamento excitados fora da frequência de ressonância.

Erturk e Inman (2011) fazem uma comparação teórica e experimental entre dois sistemas de geração de energia, um piezo-magnético-elástico (já citado) e outro piezo-elástico. O primeiro mostra uma larga faixa de amplitude para as respostas de tensão elétrica. Suas fases eletromecânicas são comparadas e uma substancial vantagem é observada para o sistema piezo-magnético-elástico. Outra comparação é a resposta caótica e resposta periódica dos sistemas envolvidos, onde a tensão de saída é muito similar tanto para o sistema piezo-elástico como para o piezo-magnético-elástico.

Owens e Mann (2012) analisam a resposta de um conversor de energia com indução eletromagnética. Um aspecto interessante do estudo é a comparação do comportamento do sistema quando uma forma linear ou um acoplamento não linear é aplicado. As conclusões são que há regiões onde o acoplamento não linear traz resultados superiores ao linear, mas há também regiões onde o contrário acontece. Dessa maneira, o acoplamento linear deve ser adequadamente ajustado ao tipo de sistema para que não seja prejudicial.

Tang, Yang e Soh (2012) trabalham com o campo magnético a fim de melhorar o desempenho de um dispositivo linear para geração de energia. Tanto na configuração mono estável, quanto na configuração biestável são investigadas sob vibração senoidal e randômica,

com níveis diferentes de excitação. Através de experimentos, os autores determinam que a região não linear ótima (em termos de afastamento entre os magnetos) é perto da transição entre os movimentos mono estável e biestável. Os autores trabalham com o efeito *softening* e com o *hardening*, dependendo da polarização dos magnetos.

Friswell et al. (2012) exibem uma nova configuração para um dispositivo não linear de geração de energia. Uma viga cantilever com uma massa de prova na extremidade livre, porém montada verticalmente e excitada na direção transversal a sua base. Essa configuração é altamente não linear e biestável para grandes massas de prova. As equações eletromecânicas para o movimento do sistema são desenvolvidas e a resposta para vários parâmetros são investigadas usando os espaços de fase e diagramas de bifurcação. O modelo é validado experimentalmente comparando três diferentes massas de prova. Na visão dos autores a configuração mais apropriada é para a massa de prova que deixa a viga quase dobrada, onde o sistema apresenta baixa frequência natural, potências de saída maiores e um aumento na faixa de frequência de operação se comparado com o caso linear.

Karami, Farmer e Inman (2013) apresentam um novo modelo de tradutor piezelétrico onde a rotação de laminas resulta em grandes oscilações de vigas cantilevers. As vigas bimorfas são biestáveis pela repulsão das forças magnéticas. A força magnética aparece devido a interação entre os magnetos presentes nas extremidades livres das vigas e os magnetos das laminas rotativas. Através de experimentos o transdutor piezelétrico foi caracterizado com velocidade constante. Os ensaios em tuneis de vento demonstraram que para uma larga faixa de velocidade do vento, a relação entre a potência gerada e a velocidade do vento não é propensa a ressonância. Os fenômenos não lineares capturados pelos experimentos são explicados usando modelo analítico.

Silva et al. (2015) fizeram uma análise da influência comportamento não-linear do elemento piezoelétrico em simulações de captação de energia à base de vibração. Foram usados três modelos diferentes para o coeficiente de acoplamento piezoelétrico: modelo linear; modelo não-linear com variação linear; e modelo não-linear com variação quadrática. Os resultados mostram que a não linearidade nos piezoelétricos tem uma influência significativa sobre o desempenho do sistema em termos de energia absorvida especialmente sob condições de ressonância.

É possível dizer, depois dessa revisão bibliográfica, que ao longo do tempo ocorreram inúmeras pesquisas e experimentos com intuito de tornar os dispositivos piezelétricos mais eficientes. Esses dispositivos são extremamente vantajosos tendo em vista que podem ser

aplicados em situações cotidianas, adaptando-se ao ambiente, e gerando energia sem prejudicar o meio ambiente.

## **2.4 Aplicações de materiais piezoelétricos para geração de energia**

Atualmente a busca por energias renováveis que não envolvam combustíveis fósseis, ou que pelo menos busquem a diminuição da utilização do mesmo, tem aumentado consideravelmente. Na utilização dos combustíveis fósseis percebe-se três problemas que estão a levar uma mudança de paradigma: disponibilidade, custo e a poluição. Desse modo, o desafio atual é gerar um modelo energético mais sustentável sem que isso tenha influência no desenvolvimento social e econômico.

Nessa seção veremos algumas aplicações dos materiais piezoelétricos na geração de energia e vamos concluir que esse conceito já faz parte da vida de muitas pessoas, porém muitas desconhecem.

### **2.4.1 Pneus capazes de gerar energia**

Uma pesquisa feita pela universidade de Delaware, nos Estados Unidos, mostrou que os principais pontos que as pessoas observam antes de substituir seus carros a gasolina por carros elétricos são: a autonomia, o custo e o tempo de recarga da bateria.

Pensando nisso, dois engenheiros da universidade de Ontário, Noaman Makki e Remon Pop-Iliev (2011), no Canadá, decidiram inserir nanogeradores piezoelétricos dentro dos pneus, figura 3, que se deformam naturalmente com o rodar de um veículo, devido a sua flexibilidade e oscilações das estradas.



**Figura 3:** *Nanogeradores piezoeletricos dentro do pneu.*

Os pesquisadores verificaram que, para gerar maior quantidade de energia era necessário cobrir uma área maior da superfície interna dos pneus com os nanogeradores. Em seu protótipo eles utilizaram uma malha de 4 x 40 fios, colados no interior de um pneu aro 14 com um adesivo flexível.

Com o veículo rodando a 100 km/h – o que equivale a uma rotação do pneu de aproximadamente 14 giros por segundo – o material piezoelétrico de teste produziu 2,3 watts de forma sustentável por pneu. Em um segundo teste utilizando uma camada de nanogeradores, superposta a primeira, a produção de energia saltou linearmente para 4,6 watts.

A multinacional Goodyear levou ao Salão Internacional do Automóvel de Genebra, em 2015, o mesmo conceito da utilização de materiais piezoelétricos, aliado ao material termoelétrico, para geração de energia. O protótipo, chamado de BH03, é apenas um conceito que ainda está em desenvolvimento, mas é uma prova do excelente potencial dos materiais piezoelétricos.

#### **2.4.2 Windstalks utiliza a força dos ventos para gerar energia**

A empresa de design de Nova York Atelier DNA criou um conceito que substitui as laminas das turbinas eólicas por hastes, semelhantes a finas taboas chamadas de windstalks. Os designers desenvolveram essa ideia para a cidade planejada de Masdar, de 2,3 kilometros

de área livre, livre de automóveis, a ser construída na parte de fora de Abu Dhabi, Nunez-Ameni, Dario. ADNA, (2010).



**Figura 4:** *Parque eólico windstalk*

A proposta do projeto solicita 1203 "caules", cada um com 55 metros de altura, com bases de concreto que estão entre 10 e 20 metros de largura. As hastes de fibra de carbono, reforçadas com resina, são cerca de 30 centímetros de largura na base afinando para cerca de 5 centímetros na parte superior, como mostrado na Figura 4. Cada haste conterá camadas alternadas de eletrodos e discos de cerâmica feitas de material piezoelétrico, que gera uma corrente quando colocada sob pressão. No caso dos pés, os discos irão comprimir conforme eles balançam ao vento, criando uma carga.

Na proposta de Masdar, o parque eólico Windstalk abrange cerca de 6 acres. Baseado em estimativas aproximadas, Dario Núñez-Ameni parceiro de fundação do Atelier DNA disse que o rendimento seria comparável ao de um parque eólico convencional cobrindo a mesma área.

Uma Windstalk deve ser capaz de produzir tanta electricidade como uma única turbina de vento, com a vantagem que a produção poderia ser aumentada com uma matriz mais densa de hastes. Densidade não é possível com turbinas convencionais, que devem ser espaçadas de cerca de três vezes o diâmetro do rotor, para evitar a turbulência do ar, mas Windstalks trabalham sobre o caos e turbulência de modo que podem ser instalados muito mais próximos, disse Núñez-Ameni.

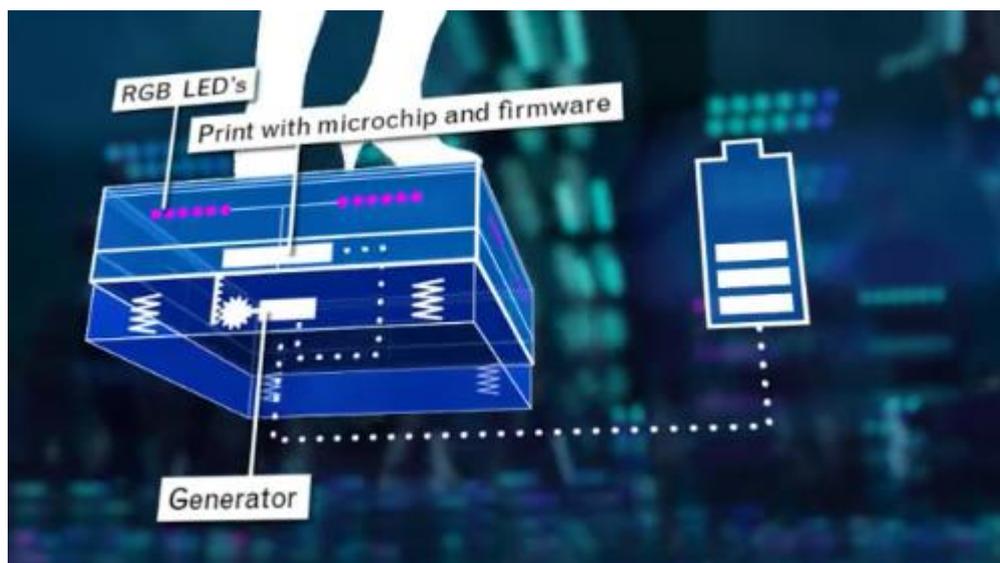
Tempestades de poeira, comuns na região, não seriam problema para este conceito. Não haveriam falhas, como em sistemas de energia solar que não funcionam corretamente nestas condições, uma vez que o vento é o que fornece energia para os Windstalks. A

principal preocupação neste caso seria se o carbono reforçado com fibra de resina pode resistir a ventos de alta velocidade.

### 2.4.3 Boates com piso gerador de energia

Foi criada parcialmente pela Sustainable Dance Club (2008), formado por um grupo ecológicos de inventores, engenheiros e investidores holandeses liderados por Michel Smit. Trata-se de uma boate que utiliza a energia de pessoas se movimentando e dançando para gerar energia elétrica. Pensando que uma pessoa dançando sozinha pode gerar até 20 W, duas podem acender uma lâmpada, disse Michel Smit (2008) em uma entrevista para o The New York Times.

O proprietário estima que a pista de dança produza até 10% da energia total gasta pela boate. Seu funcionamento se dá através de sensores piezoelétricos instalados embaixo do piso na pista de dança conforme Figura 5.



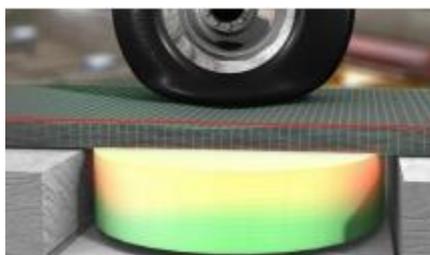
**Figura 5:** *Placa geradora de energia*

Seu funcionamento acontece por meio de módulos que são flexionados levemente quando sofrem pressão conforme as pessoas se movimentam. Dentro de cada módulo existe um sistema eletromecânico que transforma o movimento vertical, produzido pelas pessoas dançando, em movimento rotativo que aciona um gerador. Cada módulo tem o tamanho de 75x75x20 cm e pode produzir até 35 Watts de saída sustentável, e de 5 a 20 Watts por pessoa.

A ideia principal é de que a energia está em todos lugares, nós é que não aproveitamos. Esse exemplo foi sobre a pista de dança, mas já existem projetos como esse para campos de futebol, calçadas, e etc.

#### 2.4.4 Sistemas produtores de energia em estradas

Outra aplicação seria a instalação de geradores piezoelétricos em estradas conforme Figura 6. Esta solução recolhe a energia mecânica transmitida pelo automóvel à estrada convertendo-a em eletricidade, aproveitando dessa forma energia que geralmente é desaproveitada (Katz, 2009).



**Figura 6:** *Deformação vertical provocada à passagem do pneu*

No deslocamento do veículo o pneu provoca na superfície uma pressão vertical resultante do seu peso e velocidade, essa pressão é transmitida a um gerador que produz eletricidade. A questão primordial na construção de estradas utilizando a solução apresentada é o aproveitamento de energia, que neste momento não é utilizada, e que pode minimizar alguns dos efeitos da crescente utilização dos automóveis.

Um projeto-piloto, realizado pela empresa Innowattech em 2010, num trecho de 10 metros de comprimento da estrada, utilizando geradores piezoelétricos de 5,5 cm de espessura e colocados na camada compacta do asfalto, a 6 cm do nível superior da estrada conforme Figuras 7 e 8.



**Figura 7:** *Preparação do asfalto*



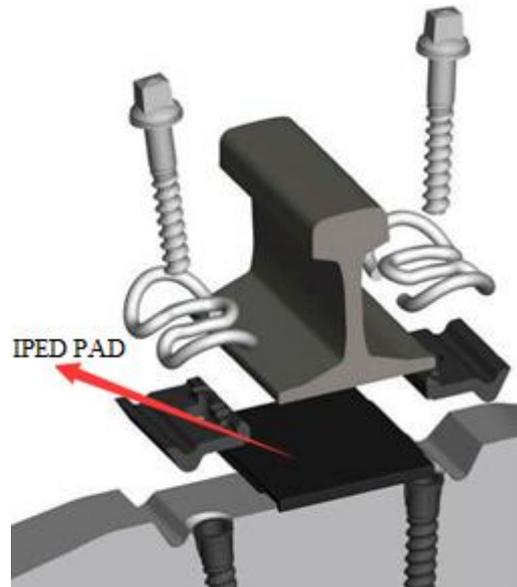
**Figura 8:** *Posicionamento do material piezoelétrico*

Deste projeto-piloto resultou a produção de 1 KW/H, produzido pelo conjunto das duas colunas de 10 metros de geradores instalados. Para se determinar a quantidade de energia produzida tiveram em consideração a frequência e a velocidade do caminhão (1000 caminhões por hora com velocidade média de 72 km/hora) e as condições físicas da estrada.

Segundo cálculos da empresa Innowattech, até 20 carros passam por uma via expressa a cada minuto. Esse trânsito pode gerar 200 KW/H – o suficiente para abastecer uma casa por um mês. O professor Haim Abramovich, fundador da organização, explica que em uma avenida com menos de 1,6 quilômetros (uma milha), quatro faixas e por onde circulam cerca de mil veículos por hora pode gerar aproximadamente 0,4 MW, sendo o suficiente para alimentar 600 casas.

#### **2.4.5 Geradores piezoelétricos em trilhos de trem**

Partindo do mesmo princípio da geração de energia a partir de estradas, a empresa Innowattech desenvolveu um projeto junto com a Companhia Nacional Ferroviária de Israel que tinha como objetivo substituir os coxins dos trilhos tradicionais feitos de borracha por coxins desenvolvidos pela Innowattech (2011), IPED PAD, Figura 9.



**Figura 9: IPED PAD**

A implementação dos IPED PAD é muito rápida e simples. Os IPED PAD possuem as mesmas dimensões dos coxins tradicionais já utilizados, a principal diferença é que eles são produzidos com elementos piezoelétricos que transformam as tensões mecânicas em energia elétrica. Durante o projeto 32 coxins foram substituídos e testes preliminares mostraram que áreas onde passam de 10 a 20 trens por hora podem produzir até 120 KW/H.

#### **2.4.6 Sistemas de captação de energia em calçadas**

Da mesma maneira que é utilizado em estradas e ferrovias, a exploração da geração energia em calçadas e pisos, Figura 10, vem ganhando espaço entre os pesquisadores da Innowattech (2010). Se a tecnologia for aplicada em lugares onde o fluxo de pessoas é alto a energia gerada pode ser grande.

Estimasse que pode ser gerado 1 KW para cada 100 metros de piso com material piezoelétrico se três mil pessoas passarem a cada hora pelo local.



**Figura 10:** *Geração de energia a partir de placas instaladas em calçadas.*

## CAPÍTULO 3

### 3. Embasamento teórico

Este capítulo aborda todos os conceitos teóricos aplicados neste projeto. Neste capítulo faremos uma breve introdução aos materiais inteligentes. Posteriormente, falaremos sobre materiais piezoelétricos lineares, sua história, suas características peculiares, como propriedades e variáveis de campo: mecânicas e elétricas. As variáveis de campo mecânicas são tensão e deformação, e as variáveis de campo elétricas são deslocamento elétrico e o campo elétrico. Logo em seguida abordaremos alguns conceitos relacionados a vibração mecânica, e fecharemos falando sobre geração de energia. Todos o desenvolvimento de conceitos, bem como definições e equações necessárias serão abordadas neste capítulo.

#### 3.1 Materiais Inteligentes

Basicamente, os materiais inteligentes são todos os tipos de materiais que mudam suas propriedades ao variar-se uma propriedade física. Na literatura existem diversos materiais com tais propriedades, entre os quais podemos citar materiais que apresentam diferentes acoplamentos, como eletromecânico, magneto-mecânico e termomecânico (Lagoudas, 2009).

Nota-se que para essa categoria de materiais, ao se modificar uma variável de estado em um domínio físico, outra variável de estado em um domínio físico diferente é modificada. Podemos então definir o termo acoplamento, como essa peculiaridade. O acoplamento ocorre quando a mudança de uma variável de estado em certo domínio físico acarreta na mudança de outra variável de estado em um domínio diferente. Logo, são chamados de materiais inteligentes, os materiais que possuem acoplamentos entre múltiplos domínios físicos.

Podemos citar como exemplo de acoplamento, as ligas de memória de forma SMA (*Shape Memory Alloys*), que podem converter energia térmica em deformação mecânica, logo a mudança de temperatura do material, que é uma variável do domínio térmico acarretou uma deformação, variável do domínio mecânico. Este efeito é chamado acoplamento termomecânico (Lagoudas, 2009).

Entende-se por domínio físico qualquer quantidade física que pode ser definida por duas variáveis de estado. Já as variáveis de estado podem ser definidas como a delimitação de

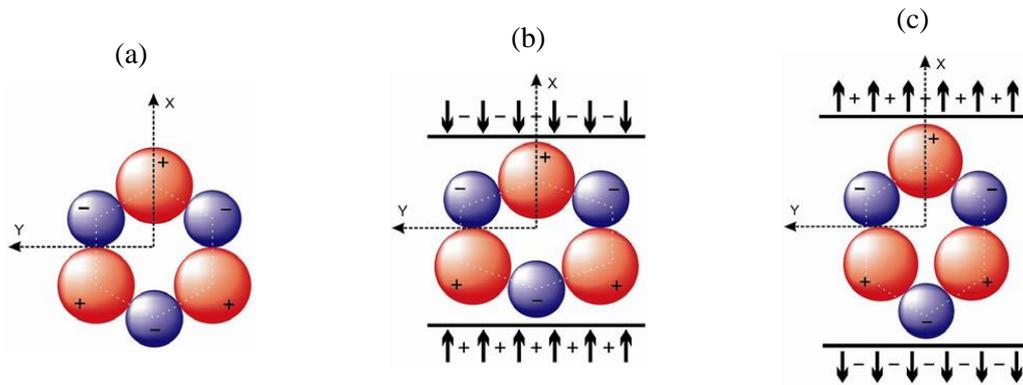
um espaço dentro de um domínio físico. Um exemplo de domínio físico é o domínio mecânico, que possui como variáveis tensão e deformação por exemplo. A Tabela 1 descreve domínios físicos e algumas variáveis de forma exemplificada.

**Tabela 1** – *Exemplos de domínios físicos e variáveis de estado associadas.*

Mecânico	Elétrico	Térmico	Magnético	Químico
Tensão	Campo Elétrico	Temperatura	Campo Magnético	Concentração
Deformação	Deslocamento Elétrico	Entropia	Fluxo Magnético	Fluxo Volumétrico

### 3.2 Materiais Piezoelétricos

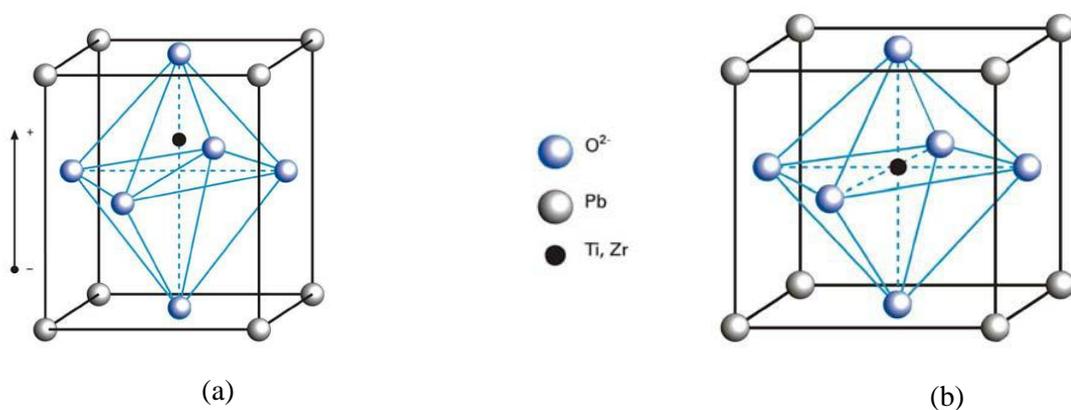
Existem materiais que, sob pressão ou tensão mecânica, geram cargas elétricas em sua superfície. Este fenômeno, descoberto em 1880 pelos Curies, foi denominado efeito piezoelétrico e é reversível, ou seja, a aplicação de um campo elétrico causa a deformação do material. Cristais de quartzo, turmalina, sal de Rochelle, topázio, etc. exibem efeito piezoelétrico em seu estado natural. A estrutura atômica do quartzo, por exemplo, é constituída por uma hélice que se estende ao longo do eixo Z conforme esquematizado na Figura 11, com dois átomos de oxigênio (cargas negativas) e um de silício (carga positiva). No plano XY os átomos formam um hexágono que, no estado natural (ausência de stress) tem carga total nula. A aplicação de forças de tração ou compressão na direção X ou Y do cristal faz com que haja um desbalanceamento de cargas e gera cargas elétricas externas. A aplicação de forças no eixo Z não gera cargas elétricas. O efeito inverso, isto é, a aplicação campos elétricos externos nas direções X ou Y faz com que o material se deforme, sendo que a magnitude dessa deformação é proporcional a este campo (Leo, 2007).



**Figura 11:** Estrutura atômica do quartzo. (a) Estado natural; (b) Efeito da compressão; (c) Efeito da tração

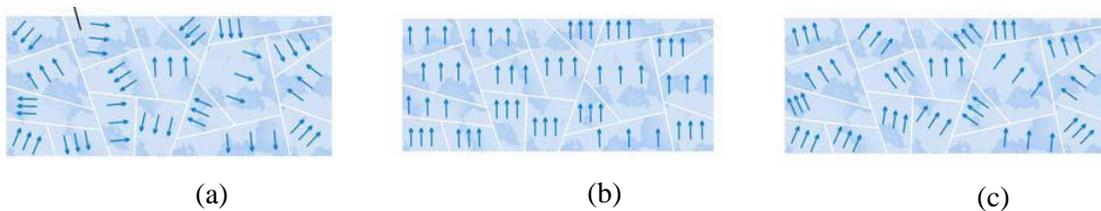
Existem materiais piezoelétricos sintéticos, isto é, que não exibem o efeito piezoelétrico no estado natural. Estes materiais passam por um processo denominado polarização (*poling*) para adquirirem uma característica piezoelétrica. Pode-se citar como exemplos o titanato-zirconato de chumbo (PZT), titanato de chumbo ( $\text{PbTiO}_2$ ), zirconato de chumbo ( $\text{PbZrO}_3$ ) e titanato de bário ( $\text{BaTiO}_3$ ).

PZT, por exemplo, é formado por blocos microscópicos chamados domínios que, por sua vez, são formados por células unitárias tetragonais distorcidas quando se encontram abaixo da temperatura Curie (Figura 12(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. Como os domínios encontram-se distribuídos aleatoriamente, o PZT não apresenta propriedades piezoelétricas macroscópicas (Figura 12 (a)).



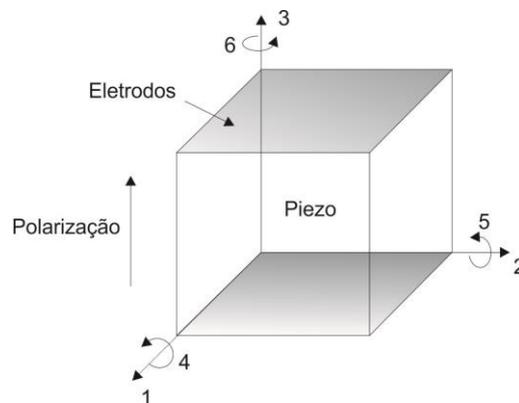
**Figura 12:** Estrutura atômica do PZT: (a) Estado tetragonal distorcido; (b) Estado cúbico.

Entretanto, é possível polarizar o PZT de maneira que este passe a proporcionar o efeito piezoelétrico. Este procedimento é realizado aquecendo-se o material acima da temperatura Curie, de forma que o estado das células unitárias do material passa a apresentar simetria cúbica, como ilustrado na Figura 13 (a). Com o material aquecido, aplica-se um campo elétrico intenso e as células unitárias se expandem na direção deste campo, como mostrado na Figura 13 (b). Após o resfriamento do material e a retirada do campo elétrico, as células unitárias mantêm o alinhamento, porém não completamente (Figura 13 (c)). Contudo o alinhamento remanescente é suficiente para que PZT passe a exibir o efeito piezoelétrico.



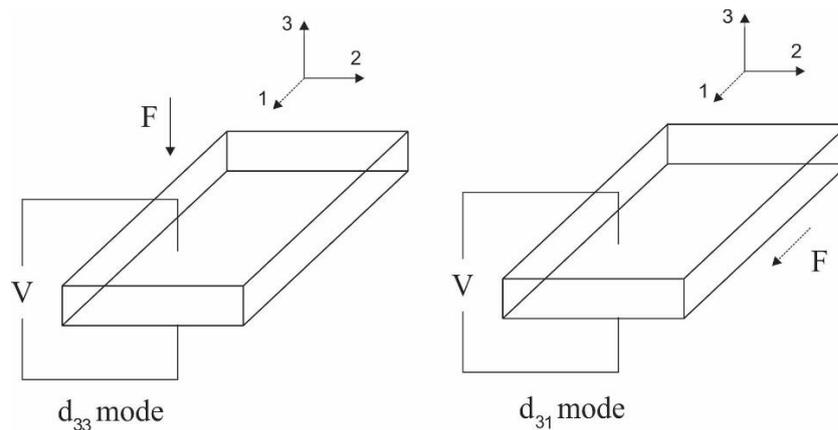
**Figura 13:** Polarização do PZT. (a) material sem polarização; (b) aplicação de campo elétrico; (c) após a polarização.

Como os piezoelétricos são materiais transversalmente isotrópicos, os efeitos são dependentes da direção. Por convenção a direção positiva de polarização (*poling direction*) é usualmente escolhida para ser coincidente com o eixo 3 (direção z) como mostra a Figura 14. Esta direção é estabelecida durante a fabricação do material. Os eixos 1 e 2 são arbitrários e os movimentos de cisalhamento representados por 4, 5 e 6.



**Figura 14:** Convenção de eixos para um material piezoelétrico.

Os modos de operação mais comuns são os modos 33 e 31 e dependem do arranjo de eletrodos (Ralib et al, 2010). O lado esquerdo da Figura 15 mostra o modo 33 onde a tensão é aplicada na direção 3 (eixo de polarização) e a carga é coletada na mesma direção. O modo 31, por outro lado, possui tensão aplicada ao longo da direção 1 (perpendicular a direção de polarização) e a carga é coletada na mesma superfície mencionada anteriormente, conforme mostra a Figura 7 (direita).



**Figura 15:** Modos de operação de um piezoelétrico.

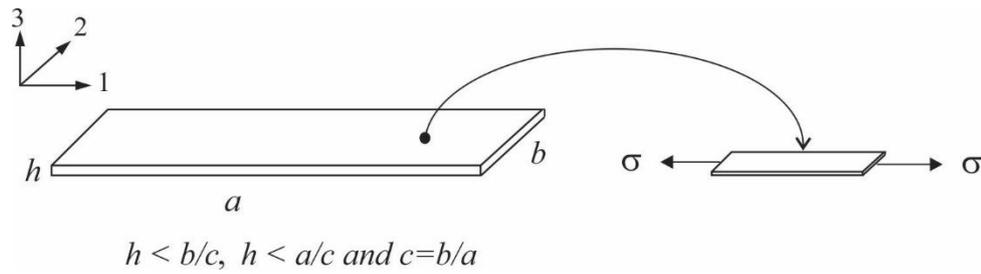
### 3.3 Equações Constitutivas Unidimensionais

Materiais Piezoelétricos apresentam acoplamento eletromecânico sendo possível operar nos modos direto e inverso. A teoria envolvida no fenômeno de piezoeletricidade pode ser descrita pelo acoplamento entre as equações eletromagnéticas e as equações mecânicas dentro de limite elástico. Ao trabalharmos com uma fina estrutura piezoelástica podemos modelar como uma viga, com isto todas as componentes de tensão podem ser desprezadas com exceção da componente na direção 1, conforme mostra a Figura 16. As equações constitutivas são dadas por (Erturk and Inman, 2011):

$$\varepsilon = s^E \sigma + dE \quad (\text{inverse effect}) \quad (1)$$

$$D = d\sigma + \kappa^\sigma E \quad (\text{direct effect}) \quad (2)$$

onde  $\varepsilon$  é a deformação,  $\sigma$  é a tensão,  $D$  é o deslocamento elétrico, e  $E$  é o campo elétrico.  $s$  é o inverso da rigidez, o coeficiente piezoelétrico e a permissividade elétrica são dadas por  $d$  e  $\kappa$ , respectivamente. Os sobrescritos  $E$  and  $\sigma$  significam que os parâmetros  $\kappa$  e  $s$  são medidos a tensão e campo elétrico constantes, respectivamente



**Figura 16:** Uma viga piezoelétrica.

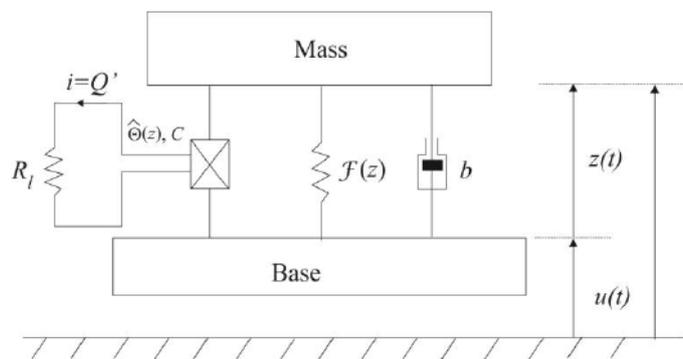
## Capítulo 4

### 4. Metodologia

Neste capítulo abordaremos os métodos para a obtenção dos resultados. O capítulo será dividido em duas partes: Modelo numérico e métodos experimentais. Ao decorrer do capítulo serão abordadas as peculiaridades de cada uma das partes.

#### 4.1 Modelo Numérico

Um modelo simplificado que possa descrever a vibração do sistema piezoelétrico consiste em uma modelo massa, mola, amortecedor, acrescido de um acoplamento eletromecânico, como descrito no capítulo anterior. A parte mecânica do modelo leva em consideração uma massa  $m$ , rigidez não-linear,  $\mathcal{F}(z)$ , que assume diferentes formas levando em consideração a atuação de forças magnéticas, e amortecedor  $b$ . O sistema será submetido à uma oscilação  $u(t)$  e o deslocamento de massa será representado por  $y$ ;  $z$  representa o deslocamento de massa em relação à base. Na figura abaixo,  $R_l$  representa a resistência do circuito elétrico e  $V$  a tensão elétrica através do elemento piezoelétrico. O acoplamento eletromecânico é representado pela letra  $\Theta$  e  $C$  é o capacitor.



**Figura 17:** Modelo do sistema de captação de energia à base de vibração

As equações do sistema podem ser descritas pelas seguintes equações diferenciais acopladas:

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + \mathcal{F}(z) - \Theta V = -m\ddot{u} \quad (3)$$

$$\Theta\dot{z} + C\dot{V} + \frac{1}{R_l}V = 0 \quad (4)$$

onde:  $(\dot{\square}) = \frac{d(\square)}{dt}$

A não linearidade pode ser representada por uma força de restituição do tipo Duffing, e apresenta o seguinte comportamento:

$$\mathcal{F}(z) = \hat{\beta}x + \hat{\alpha}x^3 \quad (5)$$

Os coeficientes  $\hat{\beta}$  e  $\hat{\alpha}$  definem algumas características importantes no sistema. Admitindo-se pequenos deslocamentos e  $\hat{\beta} > 0$  o sistema adota comportamento linear, e o coeficiente  $\hat{\alpha}$  define o comportamento não linear do sistema a medida em que o mesmo sofre maiores deslocamentos. Para  $\hat{\alpha} > 0$  o sistema apresenta um endurecimento. De maneira oposta, para  $\hat{\alpha} < 0$  o sistema apresenta um amolecimento.

A equação de Duffing descreve uma série de fenômenos físicos, dentre os quais pode-se citar a flambagem de uma viga elástica devida a ação de forças magnéticas, conforme o estudo proposto neste trabalho. (SAVI, 2006, p.30).

## 4.2 Adimensionalização

Para a solução dos sistemas propostos, torna-se interessante a adimensionalização das variáveis abordadas. Essa é uma técnica utilizada com o objetivo de facilitar o estudo da influência dos parâmetros no comportamento do sistema.

Serão consideradas novas coordenadas espaciais e elétricas  $x = z/l$  e  $v = V/\hat{V}$  onde  $l$  e  $\hat{V}$  têm dimensões de comprimento e tensão elétrica respectivamente. O tempo adimensional é dado por  $\tau = \omega_0 t$ , sendo considerada a frequência natural do sistema  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  e a excitação harmônica do sistema  $-m\ddot{u} = A\cos(\omega t)$ . Consideraremos  $2\zeta = b/(m\omega_0)$ ,  $\varepsilon = \hat{V}^2 C/k l^2$ ,  $\rho = R_l C \omega_0$ ,  $\bar{\omega} = \omega/\omega_0$ ,  $\alpha = \hat{\alpha} l^2 / m \omega_0^2$ ,  $\beta = \hat{\beta} / m \omega_0^2$ ,  $\phi = (l/C\hat{V})\mu$ ,

$\xi_1 = l\delta_1$ ,  $\xi_2 = l^2\delta_2$  e  $\lambda = \frac{A}{m\omega_0^2 l}$ . Portanto, as equações do movimento do sistema podem ser reescritas, de forma adimensionalizada, como:

$$x'' + 2\zeta x' + f(x) - \varepsilon\phi v = \lambda \cos(\omega\tau) \quad (6)$$

$$\phi x' + v' + v/\rho = 0 \quad (7)$$

sendo:

$$f(x) = \beta x + \alpha x^3 \quad (8)$$

### 4.3 Metodologia Experimental

Foram realizados ensaios experimentais utilizando um *Shaker* Eletromecânico disponível no Laboratório de Tecnologia Submarina (UFRJ). Diferentes ensaios visando o estudo do comportamento do elemento piezoelétrico sob condições lineares (piezoelásticos) e não-lineares (piezomagnetoelásticos) foram explorados. A seguir, faz-se a descrição da montagem experimental e seus procedimentos.

#### 4.3.1 Piezoelásticos

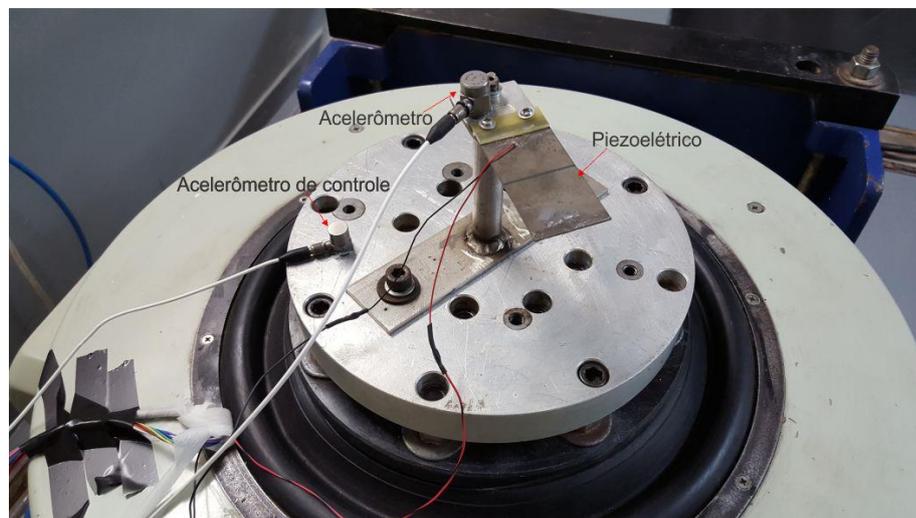
Inicialmente, realizou-se a montagem do aparato experimental que consiste do elemento piezoelétrico sem influência de campo magnético externo, conforme mostram as Figuras 18 e 19. Nestes ensaios, realizou-se uma varredura em frequências com diferentes amplitudes de vibração. O objetivo é a identificação das propriedades lineares fundamentais do conversor piezoelétrico, principalmente da frequência natural, que será de extrema importância para a comparação com o caso não linear.

Também é mostrado na mesma literatura que a excitação senoidal de varredura (uma função senoidal que evolui no tempo com incrementos sucessivos na frequência do sinal)

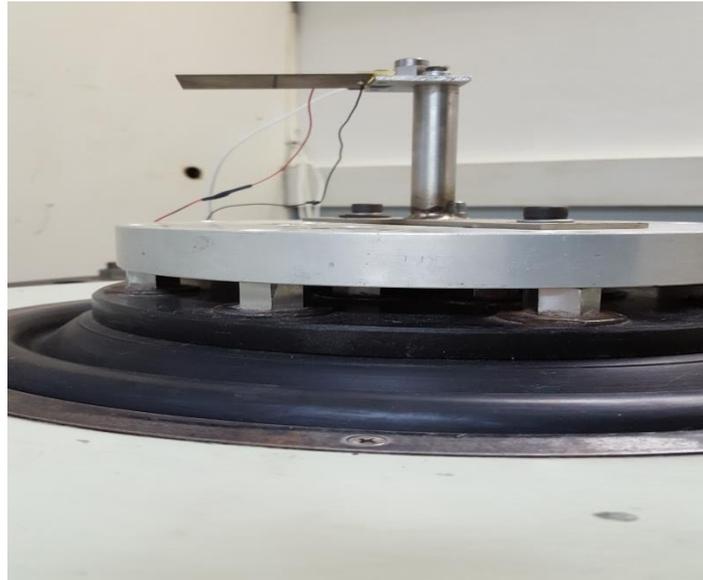
como a mais apropriada para a realização dos ensaios. Existe também a forma de excitação transiente, conhecido como “chirp” senoidal (uma varredura senoidal em um pequeno intervalo de tempo), entretanto optou-se pela varredura senoidal, como método de estímulo ao sistema estudado.

O aparato experimental consta de sistema previamente calibrado e nivelado. Foi utilizado um acelerômetro para a captação, medição e processamento dos dados fornecidos, e um outro acelerômetro para controlar a aceleração realizada pelo Shaker eletromecânico. A montagem do aparato foi realizada com elementos de fixação, que foram usados para fixar a viga piezoelétrica em uma haste, que estava também fixa por parafusos no Shaker. Os dois acelerômetros foram fixados com fita dupla face ao sistema. A Figura 20 mostra o sistema de controle e aquisição. Este sistema é composto por três principais elementos: o amplificador e controlador do Shaker e o sistema de aquisição DL750 da Yokogawa.

Os testes foram realizados com uma varredura de 10Hz à 200Hz (varredura crescente) e de 200Hz à 10Hz (varredura decrescente) e testando três amplitudes de forçamento (0,2 g, 0,5 g, 1,0 g), como dito anteriormente. A frequência de aquisição de dados é de de 100S/s,



**Figura 18:** aparato experimental (vista superior)

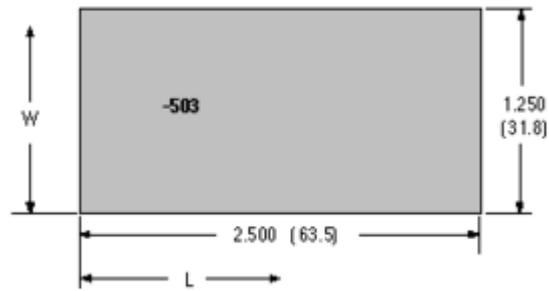


**Figura 19:** *Aparato experimental (vista lateral)*



**Figura 20:** *Sistema de controle e aquisição de dados*

O gerador piezoelétrico utilizado foi fornecido pela Piezo System (<http://www.piezo.com/prodbg1brass.html>) e suas dimensões básicas são mostradas na Figura 21. A Tabela 2 fornece as características geométricas do piezoelétrico utilizado juntamente com as suas propriedades.

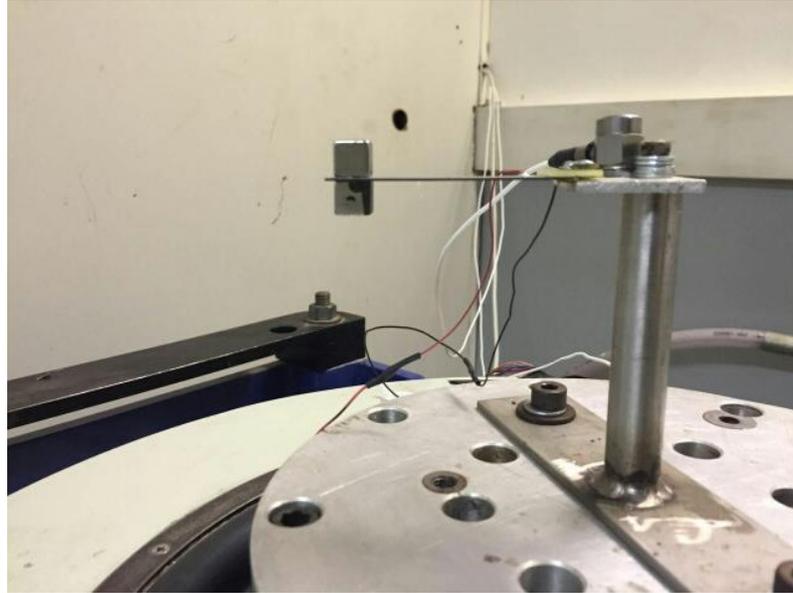


**Figura 21:** Características geométricas do *piezoeletrico* utilizado no experimento.

**Tabela 2:** Características do material do *piezoeletrico*

<b>Modelo 503</b>	
Largura (mm)	31,8
Comprimento (mm)	63,5
Peso (g)	6
Rigidez a flexão (N/m)	160
Frequência Natural (Hz)	63

O outro experimento feito para o caso linear foi muito semelhante ao anterior, a diferença é a adição de duas massas magnéticas na extremidade livre da viga piezoeletrica, como a Figura 22. A adição de dois imãs foi feita para que um imã fixasse o outro na viga. Não tendo nenhum outro imã nas proximidades, o comportamento do dispositivo continuará no limite linear.



**Figura 22:** teste com um corpo de prova na extremidade da viga

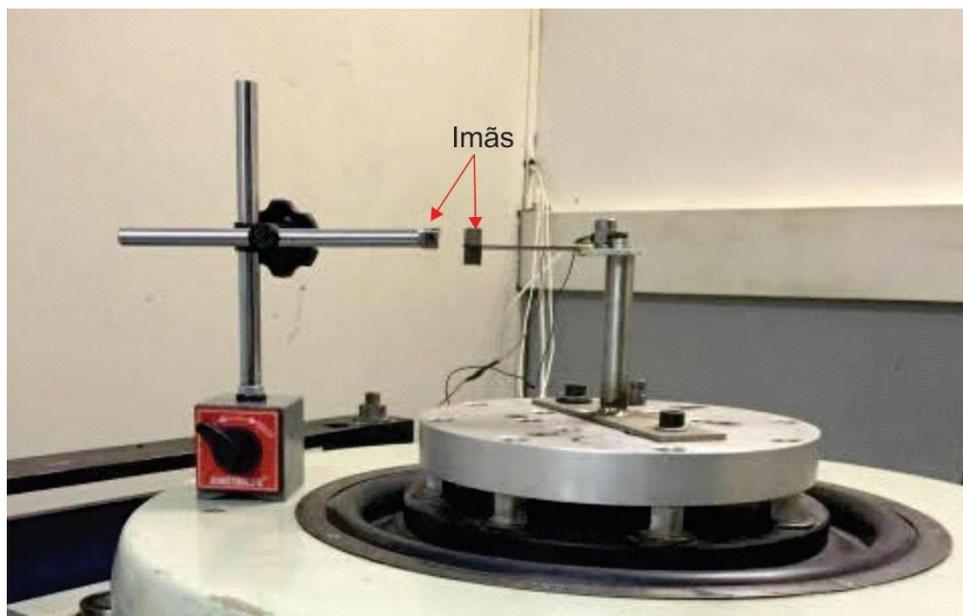
As massas magnéticas são mostradas em mais detalhes na Figura 21. Os ímãs utilizados são de terras raras neodímio-ferro-boro ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ). Esses ímãs são muito poderosos em comparação a sua massa, mas também são mecanicamente frágeis e perdem seu magnetismo de modo irreversível em temperaturas acima de  $120\text{ }^\circ\text{C}$ . As massas magnéticas utilizadas possuem formato cúbico de lados iguais a  $10\text{ mm}$  e com massa de  $6,8\text{ g}$  cada. Para todos os experimentos mostrados a seguir um ímã é sempre fixado na extremidade da viga,



**Figura 23:** Ímãs utilizados nos ensaios

### 4.3.2 Piezomagnetoelásticos

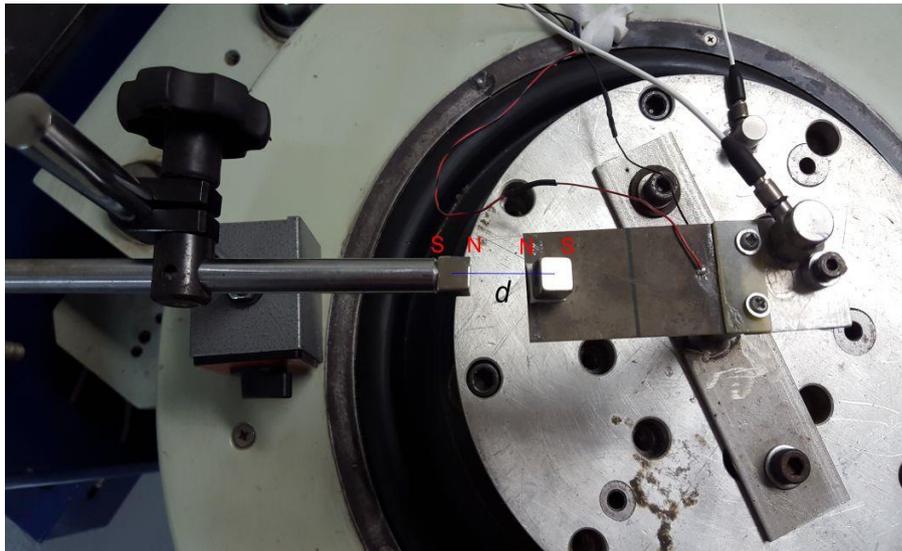
Nessa seção será discutida a metodologia para os experimentos dos casos não lineares. A primeira experiência realizada para esses casos foi o com ímã centralizado, que consiste em apenas adicionar uma nova massa magnética à frente das outras duas, como no experimento anterior, alterando apenas a distância ( $d$ ), que variam de 15 mm, 25 mm e 30 mm, dessa nova massa magnética às outras, como exemplificado na Figura 24. Na Figura 25 pode-se se ver os ímãs estão orientados de uma forma a se obter uma força magnética de atração, já na Figura 26 os ímãs estão orientados para obtenção de uma força magnética repulsão. A amplitude de aceleração utilizada nessa bateria foi de 0,2 g e a varredura nas frequências de 10Hz à 80Hz.



**Figura 24:** *Ímã centralizado nas proximidades da viga piezoelétrica com ímãs adicionados em sua extremidade*



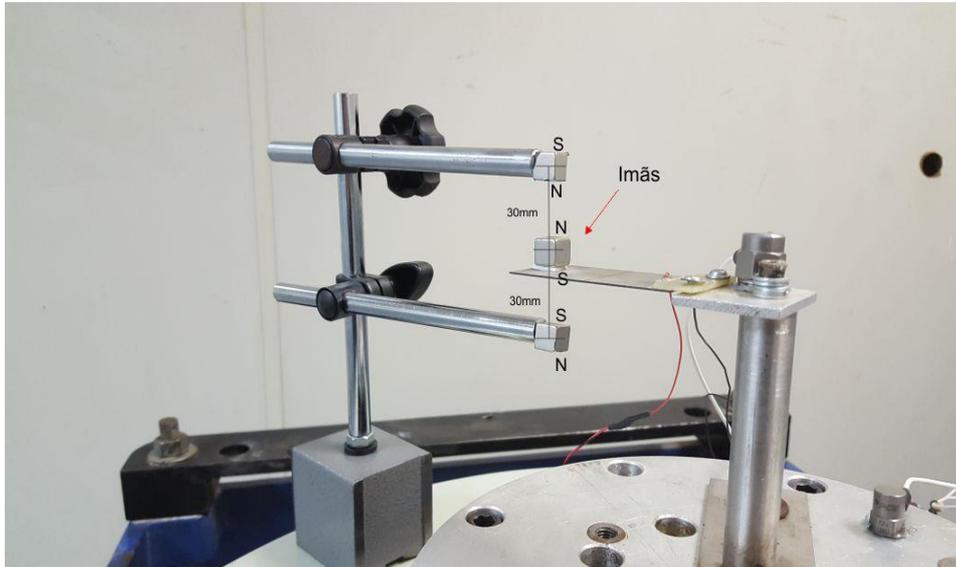
**Figura 25:** Vista superior com a indicação dos polos dos imãs (força magnética repulsiva).



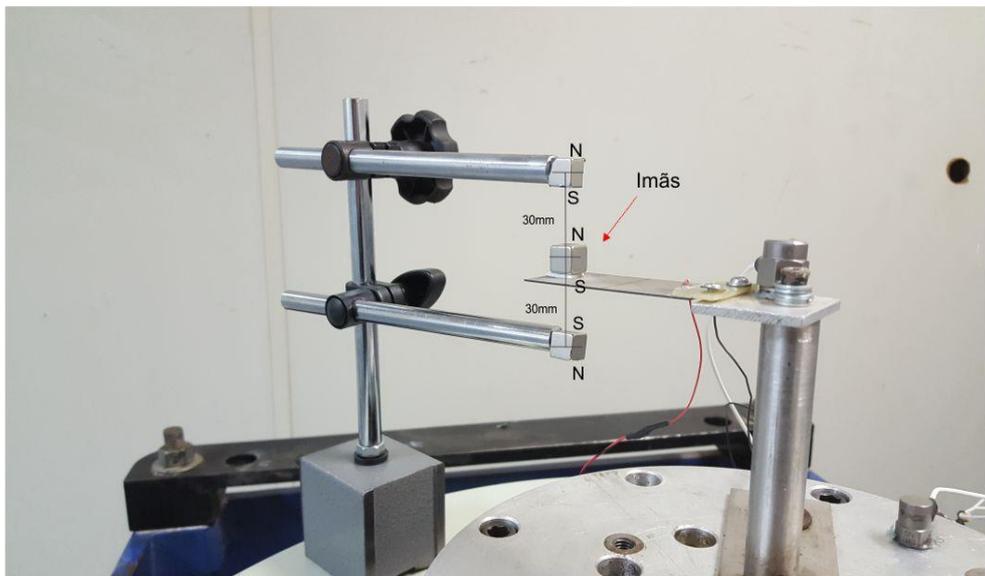
**Figura 26:** Vista superior com a indicação dos polos dos imãs (força magnética repulsiva).

Também foram utilizados outros tipos de arranjos para um melhor estudo sobre como o efeito magnético influencia na tensão elétrica gerada pelo piezelétrico. Foi estudado um novo arranjo, onde as massas magnéticas estão expostas acima e abaixo da viga, alterando as polaridades desses magnetos.

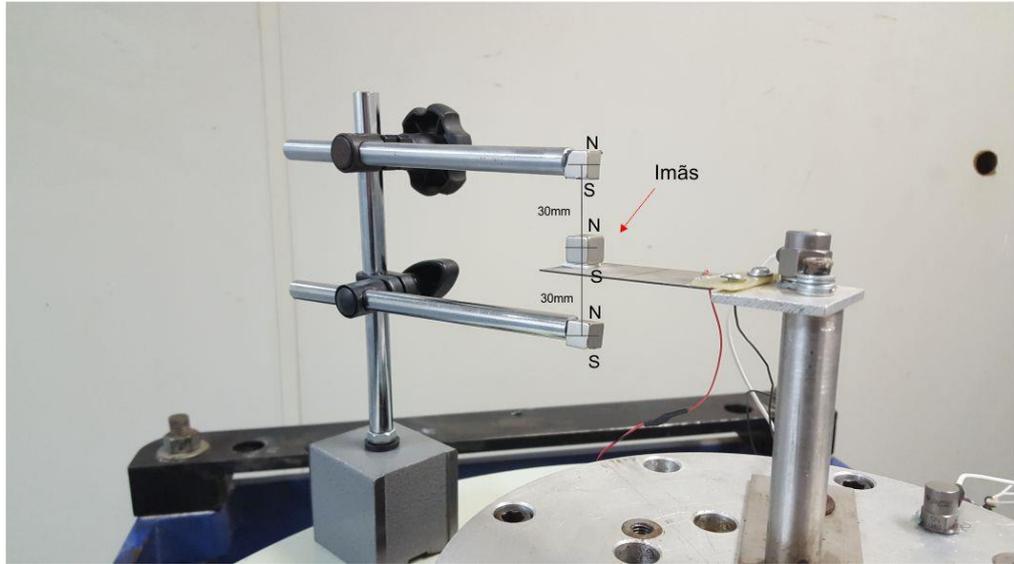
Realizaram-se três arranjos diferentes, cujas as distâncias entre os magnetos foi de 30 mm, que estão exemplificados nas Figuras 27, 28 e 29.



**Figura 27:** arranjo vertical onde há repulsão na parte superior e na parte inferior



**Figura 28:** arranjo vertical onde há atração na parte superior e repulsão na parte inferior



**Figura 29:** *arranjo vertical onde há atração na parte superior e atração na parte inferior*

Há uma diferença significativa nesses arranjos, comparados com os anteriores, que estão nos magnetos acoplados a viga piezelétrica. Nesse teste há apenas um ímã fixado à viga, já nos arranjos anteriores estão fixados 2 ímãs, com o pretexto de um fixar o outro na viga.

## Capítulo 5

### 5. Resultados

O capítulo atual abordará os resultados obtidos no modelo numérico e nos experimentos propostos no capítulo anterior. De início se apresentará as soluções numéricas, e posteriormente as soluções experimentais, com suas respectivas peculiaridades.

#### 5.1 Resultados Numéricos: Piezoelástico versus Piezomagnetoelástico

Como falado anteriormente, este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento de um sistema de geração de energia piezoelétrico sob efeito de um campo magnético, devido ao surgimento de um comportamento não linear. Acredita-se que deste modo possa-se potencializar a geração de energia para diversas frequências.

O objetivo desta seção é justamente comparar gráficos de três dimensões, onde serão consideradas as variáveis de tensão elétrica, velocidade, e tempo, todas adimensionais. As frequências irão variar de 0,5 até 1,0 e será observado o comportamento dos sistemas linear e não linear.

Para a simulação, a próxima tabela trás os valores dos dados imputados.

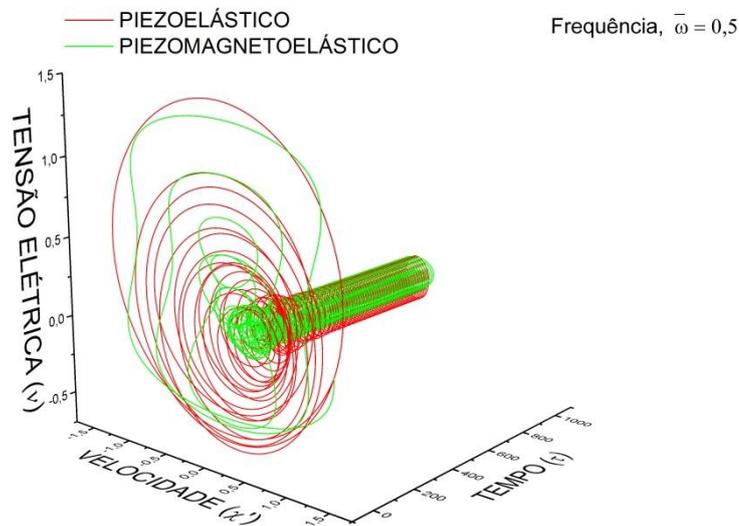
*Tabela 3: Inputs Numéricos*

Parâmetro	Valor
$\zeta$	0,01
$\phi$	0,5
$\varepsilon$	0,1
$\rho$	20
$x(0)$	0
$x'(0)$	1,3
$v(0)$	0
$\lambda$	0,08
$\alpha$	0,5
$\beta$	-0,5

As equações diferenciais (6), (7) e (8) mostradas no capítulo 4 foram integradas numericamente com o uso do integrador Runge-Kutta da 4ª ordem utilizando o software FORTRAN.

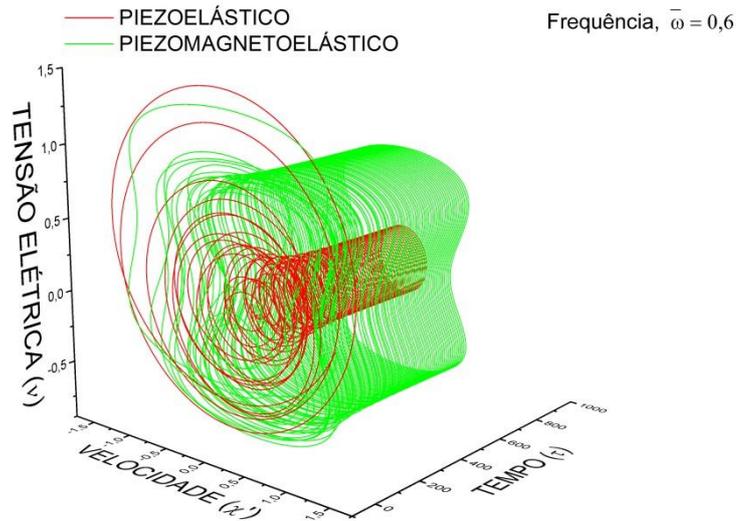
Os gráficos são apresentados comparando os casos linear e não linear, onde a linha vermelha determina o sistema piezoelástico e a linha verde o sistema piezomagnetoelástico.

A figura 30 mostra a variação da tensão elétrica e da velocidade através do tempo para uma frequência de 0,5. Nesta frequência nota-se que a tensão elétrica obtida é similar, tanto para sistemas lineares quanto não lineares. Podemos observar que, inicialmente, o sistema se encontra em regime transiente e em seguida no estado estacionário



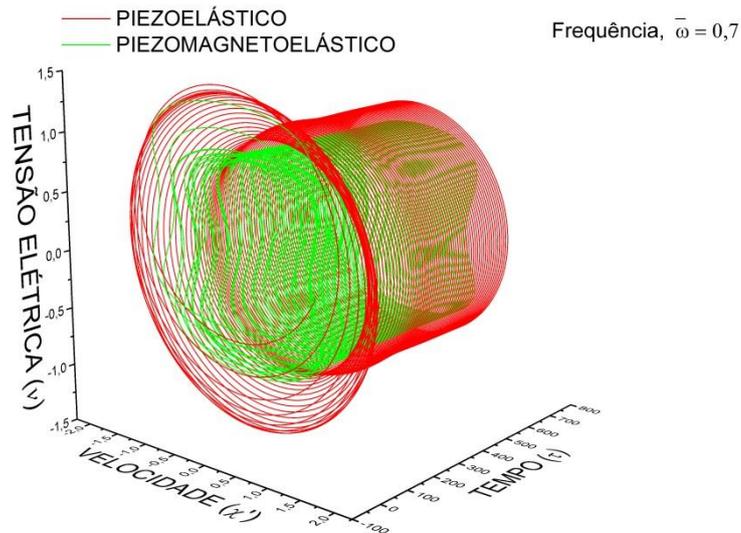
**Figura 30:** *Variação da tensão elétrica e da velocidade através do tempo para uma frequência angular de 0,5.*

O gráfico da figura 31 demonstra que para a frequência de 0,6 a tensão elétrica gerada pelos piezomagnetoelásticos é maior quando comparada à tensão nos piezoelásticos. Pode-se prever, a partir da análise deste gráfico que o início da faixa de frequência ótima do sistema sob ação do campo magnético foi atingido. Cabe agora, a partir da análise do restante das figuras, averiguar se a faixa de frequência ótima é maior para os piezomagnetoelásticos.



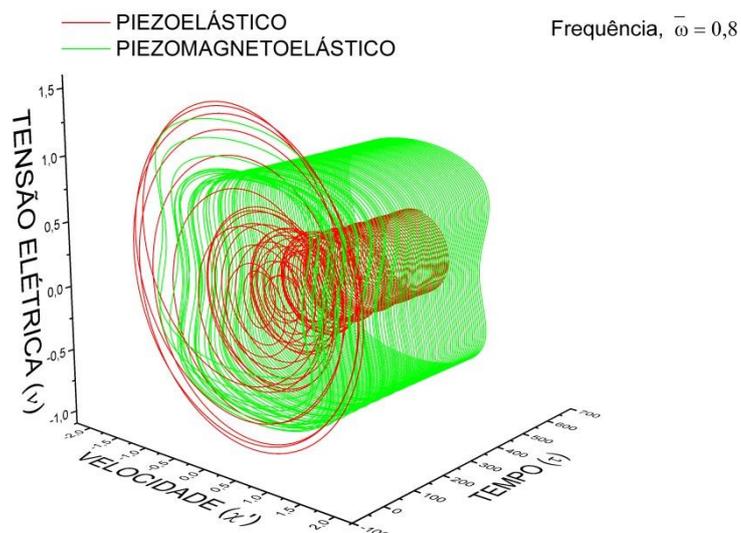
**Figura 31:** *Variação da tensão elétrica e da velocidade através do tempo para uma frequência angular de 0,6.*

A Figura 32 mostra uma tensão elétrica gerada maior para sistemas lineares que os não lineares. A frequência de 0,7 está muito próxima da frequência de ressonância do sistema, o que torna a tensão gerada pelo piezoelástico maior que o piezomagnetoelástico. Podemos notar também, que na faixa de frequência entre 0,6 e 0,7 o sistema piezoelástico está próximo do pico. Podemos deduzir que sua faixa de frequências ótimas para o aproveitamento de maiores tensões é baixa, enquanto que para os piezomagnetoelásticos, a tensão gerada não teve grande variação, fato que indica que as tensões geradas tendem a crescer.



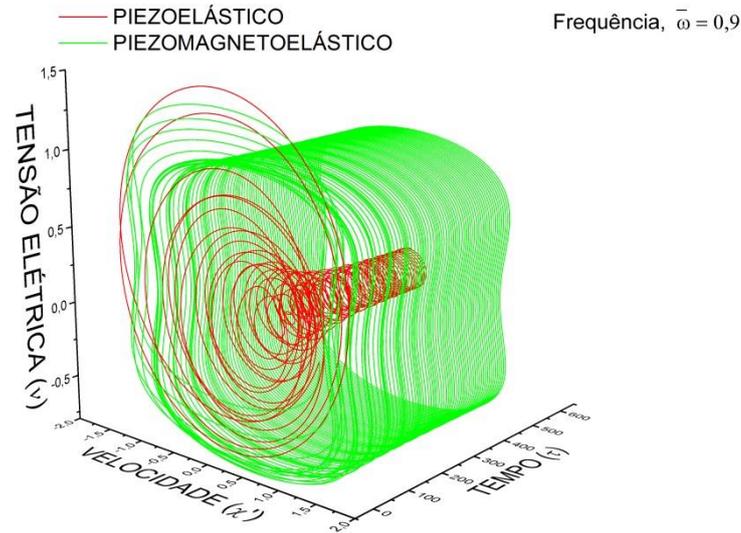
**Figura 32:** *Varição da tensão elétrica e da velocidade através do tempo para uma frequência angular de 0,7.*

A figura 33 apresenta o que foi previsto anteriormente. Podemos notar que o sistema linear sofreu uma queda de tensão elétrica gerada para a frequência de 0,8, enquanto o sistema não linear continua elevando a tensão gerada quando comparado ao gráfico da Figura 32. Quando o sistema piezoelástico se distancia da frequência de ressonância, a tensão gerada cai, evidenciando assim sua diminuta faixa de frequência ótima para geração de tensão, quando comparado ao sistema piezomagnetoelástico.



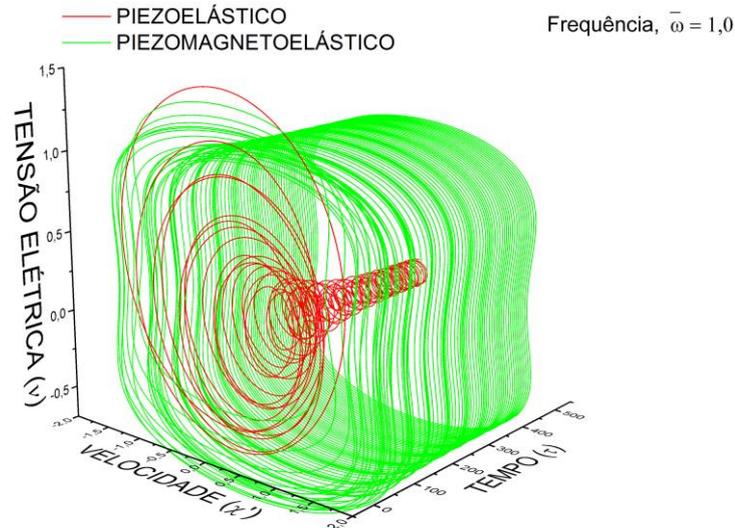
**Figura 33:** *Varição da tensão elétrica e da velocidade através do tempo para uma frequência angular de 0,8.*

A Figura 34 mostra que quanto mais o sistema linear se distancia da frequência de ressonância, menor é sua tensão elétrica gerada. Conforme previsto, para frequência de 0,9, mais uma vez a tensão gerada pelo piezomagnetoelástico é maior. Fica claro que a faixa de frequência ótima do piezomagnetoelástico é maior.



**Figura 34:** *Variação da tensão elétrica e da velocidade através do tempo para uma frequência angular de 0,9.*

Por fim, na Figura 35 o sistema linear assume uma configuração de estados de tensões menor que o sistema linear representado pela Figura 30 enquanto o sistema não linear produz, notavelmente, maiores tensões elétricas. Fica claro, portanto, que apesar do sistema piezoelástico ter produzido um pico de tensões maiores para a frequência de 0,7 as mesmas tiveram grande variação conforme as frequências se distanciavam deste valor. Logo, vale ressaltar que o sistema não linear é mais eficiente para a geração de energia.



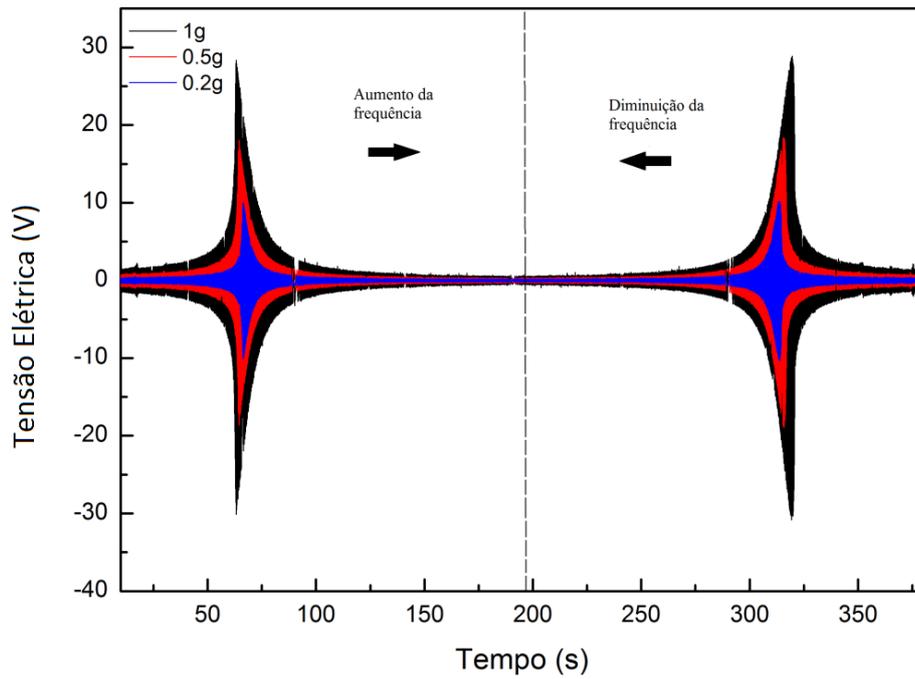
**Figura 35:** *Variação da tensão elétrica e da velocidade através do tempo para uma frequência angular de 1,0.*

Conforme dito acima, o sistema piezomagnetoelástico possui melhor eficiência quando comparado ao piezoelástico. Apesar de notarmos que para uma frequência próxima da frequência de ressonância do sistema linear ( $\omega = 0,7$ ) o mesmo apresentou uma maior tensão de saída em uma faixa maior de frequências.

## 5.2 Análise Experimental Caso Linear

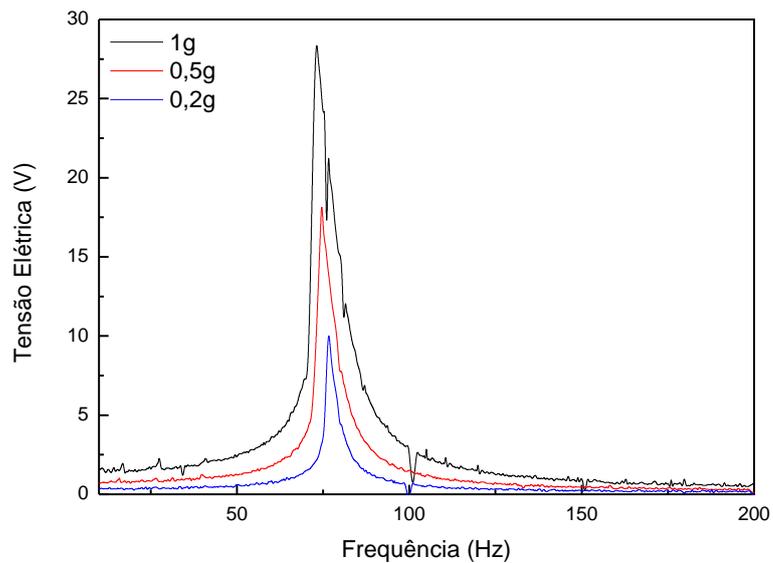
Primeiramente, serão apresentados os casos piezoelásticos em que foram feitos dois tipos de experimentos. Em um primeiro momento foi realizado o experimento sem a adição de massa, ou seja, realizou-se a experiência com apenas a viga piezoelétrica. No segundo caso linear, analisou-se o comportamento do sistema após adicionar duas massas de teste.

Primeiramente o gráfico tensão elétrica *versus* tempo do experimento com o piezoelétrico livre, conforme Figura 36.



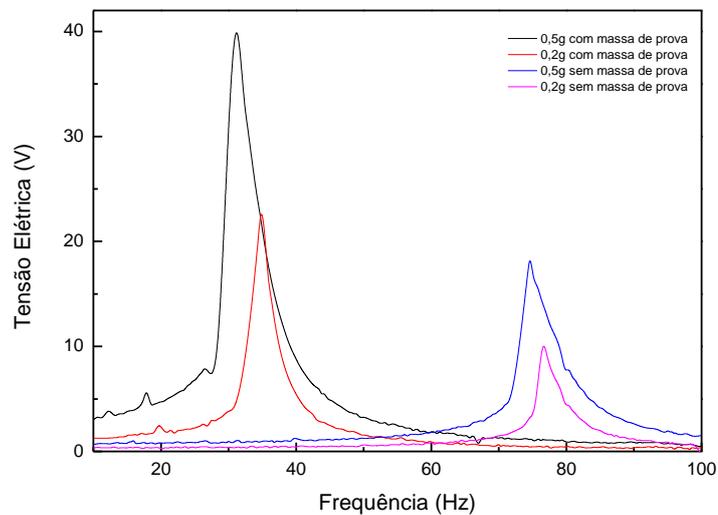
**Figura 36:** gráfico tensão elétrica vs tempo do piezoeletrico livre

Ao variarmos a amplitude de forçamento, percebemos um aumento da tensão elétrica gerada nos resultados da Figura 37. Verificamos também o ponto da frequência de ressonância do sistema, caracterizado pelo pico de tensão em torno de 62Hz.



**Figura 37:** gráfico tensão elétrica vs frequência do piezoeletrico livre

Em um segundo caso, adicionou-se dois corpos de prova (imãs, conforme a Figura 22) na viga piezoelétrica. Foram realizados testes com duas amplitudes de excitação de 0,2 g. e 0,5 g. A Figura 38 mostra os resultados comparativos entre eles. Como esperado, notamos que há um deslocamento dos picos, ou seja, uma mudança em sua frequência de ressonância quando há a adição das massas magnéticas. Outra observação importante é que há um aumento substancial na geração de tensão elétrica na sua frequência natural quando é adicionado os corpos de prova, isso se dá devido ao aumento da flexão da viga piezoelétrica.

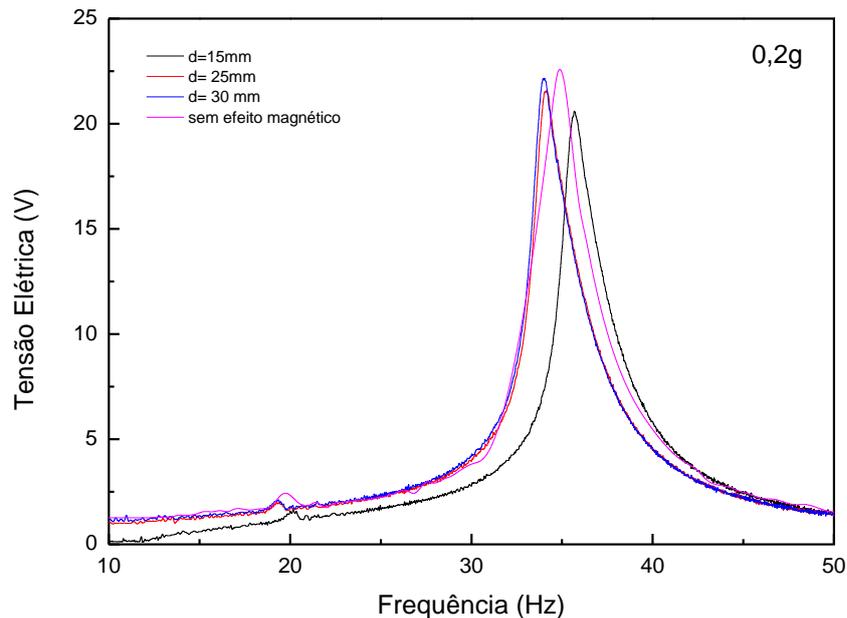


**Figura 38:** gráfico comparativo entre testes com piezoelétrico livre e com a adição de massas magnéticas para duas amplitudes de vibração (0,2 g e 0,5 g).

### 5.3 Análise Experimental: Caso não-linear

Segundo já exposto anteriormente, os ensaios não lineares têm o objetivo de examinar, por meio de uma bateria de testes, o desempenho dinâmico do sistema piezomagnetoelástico, e comparar os efeitos ocasionados pela força magnética externa com os efeitos do caso linear com adição de massa de prova.

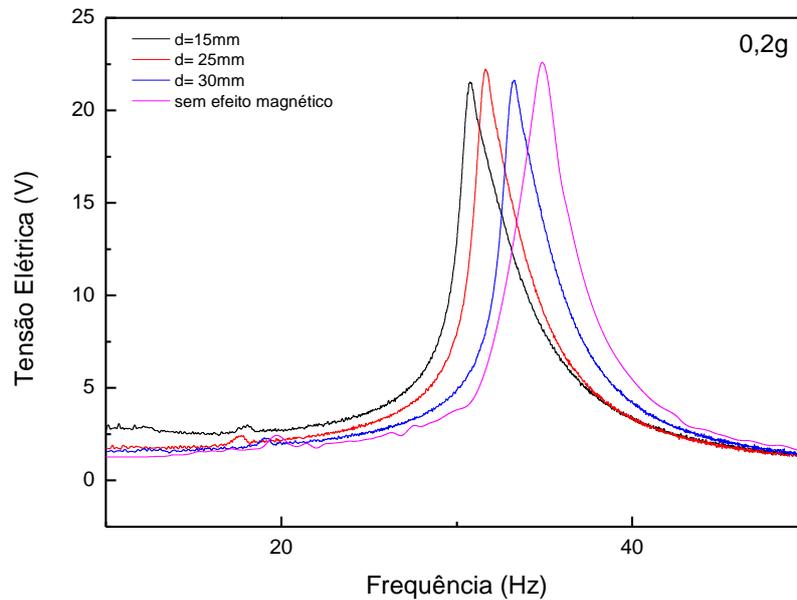
A primeira bateria de testes realizada foi com os imãs realizando atração uns aos outros, segundo como foi descrito no Capítulo 4 (arranjo mostrado na Figura 25). Os resultados põem ser vistos na Figura 39.



**Figura 39:** gráfico comparando os resultados gerados no teste com a atração dos ímãs

Com a menor distância entre os ímãs ( $d=15$  mm) é possível ver que o pico se desloca para maiores frequências (*hardening*) e a tensão gerada é menor que o caso sem magneto nas proximidades da viga (piezoelétrico linear). Neste caso, as forças magnéticas são de atração e agem na viga de modo a reduzir a amplitude de movimento. Já com distâncias maiores vemos que as curvas são bem próximas ao caso linear, logo, o efeito do campo magnético deve estar bem atenuado.

Na segunda bateria de testes, foram realizados os mesmos testes do que o ensaio anterior, apenas mudando a polaridade dos ímãs (arranjo mostrado na Figura 26). Agora espera-se forças magnéticas repulsivas entre os ímãs. A Figura 40 mostra os resultados. Pode-se observar o efeito de amolecimento (*softening*) bem pronunciado quando a distância entre os ímãs diminui, ou seja, é possível ver que os picos se deslocam para valores menores de frequências (*hardening*) em relação ao caso linear. Neste caso, as forças magnéticas são de repulsão e agem na viga de modo a amplificar o movimento da extremidade da viga.

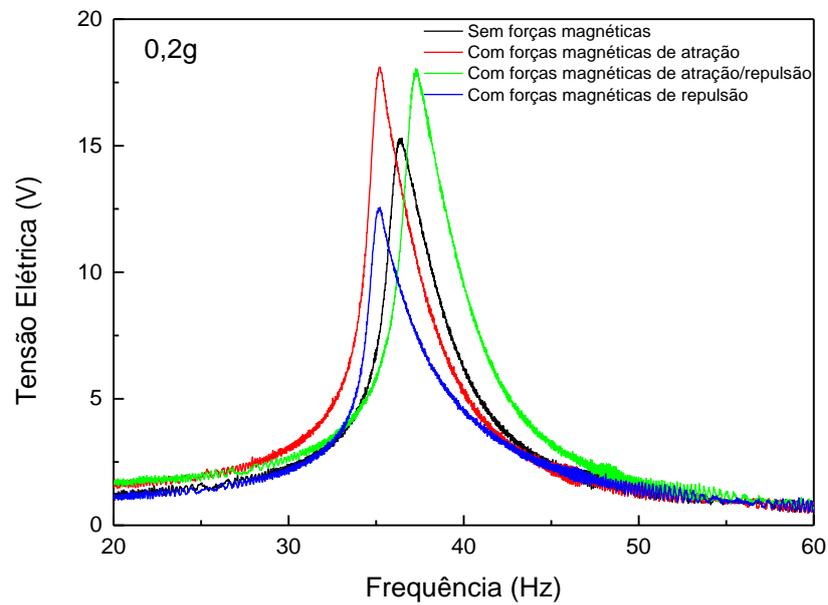


**Figura 40:** gráfico comparando os testes realizados com as massas magnéticas em repulsão

Também foram utilizados outros tipos de arranjos para um melhor estudo sobre como o efeito magnético influencia na geração de tensão do piezelétrico. Foi estudado um novo arranjo, onde as massas magnéticas estão expostas acima e abaixo da viga, alterando as polaridades desses magnetos, modificando a curva gerada da tensão e o modo como o efeito não linear é gerado (arranjos mostrados nas Figuras 27, 28 e 29). A Figura 41 mostra a comparação entre eles e em relação ao piezoelétrico linear. Nesse teste há apenas um ímã fixado à viga, já nos arranjos anteriores estão fixados dois ímãs.

Para a realização desses testes foi utilizada uma taxa de aquisição de dados de 1000 amostras por segundo, uma variação de frequência de 10Hz a 60Hz e uma aceleração de excitação de 0,2g (1,96 m/s<sup>2</sup>).

É possível ver que as forças magnéticas de atração tentem a deslocar o pico para valores maiores de frequência além do aumento considerável da amplitude da tensão elétrica, uma vez que estas forças tendem a amplificar o movimento da extremidade da viga. Quando as forças são de repulsão, pode-se ver que a amplitude do pico decresce, indicando que estas forças não permitem o livre movimento da viga, além disto, o pico se desloca para um valor menor de frequência comparado com a viga piezoelétrica livre. Quando a combinação é atração/repulsão, vemos que a amplitude do movimento aumenta e a frequência de ressonância diminui.



**Figura 41:** Tensão elétrica x frequência com os arranjos verticais.

Com estes resultados é possível ver que o comportamento não linear do conversor piezoelétrico é altamente influenciado pela natureza da força magnética introduzida no sistema, podendo ter ganhos significativos na geração de energia.

## Conclusões

Este trabalho teve como objetivo analisar os efeitos de vibração não lineares, comparando-os com as aproximações lineares. O modelo de não linearidade mecânica é determinado considerando um oscilador tipo *Duffing*. O sistema não linear se mostrou eficiente quando comparados a sistemas lineares em algumas configurações, dependendo da natureza da força magnética. Os resultados numéricos tiveram o intuito de mostrar o comportamento dos sistemas piezoelástico e piezomagnetoelástico. Foi possível ver que com a introdução da não linearidade, em algumas situações, o sistema não linear se mostrou mais eficiente que o linear, uma vez que o mesmo consegue gerar mais energia em uma faixa maior de frequências, o que torna viável a sintonização com vibrações do ambiente. Autores sugerem que o uso de forças magnéticas externas ao sistema, pode levar a dinâmica do sistema ao caos e possibilitando uma extração maior de energia. Também foi observado através das análises experimentais que, dependendo da configuração, os resultados dos piezomagnetoelásticos em relação aos piezoelásticos podem resultar em uma geração de energia maior.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anton, S.R.; Sodano, H.A. A review of Power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006), *Smart Materials and Structures*, v.16, p.R1-R21, 2007.

Beeby, S.P.; Torah, T.N.; Tudor, M.J.; Glynn-Jones, P.; O' Donnell, T.; Saha, C.R.; Roy, S. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, v.17, p 1257-1265, 2007.

Chen, S.N.; Wang, G.J.; Chien, M.C. Analytical modeling of piezoelectric vibration induced micro power generator, *Mechatronics*, v.16, p. 387-397, 2006.

Da Rocha, Téo Lenquist. Modelagem De Estruturas Inteligentes - Ilha Solteira, maio de 2004.

Da Silva, Samuel; Chavarette. Fábio Roberto; Basquerotto, Cláudio Henrique C. C.; Exploiting Nonlinearities And Chaos To Enhance Energy Harvesting System Using Piezoelectric Devices - COBEM, Novembro de 2013.

De Marqui, C.; Erturk, A.; Inman, D.J. An electromechanical Finite Element Model Piezoelectric Energy Harvester Plates, *Journal of Sound and Vibration*, v. 327, p. 9-25, 2009.

De Marqui, Jr. C.; Erturk, A. Electroaeroelastic analysis of airfoil based wind energy harvesting using piezoelectric transduction and electromagnetic induction, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 24, p. 846-854, 2013.

Dietl, J.M.; Garcia, E. Beam Shape Optimization for Power Harvesting, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v.21, p.633-646, 2010.

Du Toit, Noel Eduard. Modeling and Design of a MEMS Piezoelectric Vibration Energy Harvester - Massachusetts Institute of Technology 2005.

Erturk A. and Inman D. J., "Piezoelectric energy harvesting", John Wiley & Sons, 2011.

Erturk, A.; Inman, D.J. Issues in mathematical modeling of piezoelectric energy harvesters, *Smart Materials and Structures*, v. 17, 0650016 (14pp), 2008a.

Erturk, A.; Inman, D.J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations, *Journal of Vibration and Acoustics*, v.18, 025009 (18pp), 2009.

Erturk, A.; Hoffmann, J.; Inman, D.J. “A piezomagnetoelastic structure for broadband vibration energy harvesting”, *Applied Physics Letters*, v.94, p. 254102-254105, 2009.

Erturk, A.; Inman, D.J. Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with eletromechanical coupling, *Journal of Sound and Vibration*, v.330, p.2339-2353, 2011.

Friswell, M.I.; Ali, S.F.; Bilgen, O.; Adhikari, S.; Lees, A.W.; Litak, G. Non-linear piezoelectric vibration energy harvesting from a vertical cantilever beam with tip mass, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v.23(13), p.1505-1521, 2012.

Galayko, D.; Pizarro, R.; Basset, P.; Paracha, A.M.; Amendola, G. MAS modeling of controlled switch for design optimization of capacitive vibration energy harvester, In: *Behavioral Modeling and Simulation Workshop – BMAS*, San Jose, CA, IEEE International, pp. 115 – 120, 2007.

Galhardi, Marcela Antunes. *Guia De Power Harvesting: História, Evolução E Fundamentos - Ilha Solteira*, julho de 2010

Guizetti, M.; Ferrari, V.; Marioli, D.; Zawada, T. Thickness Optimization of a Piezoelectric Converter for Energy Harvesting, *Proceedings of the COMSOL Conference*, Milan, Italy, (5p.), 2009.

Karami, M.A.; Farmer, J.R.; Inman, D.J. Parametrically excited nonlinear piezoelectric compact wind turbine, *Renewable Energy*, v. 50, p. 977-987, 2013.

Kim, J.E.; Kim, Y.Y. Analysis of Piezoelectric Energy Harvesters of a Moderate Aspect Ratio with a distributed Tip Mass, *Journal of Vibration and Acoustics*, v.133, p. 041010-1-16, 2011.

Kim M., Hoegen M., Dugundji J. and Wardle B. L., 2010, "Modeling and experimental verification of proof mass effects on vibration energy harvester performance", *Smart Materials and Structures*, Vol. 19: 045023.

Lagoín, Thiago Galbiati. Utilização de materiais piezelétricos (PZTS) para coleta e armazenamento de energia - Ilha Solteira: [s.n.], 2011; 116 f.; il.

Lagoudas, D., "Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications", Springer, (2008).

Lallart, M.; Guyomar, D.; Richard, C.; Petit, L. Nonlinear optimization of acoustic energy harvesting using piezoelectric devices, *Journal of Acoustical Society of America*, V.128(5), p.2739-2748, 2010.

Leo D.J.; "Engineering Analysis of Smart Material Systems", John Wiley & Sons, 2007.

Liao Y.; Sodano, H. A. Model of a single mode energy harvesting and properties for optimal power generations, *Smart Materials and Structures*, v. 17, 065026 (14pp), 2008.

Lu, F.; Lee, H.P.; Lim. S.P. Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical systems applications, *Smart Material and Structure*, v. 13, p.57-63, 2004.

Makki, Noaman; Pop-Iliev, Remon Piezoceramic benders attached to pneumatic tires use the cyclic deformation of the contact patch to generate energy for onboard electronics, 2011.

Mann, B.P.; Barton, D.A.W.; Owens, B.A.M. Uncertainty in performance for linear and nonlinear energy harvesting strategies, *J. Intell.Mater. Syst. Struct*, DOI: 10.1177/1045389X12439639, 2012.

Mineto, Andreza Tangerino. Geração de energia através da vibração estrutural de dispositivos piezelétricos não lineares, São Carlos, 2013

Nunez-Ameni, Dario. "Windstalk", ADNA, 2010.

PHYSIK INSTRUMENTE. "Fundamentals of piezoelectricity and piezoactuators", disponível em:

<http://www.physikinstrumente.com/en/products/prdetail.php?sortnr=400600.00>.

Priya, S. and Inman, D.J.; "Energy Harvesting Technologies", Springer, 2009.

Ralib A.A.M., Nordin A.N. and Salleh H, "A comparative study on MEMS piezoelectric microgenerators", *Microsystem Technologies*, Vol.16 pp.1673–1681., 2010.

Ramadass, Y.K.; Chandrakasan, A.P. An efficient piezoelectric energy harvesting Interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Piscataway, v. 45, n. 1, p. 189-204, 2010.

Roundy, S. On the effectiveness of vibration-based energy harvesting, *Journal of intelligent Material Systems and Structures*, v.16, p.809-823, 2005.

Savi, Marcelo Amorim; "Dinâmica Não-Linear e Caos", Marcelo Amorim Savi, Rio de Janeiro, E-papers, 2006.

Scruggs, J. T. An optimal stochastic control theory for distributed energy harvesting networks, *Journal of Sound and Vibration*, v. 320, p. 707-725, 2009.

Singeresu, Rao. "Vibrações mecânicas" 4ª edição, 2009.

Souza, Flavilene da Silva. Sistema de extração de potência (*power harvesting*) usando transdutores piezelétricos -- Ilha Solteira: [s.n.], 2011 102 f.: il.

Silva, Luciana L. et.al. On The Nonlinear Behavior Of The Piezoelectric Coupling On Vibration-Based Energy Harvesters, 2015.

Swallow, L.M.; Luo, J.K; Siores E.; Pat, I.; Dodds, D. A piezoelectric fiber composite based energy harvesting device for potential wearable applications. *Smart Materials and Structure*, Bristol, v.17, n.2, p.1-7, 2008.

Tang, L.; Yang, Y.; Soh, C. Improving functionality of vibration energy harvesters using magnets, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v.23(13), p.1433-1449, 2012.