

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

**USO COMBINADO DE MATERIAIS INTELIGENTES PARA  
GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA**

Nilton Maia Gama de Oliveira

Thalles Fioravante Vieira Alves

Vinícius Almeida de Souza

**Rio de Janeiro  
Novembro de 2018**

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

**USO COMBINADO DE MATERIAIS INTELIGENTES PARA  
GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA**

Nilton Maia Gama de Oliveira

Thalles Fioravante Vieira Alves

Vinícius Almeida de Souza

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.<sup>a</sup> Orientadora: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Coorientador: Arthur Adeodato

**Rio de Janeiro  
Novembro de 2018**

## CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

O48 Oliveira, Nilton Maia Gama de  
Uso combinado de materiais inteligentes para geração de  
energia limpa / Nilton Maia Gama de Oliveira, Thalles Fioravante  
Vieira Alves [e] Vinícius Almeida de Souza.—2018.  
67f. + anexo : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.

Bibliografia : f. 64-67

Orientadora : Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Coorientador : Arthur Deodato

1. Engenharia mecânica. 2. Energia elétrica - Cogeração. 3.  
Filtros elétricos de cristal. 4. Análise numérica. I. Alves, Thalles  
Fioravante Vieira. II. Souza, Vinícius Almeida de. III. Monteiro,  
Luciana Loureiro da Silva (Orient.). IV. Deodato, Arthur (Coorient.).  
V. Título.

CDD 621

*Dedicamos este projeto à Deus, primeiramente.*

*Queremos também dedicar esse trabalho aos familiares e amigos, que contribuíram com palavras de motivação e foram compreensivos com os momentos de ausência. Essa vitória também é de vocês.*

## AGRADECIMENTOS

Eu, Nilton, gostaria de agradecer primeiramente a Deus por me capacitar para realizar esse trabalho. Agradeço também a minha família, pois sem eles eu não teria condições de realizar essa faculdade de Engenharia Mecânica. Sou grato por ser cercado de pessoas incríveis que além de me darem um suporte, foram os grandes incentivadores dessa longa e grata jornada que é um curso de Engenharia.

Eu, Thalles, agradeço primeiramente a Deus por todas as bênçãos que tem me dado, sem Ti nada seria. Agradeço aos meus pais, Aramis e Denise, que sempre se esforçaram para me dar o melhor que eles poderiam oferecer, sempre me apoiaram em minhas decisões. Agradeço aos meus familiares, que acompanharam minha trajetória até aqui. Agradeço a minha namorada Aryanne, por ter me apoiado, incentivado e trazendo palavras para me acalmar nessa correria.

Eu, Vinícius, sou grato a muitos colegas e engenheiros, assim como a todas as pessoas generosas que se deram o trabalho de nos ensinar. Sou grato a minha mãe, Maria, meus irmãos, Walter e Bruno. Eles são a minha alegria, apesar de toda a saudade que sinto. Agradeço ao meu pai, que me mostrou que era bom ser diferente e iluminou em mim a disciplina, a caridade e a liberdade. À Deus, que colocou todos estes em nosso caminho.

Agradecemos a professora Luciana Loureiro, orientadora deste projeto, por tamanho suporte durante toda a preparação do mesmo. Um agradecimento mais que especial ao engenheiro doutorando Arthur Adeodato, que nos auxiliou durante todo o projeto, na parte experimental, conceitualmente e nos motivando diariamente.

Não poderíamos deixar de agradecer à todos do LACTM, que sempre foram muito receptivos, em especial ao engenheiro Breno, que nos auxiliou nos testes preliminares e ao engenheiro Daniel, que nos deu um grande suporte na parte de programação em linguagem C.

Obrigado, CEFET/RJ, por ter nos ensinado e preparado para o futuro que enfrentaremos.

## RESUMO

A geração de energia limpa é um tema bastante atraente, não somente devido à questão ambiental, mas também pela tendência crescente de empresas interessadas em investir no mercado de energia renovável, o que torna a pesquisa cada vez mais aplicada. Este estudo tem como objetivo incrementar o conhecimento de formas de geração através de materiais inteligentes, que podem se tornar produtos viáveis economicamente. O foco deste trabalho é a conversão de vibração em energia elétrica com a utilização de elementos piezelétricos. 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. O efeito combinado de materiais piezelétricos com ligas com memória de forma, do inglês *Shape Memory Alloys* (SMAs), vem de encontro com a necessidade de aumentar a faixa de operação do sistema de geração de energia utilizando os efeitos de memória de forma e pseudoelasticidade. As SMAs apresentam efeitos histeréticos e mudanças nas propriedades devido às transformações de fase sofridas. Estas mudanças podem alterar a dinâmica do sistema permitindo a adaptação e sintonização com as frequências de excitação. Para este fim, análises numéricas e ensaios experimentais serão realizados para comprovar a viabilidade do sistema.

Palavras-chaves: geração de energia; material piezelétrico; ligas com memória de forma; análise experimental; análise numérica.

## **ABSTRACT**

The Energy Harvesting is a very attractive subject, not only due to the environmental problems, but also because there is an increasing trend of companies interested in investing at renewable energy market, which makes research more applied. This study aims to increase knowledge of generation forms through intelligent materials, which can become economically viable products. The focus of this research is the conversion of vibration into electric energy by using piezoelectric elements. The current case is an energy flow monitoring system that can be used in an excitation frequency range, modifying to available sources in the environment. The combined effect of Shape Memory Alloys (SMAs) and piezoelectric materials come with the necessity to increase the operation range of the power generation system using shape memory and pseudoelastic effects. SMAs present hysteretic effects and changes in properties due to the phase transformations. These changes can change the dynamic system, allowing the adaptation and tuning with the excitation frequencies. For this purpose, numerical analyzes and experimental tests will be performed to prove the feasibility of the system.

Key-words: energy harvesting; piezoelectric material; shape memory alloy; experimental analysis; numerical analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Instalação Mundial acumulada de energia fotovoltaica até 2015. Source: IHS and PSE AG 2016 .....	6
Figura 2 - Custo médio global por MWh negociado em leilões eólicos onshore e fotovoltaico. Source: IRENA 2017; Acesso: REN21 .....	7
Figura 3- Conjunto de equipamento de uma turbina eólica (ENERGY.GOV, 2018).....	8
Figura 4 - As maiores plantas de energia maremotriz em operação no mundo (NASCIMENTO, 2017). .....	11
Figura 5 - Esquema de um gerador piezelétrico de energia a partir de vibrações mecânicas (ERTRUK, et al., 2011).....	12
Figura 6 - Comparação de densidade de potência por voltagem de alguns materiais (ERTURK e INMAN, 2011). .....	14
Figura 7 - Diagrama do protótipo do coletor de energia piezelétrico com motores de combustão interna. (KIM,2014) .....	14
Figura 8 - Fios de Ligas de Memória de forma combinado com efeito piezelétrico. Adaptado de (ZAKHAROV, et al., 2012).....	16
Figura 9 - Dispositivo para geração de energia envolvendo elemento piezelétrico e memória de forma. (SILVA, et al., 2015).....	17
Figura 10 - Potência máxima gerada versus frequência de oscilação. Comparação de um modelo apenas com elemento piezelétrico e outros com memória de forma variando a temperatura ( $\zeta = 0,001$ ). (SILVA, et al., 2015) .....	18
Figura 11 - (a) Potência máxima gerada x frequência de oscilação. Comparação entre o modelo clássico e modelos com SMA para diferentes temperaturas ( $\zeta=0,005$ ). (b) Curvas tensão-deformação em diferentes temperaturas para um valor de frequência angular adimensionalizadas ( $\omega$ ). (SILVA, et al., 2015).....	19
Figura 12 - (a) Potência máxima gerada x frequência. Comparação entre o modelo clássico e modelos com SMA para diferentes temperaturas ( $\zeta = 0.025$ ). (b) Curvas tensão-deformação em diferentes temperaturas para um valor de frequência angular adimensionalizada ( $\omega$ ). (SILVA, et al., 2015).....	20
Figura 13 - Característica dos efeitos de mudança de forma. (JARONIE et al, 2013).....	22
Figura 14 - Diagrama Tensão-deformação-temperatura exibindo o efeito de memória de forma para uma típica liga SMA Ni-Ti, (LAGOUDAS, 2008). .....	23
Figura 15 - Típico carregamento cíclico pseudoelástico em uma liga Ni-Ti (Lagoudas,2008). .....	24
Figura 16 Tensão x Deformação (LEO, D.J, 2007).....	25



Figura 17 – Efeito direto. Relação entre tensão mecânica e aumento no deslocamento elétrico. (LEO, D.J, 2007) .....	26
Figura 18- Efeito inverso. Relação entre campo elétrico e deslocamento elétrico. (LEO, 2007) .....	27
Figura 19 - Relação entre campo elétrico e tensão. (LEO, D.J, 2017) .....	28
Figura 20 - (A) Orientação aleatória (B) Polarização m campo elétrico constante (C) Polarização depois da remoção do campo elétrico. (Yang et al, 2018).....	29
Figura 21 - Placa Piezelétrica (RALIB, 2010) .....	30
Figura 22 - Ilustração dos modos d31 e d33. (Yang et al, 2018) .....	30
Figura 23- Estrutura de um cristal martensítico e austenítico (FALK, 1980). .....	32
Figura 24 - Curva Energia Livre x Deformação para $T=283\text{ K}$ .....	34
Figura 25 - Curva Energia Livre x Deformação para $T=298\text{ K}$ .....	34
Figura 26- Curva Energia Livre x Deformação para $T=323\text{ K}$ .....	35
Figura 27- Tensão x Deformação para (a) $T=283\text{K}$ (b) $T=298\text{K}$ (c) $T=323\text{K}$ .....	36
Figura 28- Modelo de geração de energia. ....	37
Figura 29 – Deslocamento x frequência : sem SMA e com SMA em cinco temperaturas $283\text{ K}$ ( $T < TM$ ) , $293\text{ K}$ ( $TM < T < TA$ ), $303\text{ K}$ ( $TM < T < TA$ ), $333\text{K}$ ( $T > TA$ ) e $363\text{ K}$ ( $T > TA$ ).....	39
Figura 30— Potência elétrica em função da frequência : sem SMA e com SMA em cinco temperaturas $283\text{ K}$ ( $T < TM$ ) , $293\text{ K}$ ( $TM < T < TA$ ), $303\text{ K}$ ( $TM < T < TA$ ), $333\text{K}$ ( $T > TA$ ) e $363\text{ K}$ ( $T > TA$ ). .....	39
Figura 31- Esquema final do experimento .....	41
Figura 32 - Montagem do Experimento. ....	41
Figura 33 - Shaker modelo V350 e o sistema de controle de vibrações.....	42
Figura 34 – Sistema de aquisição de dados National Instruments. ....	43
Figura 35 – Elemento piezelétrico utilizado. MEAS – Modelo LDT0-028K. ....	43
Figura 36 – Elemento piezelétrico utilizado. MEAS – Modelo LDT0-028K. (Datasheet da TE Connectivity Ltd. Family of companies, 2015). ....	44
Figura 37 - Transdutores de posição tipo laser: Laser 1 - 50 mm e Laser 2 – 100 mm. ....	44
Figura 38 – Célula de carga. Líder Balanças – modelo CS 20.....	45
Figura 39 - Mola SMA Flexinol.....	46
Figura 40- Fonte TOELLNER TOE 8951 .....	47

Figura 41- Ensaio de tração com mola em: 0,0A; (b) Mola à 0,5 A (c)Mola à 1,5 A (d) 2,5 A. .....	50
Figura 42 – Ensaio dinâmico variando a taxa de avanço de frequência de excitação. ....	51
Figura 43 – Ensaio dinâmico na frequência de ressonância e variando a amplitude de deslocamento da base. ....	52
Figura 44 – Diagrama Tensão Elétrica x Frequência com amplitude de deslocamento de base 0,1 mm. ....	53
Figura 45 – Diagrama Deslocamento Extremidade x Frequência com amplitude de deslocamento 0,1 mm.....	54
Figura 46 – Diagrama Força x Deslocamento Extremidade com amplitude de deslocamento 0,1 mm.....	55
Figura 47 – Diagrama Tensão Elétrica x Frequência com amplitude de deslocamento 1,5 mm .....	56
Figura 48- Diagrama Deslocamento Extremidade x Frequência com amplitude de deslocamento 1,5 mm.....	57
Figura 49 – Diagrama Força x Deslocamento Extremidade com amplitude de 1,5 mm.....	58
Figura 50 – Comparação das envoltórias do sistema com e sem o Efeito Memória de Forma. .....	59
Figura 51 – Comparação da faixa de frequência: Viga piezo e Viga Piezo Mola (Efeito Memória de Forma). Altura média da altura máxima da curva.....	60
Figura 52 - Comparação da faixa de frequência: Viga piezo e Viga Piezo Mola Efeito Memória de Forma. 75% da altura máxima da curva.....	61
Figura 53 – Shaker V350 -Data Physics.....	68
Figura 54 – Ilustração do Shaker.....	68

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Países com maior capacidade instalada de Geração de energia limpa em 2016 (PEG, 2016).....	4
<b>Tabela 2</b> - Materiais piezelétricos e suas propriedades .....	31
<b>Tabela 3</b> – Parâmetros empregados no modelo (Kim et al., 2010) e (Paiva e Savi, 2005). ....	38
<b>Tabela 4</b> – Propriedades da mola SMA com estrutura martensítica.....	46
<b>Tabela 5</b> – Temperaturas de Transformação de fase da mola de memória de forma. Fonte: ADEODATO (2017) .....	46
<b>Tabela 6</b> -Tabela com a rigidez média da mola encontrada nos testes com amplitude de deslocamento de 0,1 mm .....	55
<b>Tabela 7</b> – Comparação da rigidez média da mola com amplitude de 1,5mm e 0,1mm.....	58

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $a$  – Constante positiva do modelo de Falk referente ao material SMA  
 $A$  – Austenita  
 $A_f$  – Temperatura final de transformação para a fase austenítica  
 $A_s$  – Temperatura inicial de transformação para a fase austenítica  
 $A_{SMA}$  – Área da seção reta do elemento de SMA  
 $b$  – Constante positiva do modelo de Falk referente ao material SMA  
 $C$  - Capacitor  
 $d$  – Diâmetro do fio da mola  
 $D$  – Diâmetro da espira  
 $F$  – Força de cisalhamento  
 $f$  – Frequência  
 $k$  – Rigidez da mola  
 $m$  – Massa (modelo 1GDL)  
 $M^d$  – Martensita não-maclada  
 $M_f$  – Temperatura final de transformação para a fase martensítica  
 $M_s$  – Temperatura inicial de transformação para a fase martensítica  
 $M^t$  – Martensita maclada  
 $M$  – Martensita  
 $M^-$  – Martensita não maclada induzida por compressão  
 $M^+$  – Martensita não maclada induzida por tração  
 $\sigma_f$  – Tensão final da transformação de  $M^t$  para  $M^d$   
 $\sigma_f^{AM}$  – Tensão final da transformação  $A \rightarrow M$   
 $\sigma_f^{MA}$  – Tensão final da transformação  $M \rightarrow A$   
 $\sigma_s$  – Tensão inicial da transformação de  $M^t$  para  $M^d$   
 $\sigma_s^{AM}$  – Tensão inicial da transformação  $A \rightarrow M$   
 $\sigma_s^{MA}$  – Tensão inicial da transformação  $M \rightarrow A$   
 $\sigma_{ult}$  – Tensão última de ruptura  
 $P$  – Potência  
 $R$  - Resistência elétrica

$t$  – Tempo

$T$  – Temperatura

$T_A$  – Temperatura a qual acima se tem a fase austenita estável (modelo de Falk)

$T_M$  – Temperatura a qual abaixo se tem a fase martensita estável (modelo de Falk)

$u$  – deslocamento da base (modelo 1GDL)  $\sigma$  – Tensão

$V$  – Tensão elétrica

$W$  – Energia Livre

$x$  – deslocamento relativo entre a base e a massa (modelo 1GDL)

$\gamma$  – Amortecimento viscoso linear (modelo 1GDL)

$\delta$  – Amplitude da aceleração de vibração

$\omega$  – Frequência angular

$\theta$  – Acoplamento eletromecânico

$\varepsilon$  – Deformação

$\Delta f_L$  – Largura de banda do dispositivo linear

$\Delta f_{NL}$  – Largura de banda do dispositivo não linear

## SUMÁRIO

Capítulo 1 .....	1
Introdução .....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Justificativa .....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.4 Organização do Projeto .....	2
Capítulo 2 .....	3
Revisão Bibliográfica .....	3
2.1 Energia Limpa .....	4
2.1.1 Energia Eólica .....	7
2.1.2 Energia das marés .....	10
2.2 Geração de Energia por Piezelétricos .....	11
2.2.1 Geradores Piezelétricos Lineares .....	13
2.2.2 Geradores piezelétricos não lineares .....	16
Capítulo 3 .....	21
Fundamentação Teórica .....	21
3.1 Ligas com Memória de Forma .....	21
3.2 Material Piezelétrico .....	24
3.2.1 Efeito Direto .....	25
3.2.2 Efeito Inverso .....	27
3.2.3 Fabricação .....	28
3.2.4 Modos de Operação .....	29
Capítulo 4 .....	32
Modelos .....	32
4.1 Modelo Polinomial para SMA – Falk .....	32
4.2 Modelo de Geração de Energia com Piezelétrico Acoplado a um Elemento SMA .....	36
Capítulo 5 .....	40
Metodologia Experimental e Resultados de Caracterização .....	40
5.1 Equipamento Utilizados .....	40
5.1.1 Equipamento de Excitação de Vibração Mecânica – <i>Shaker</i> .....	42
5.1.2 Sistema de aquisição de dados National Instruments .....	43

5.1.3 Sensor Piezométrico .....	43
5.1.5 Célula de Carga .....	45
5.1.6 Mola de SMA .....	45
5.1.7 Fonte de corrente elétrica .....	47
5.2 Ensaio de Caracterização Mecânica da Mola SMA.....	47
5.2.1 Ensaio de Tração.....	48
5.2.2 Ensaio Dinâmico com Extremidade Livre .....	50
5.3 Ensaio Dinâmico com mola de SMA na extremidade.....	52
5.3.1. Resultados para Amplitude de deslocamento da base de 0,1 mm.....	53
5.3.2. Resultados para Amplitude de deslocamento da base de 1,5 mm.....	56
Capítulo 6 – Considerações Finais .....	62
6.1 Conclusões.....	62
Referências Bibliográficas.....	64
ANEXO A – Desenho do Shaker .....	68

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

O interesse acadêmico pela energia renovável está aumentando, pois, empresas dos diversos setores estão investindo cada vez mais na geração de energia renovável, seja por motivos ambientais, visualização da marca ou pelo simples fato de quererem tomar a frente da inovação tecnológica de uma nova era, com foco em conceitos sustentáveis, ambientais e econômicos.

A conversão de vibração em energia elétrica é uma das formas amplamente estudadas com a utilização de elementos piezelétricos. 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. O efeito combinado de materiais piezelétricos com ligas com memória de forma, do inglês *Shape Memory Alloys* (SMAs), vem de encontro com a necessidade de aumentar a faixa de operação do sistema de geração de energia utilizando os efeitos de memória de forma e pseudoelasticidade.

### 1.2 Justificativa

A colheita de energia baseada em vibrações utilizando elementos piezelétricos tem despertado grande interesse nas mais variadas áreas. O grande desafio atual é melhorar o desempenho dos sistemas de geração de energia para viabilizar uma maior variedade de aplicações. Neste sentido, a escolha pela geração de energia limpa com uso combinado de piezelétricos e materiais com memória de forma tem se mostrado bastante viável em trabalhos anteriores como em SILVA *et al* (2015) e ADEODATO (2017). Os piezelétricos são materiais bastante conhecidos e utilizados como sensores e atuadores, o uso desses materiais para geração de energia é bastante recente e vem ganhando atenção de diversos grupos de pesquisa pela grande possibilidade de aplicações nas mais diferentes áreas. Os materiais com memória de forma também são aplicados em diferentes áreas como atuadores, porém o uso combinado desses materiais vem sendo pouco explorado na literatura, devido à complexidade dos fenômenos, o que torna este trabalho um desafio. Também é de extrema importância que o



tema geração de energia limpa seja abordado, por ser um tema muito aplicado à engenharia em geral.

### 1.3 Objetivos

O estudo tem o intuito de analisar o uso sinérgico de dois materiais inteligentes, para verificar como se comportam mediante a variação da frequência natural dos sistemas. Comprovando assim, a possibilidade de aumentar a banda de frequência ótima do sistema para geração de energia limpa, criando um dispositivo banda larga. Para tal, montou-se um experimento envolvendo um elemento piezolétrico comercial acoplado a uma viga de alumínio engastada a um equipamento de excitação eletromecânico (*shaker*) em uma de suas extremidades e um elemento SMA.

### 1.4 Organização do Projeto

Este trabalho se apoia basicamente em dois comportamentos principais: O efeito piezolétrico direto e os efeitos encontrados nas ligas com memória de forma. Inicialmente, apresenta-se uma revisão bibliográfica envolvendo alguns dos principais trabalhos publicados de modo a fornecer base teórica para avaliar a viabilidade do projeto. Continuando, apresenta-se os respectivos efeitos com mais detalhes através de uma fundamentação teórica. Em seguida, apresenta-se o modelo constitutivo de memória de forma e o modelo de colheita de energia, bem como os resultados numéricos. Em seguida, apresenta-se o aparato experimental utilizado, a montagem do experimento, sua execução e resultados. Por fim, apresenta-se as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

Pela teoria mais aceita, o combustível fóssil é produzido a partir de materiais orgânicos enterrados em depósitos geológicos, este tipo de fonte energética é formado a partir de plantas decompostas e animais que foram convertidos em petróleo bruto, carvão, gás natural ou óleos pesados por exposição ao calor e pressão na crosta terrestre durante centenas de milhões de anos. Apesar dessa concepção, uma pesquisa europeia prova que matéria orgânica de animais e plantas não são necessários para gerar petróleo bruto e gás natural. (KUTCHEROV, 2009).

A utilização desses combustíveis permitiu o desenvolvimento industrial em grande escala e suplantou largamente outras fontes. Apesar de sua importância, a queima desses hidrocarbonetos é a maior fonte de emissões de gases efeito estufa (GEE) pelos seres humanos, o que contribui para o aquecimento global (AMBIENTE, 2018).

Além de todos os impactos citados, a taxa de consumo de combustíveis fósseis ultrapassa sua taxa de reposição natural, e, apesar das novas descobertas de campos offshore, considera-se combustíveis fósseis uma fonte não renovável de energia.

A partir disso, foi necessário o desenvolvimento e aprimoramento de fontes de geração de energia renovável. A alta nos preços do barril de petróleo, as necessidades das nações em diversificar suas matrizes energéticas e a questão de segurança viabilizam o desenvolvimento desse tipo de projeto. Como foi exposto em *The Quest* (YERGIN, 2013). É interessante notar que algumas destas tecnologias já foram usadas no passado da humanidade, como o moinho de vento.

Neste item é discutido as principais pesquisas e suas conclusões que serviram de base e apoiam o desenvolvimento do projeto do uso combinado de materiais inteligentes para geração de energia limpa.

## 2.1 Energia Limpa

Energia limpa ou renovável é aquela que durante seu processo de produção ou consumo, apresentam pouco ou nenhum impacto sobre a natureza, que não interferem na poluição em nível global. (SILVA, 2011)

Como vantagens sociais, na área de políticas públicas, tem-se uma maior geração de empregos diretos em relação aos empregos provenientes de energias não renováveis, vale ressaltar que os salários daquela mão-de-obra são menores, porém em maior quantidade (GUARDABASSI, 2006), vide o caso do crescimento empregatício recente no oeste dos EUA com a energia eólica e solar. Não obstante, o efeito geral dessa mudança na economia por meio de mudanças nos preços da energia, poderia impactar o emprego indireto em quase todas as indústrias.

Dados do instituto americano *Pew Environment Group*, mostram os investimentos em 2016 com relação às energias limpas, conforme Tabela 1. A China lidera com 133 GW, com um investimento de U\$\$ 45 bilhões no ano de 2015. O Brasil ocupa o nono lugar com capacidade total de 15 GW. Em 2011, o Brasil estava na décima posição, mostrando que tiveram investimentos com o decorrer do tempo.

**Tabela 1** - Países com maior capacidade instalada de Geração de energia limpa em 2016 (PEG, 2016).

Ranking em 2016	Países	Capacidade Máxima (GW)
1	China	133 GW
2	Estados Unidos	93 GW
3	Alemanha	61 GW
4	Espanha	32 GW
5	Itália	28 GW
6	Japão	25 GW
7	Índia	22 GW
8	França	18 GW
9	Brasil	15 GW
10	Reino Unido	10,7 GW

É notório o investimento que muitos países vêm fazendo em energia limpa, para diminuição de emissão de gases poluentes, e principalmente, na busca para a diversificação da sua matriz energética, fazendo com que os estudos nessa linha de pesquisa aumentem possibilitando novos avanços.

Como exemplos de energia limpa pode-se citar a energia solar, eólica, das marés, biomassa, biocombustíveis, entre outras. Algumas dessas serão apresentadas no decorrer do texto.

### 2.1.1 Energia Solar Fotovoltaica

Segundo IMHOFF (2007), a energia solar fotovoltaica é aquela gerada através da transformação direta da radiação solar em eletricidade através de um dispositivo denominado célula fotovoltaica.

MACHADO e MIRANDA (2015) discorrem sobre as células de película fina, chamadas células de segunda geração e as de terceira geração. Expõem também entre outras coisas que o Brasil possui altos níveis de radiação solar e uma das maiores reservas de quartzo. Desde 2012, após a Resolução nº 482 da ANEEL, um usuário pode injetar eletricidade na rede elétrica brasileira se a energia for produzida por fontes renováveis como a solar.

Segundo ESPÓSITO e FUCHS (2013), é uma questão de tempo para que as tecnologias de energia solar se tornem de fato competitivas, sem subsídios, não somente para aplicações em geração distribuída, mas também em projetos de grande escala.

SILVEIRA *et al.* (2013) comentam sobre algumas vantagens e desvantagens desse tipo de energia renovável. Como vantagens o sistema se mostra confiável, de baixo custo de manutenção. Como desvantagens: a limitação de disponibilidade de sistemas no mercado, alto custo inicial, a posição geográfica pela radiação solar e é preciso uma grande área para instalação, para ganhos significativos.

SAMPAIO, GONZALEZ *et al.* (2017) abordam vantagens e desvantagens da energia fotovoltaica, aplicações, mercado atual, custos e tecnologias de acordo com pesquisas científicas publicadas 1996 até 2016. O resultado mostra que esta modalidade pode desempenhar um papel importante no alcance da demanda mundial. Esclarece que embora as células solares de silício cristalino sejam predominantes, outros tipos de células foram desenvolvidos, que competem tanto em termos de redução de custos, quanto em termos de maior eficiência. As principais aplicações são dominadas pelas telecomunicações, bombeamento de água, iluminação pública, agricultura, aquecimento de água, secagem de grãos, dessalinização de água, veículos espaciais e satélites. A Figura 1 mostra a porcentagem de instalação mundial acumulada de energia fotovoltaica até 2015.

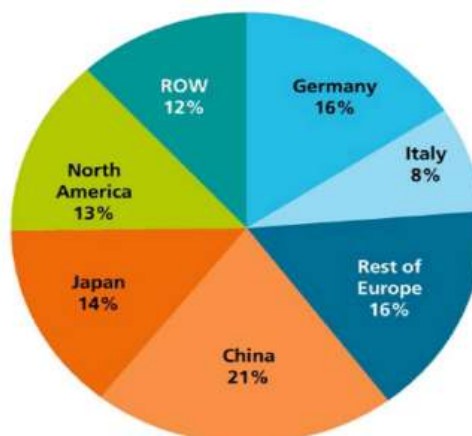


Figura 1 - Instalação Mundial acumulada de energia fotovoltaica até 2015. Source: IHS and PSE AG  
2016

EDALATI *et al.* (2016) escreveram sobre cinco grandes produtores de gás natural no Oriente Médio e investimento que fizeram em energia solar, apesar de terem reservas de petróleo invejáveis. Os mesmos países possuem um potencial enorme para geração de energia solar, por sua posição geográfica, onde existem grandes intensidades de radiação solar. Governantes do Oriente Médio tem formulado políticas persuasivas que ajudam a encorajar o setor privado a participar do financiamento e implantação de plantas com energia solar.

Como experiência recente, VIER *et al.* (2017) realizaram um estudo em um loteamento de interesse social, constituído de 140 casas. Inicialmente, analisaram o projeto elétrico das edificações em estudo para verificar a carga projetada e posteriormente foi realizada uma pesquisa em campo, tendo objetivo de verificar quais equipamentos elétricos são utilizados nas edificações. Como conclusão perceberam que a utilização do sistema de placas fotovoltaicas para geração de energia de forma individual para habitações de interesse social não é viável, tendo retorno apenas 15 anos após o projeto, perdendo para as alternativas analisadas na época da pesquisa, como a distribuição normal de eletricidade de usinas hidrelétricas e termoeletricas, com os preços determinados na época do estudo.

A Figura 2 mostra que com os esforços em inovação, a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais barata em comparação com a energia eólica devido a avanços no desenvolvimento de células e painéis solares de menor custo e maior eficiência.

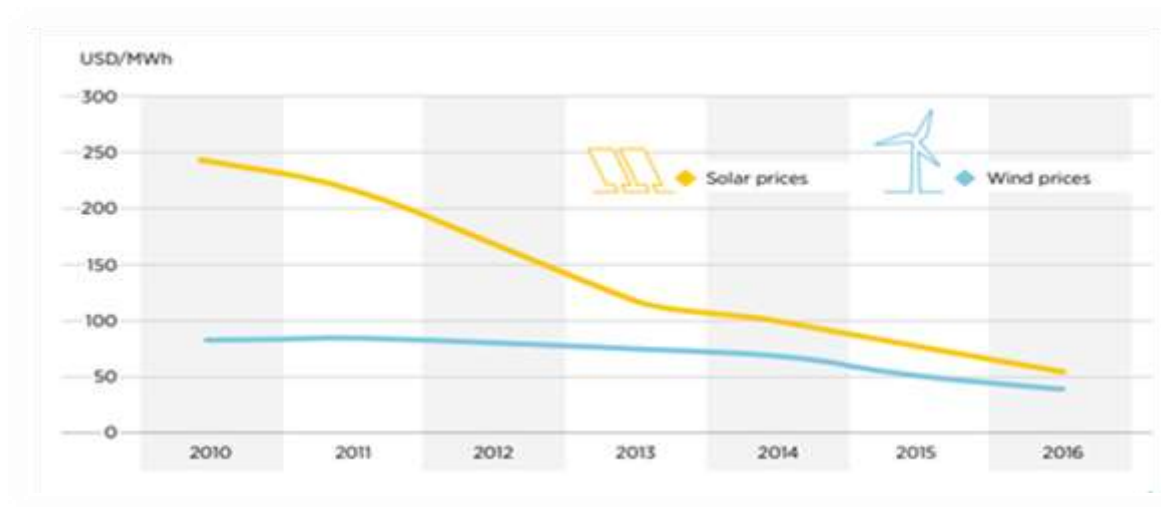


Figura 2 - Custo médio global por MWh negociado em leilões eólicos onshore e fotovoltaico. Source: IRENA 2017; Acesso: REN21

Cabe ressaltar durante a revisão que existe variação nas quantidades produzidas de acordo com a situação climática e que as formas de armazenamento são pouco eficientes quando comparadas, por exemplo, aos combustíveis fósseis, e a energia hidroelétrica.

### 2.1.1 Energia Eólica

O mercado para novos empreendimentos de energia eólica é determinado por muitos fatores, incluindo créditos fiscais e a disponibilidade de outras fontes. O vento é muito competitivo com todas as outras fontes e já é uma realidade. Porém uma dificuldade deste modelo é que o vento é uma fonte de energia variável e dependente de forças atmosféricas complexas.

As turbinas eólicas são máquinas que realizam a conversão de energia cinética do vento em energia mecânica de rotação das pás ou hélices e após, de energia mecânica para energia elétrica. Ela é composta por um conjunto de equipamentos que possibilita essa conversão, tais como: rotor, eixo e gerador. Uma turbina eólica pode ser classificada por meio da sua quantidade de pás, pela sua rotação, pela sua velocidade de ponta, pela sua potência nominal e em relação a sua altura e diâmetro (GASCH e TWELE, 2002).

As principais partes de uma turbina eólica são: o rotor – faz a transformação da energia cinética do vento em energia mecânica de rotação; o sistema de transmissão – realiza a

transmissão do torque e da rotação para o gerador elétrico; a Nacelle – responsável por abrigar os principais componentes do sistema; o sistema de giro – faz a rotação da Nacelle em 360°, mantendo o rotor e a direção do vento alinhados; o cubo – responsável pelo acoplamento das pás ao eixo principal de rotação; os sensores – com a função de medir a velocidade e a direção do vento, auxiliando o sistema de controle; a torre – tem a função de dar suporte para o rotor e para a Nacelle; o transformador – acoplamento elétrico entre a turbina eólica e a rede elétrica; e o gerador elétrico – converte o torque e da rotação em energia elétrica. O conjunto pode ser visto na Figura 3.



Figura 3- Conjunto de equipamento de uma turbina eólica (ENERGY.GOV, 2018)

Além de ser uma energia renovável, o que colabora bastante na redução dos gases de efeito estufa, a energia eólica possui outros atrativos para sua utilização. Como exemplo disso, possui elevada capacidade de instalação em locais de difícil acesso de cabos de energia elétrica. Desde 1941, as turbinas eólicas vêm sendo usadas nesse sentido, quando um protótipo de turbina moderna de eixo horizontal foi construído nos Estados Unidos para fornecer energia para fazendas (HEPBASLI e OZGENER, 2004).

Os parques eólicos também são considerados mais atraentes não só no aspecto ambiental, mas também em aspectos econômicos e sociais. O setor eólico emprega mais de 350 mil pessoas no mundo hoje e continuando com esses números, deve empregar 2 milhões de pessoas em 2020 (GREENPEACE, 2015).

Apesar de todos esses pontos positivos, existem impactos que devem ser analisados para se investir em energia eólica. Um dos pontos principais, nesse sentido, é o impacto sonoro causado pelas turbinas eólicas em movimento. Pessoas que moram próximo dos parques eólicos

apresentam risco de serem perturbadas pelo som, podendo gerar distúrbios de sono e aflição psicológica (BAKKER *et al*, 2012).

Outro ponto que precisa ser observado é o risco de que pássaros sejam atingidos pelas turbinas. Mesmo que a morte de pássaros seja maior em outras formas de infraestrutura de energia, esse é um fator que precisa ser estudado, devido à preocupação da mortalidade aviária se tornar um motivo na redução da biodiversidade se a energia eólica for implementada em grandes áreas (WANG *et al*, 2015).

Diversas pesquisas estão sendo feitas no ramo da energia eólica, como exemplo, FEITOSA *et al*. (2017) realizaram um estudo para quantificar a geração de energia elétrica proveniente de um aerogerador nas condições de velocidade do vento na cidade de Fortaleza, no Ceará. Utilizou-se um aerogerador de 1 kW de potência, modelo H3.1-1KW, marca Hummer, onde o mesmo foi instalado na Universidade Federal do Ceará, e efetuado coleta de dados da geração de energia e velocidade do vento. Como resultado uma geração de energia elétrica em média 500 Wh, com uma velocidade do vento de  $5,5 \text{ ms}^{-1}$ .

ZERRAHN (2017) fornece uma revisão da literatura sobre a lógica econômica por trás da implantação de energia eólica, sobre o fato de turbinas eólicas reduzirem a qualidade de vida humana devido ao ruído e impactos e ameaçam a vida selvagem, reunindo evidências estruturadas de custos diretos e indiretos. O estudo das desvantagens devido ao ruído foi feito por POHLA (2018).

CRUZ *et al*. (2015) realizaram uma prospecção baseada na busca de patentes para com isso apresentar uma visão geral de desenvolvimento tecnológico relacionado às turbinas eólicas. Concluiu que o país com mais depósitos de patentes foi a China. Destaca-se, ainda, que 67% dos depósitos de patentes originam-se de inventores individuais, 25% de empresas e apenas 8% de Universidades.

CALDAS (2010) defende que a primeira etapa do desenvolvimento de um projeto eólico é a simulação computacional utilizando dados de vento coletados por softwares específicos mais utilizados no mercado, como o WindPro e WAsP, apresentando um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro.

Melhorar a precisão das previsões de vento é fundamental para operadores de redes elétricas que devem equilibrar dinamicamente a potência variável gerada pelo aumento ou diminuição da produção de energia de outras fontes, como gás natural, hidroelétrico e biomassa.



Os operadores precisam tanto das previsões de saída quanto dos níveis de confiança associados para determinar um cronograma ótimo. Os resultados estão ajudando os fabricantes de turbinas a refinar suas curvas de potência e descobrir quais processos atmosféricos são realmente relevantes. Com modelos aperfeiçoados, pode-se maximizar melhor os investimentos, licitar melhor no mercado de energia, aumentar a eficiência dos projetos.

### 2.1.2 Energia das marés

De acordo com ROSA (2016), as marés são criadas pela atração gravitacional que a lua exerce sobre a Terra. A energia das marés é proveniente do enchimento e esvaziamento alternados das baías e dos estuários e, sob certas condições que fazem com que o nível das águas suba consideravelmente na maré cheia. Essa energia pode ser eventualmente utilizada para gerar energia elétrica. Um esquema de aproveitamento das marés contém uma barragem, construída num estuário e equipada com uma série de comportas, que permite a entrada d'água para a baía.

O método mais simples e utilizado é conhecido como geração na maré alta. Durante a maré alta, a água entra na baía através das comportas e é mantida até a maré recuar suficientemente e criar um nível satisfatório em que a água é liberada através de turbinas para geração de eletricidade. O processo de liberação das águas é mantido até a maré começar a subir novamente, fazendo com que a diferença de nível caia abaixo de um ponto de operação mínimo. Tão logo a água comece a subir, esta começa a entrar na baía novamente, repetindo o ciclo.

O custo de um sistema para aproveitamento das marés depende não somente do seu desempenho operacional, mas do custo inicial, que é elevado se comparado a outros tipos de geração, como a energia eólica, representando 30% a mais. Esse tipo de empreendimento que produz apenas uma parte de sua capacidade instalada possui um longo período e baixas taxas de retorno de investimento.

Segundo KLOTZE (2017), a vantagem desta fonte de energia é a constância e previsibilidade da ocorrência das marés, o fato de as marés serem uma fonte inesgotável de energia.

NASCIMENTO (2017) discursou sobre os principais projetos existentes de exploração de energia das marés no mundo, conforme a Figura 4. Também comentou sobre outros projetos que ainda estão em desenvolvimento, como o projeto no litoral nordeste da Escócia, cujo

objetivo é a produção de 190 GW de energia renovável e o projeto que está em desenvolvimento no País de Gales, com capacidade prevista de 320 MW.

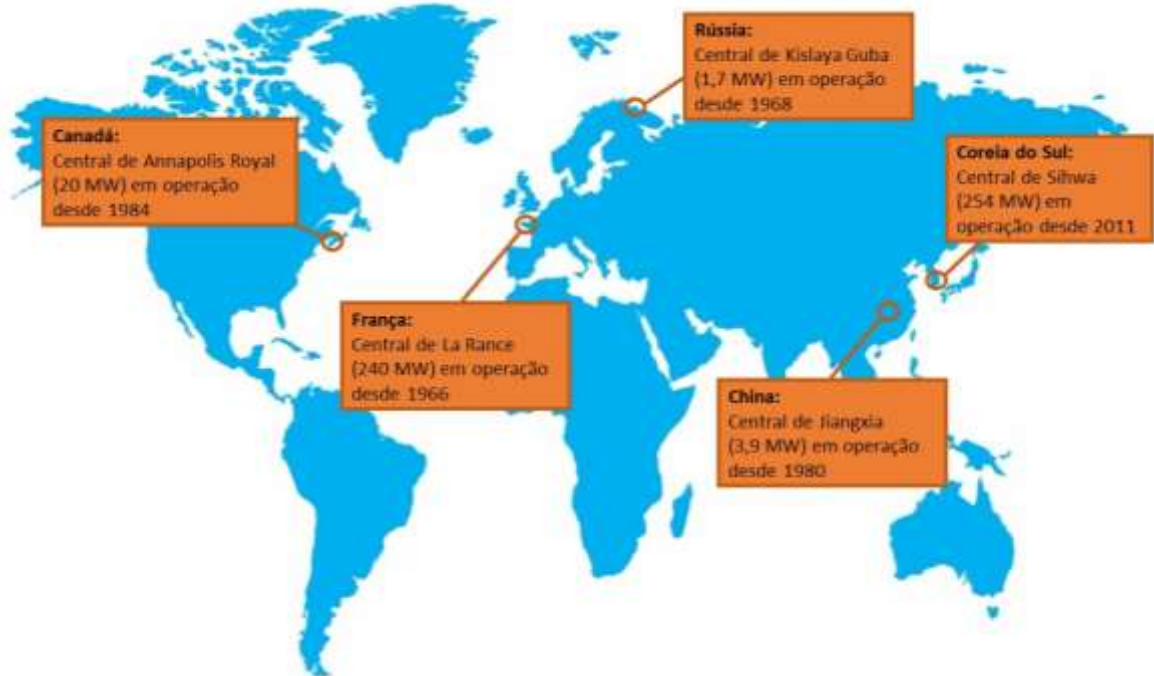


Figura 4 - As maiores plantas de energia maremotriz em operação no mundo (NASCIMENTO, 2017).

## 2.2 Geração de Energia por Piezelétricos

A geração de energia ou Energy Harvesting entre pesquisadores e acadêmicos, é o processo de obtenção de energia de um sistema para conversão em energia elétrica (SODANO, *et al.*, 2004; TOIT, 2005; ANTON, *et al.*, 2007; LEO, 2007; ERTRUK, 2009; ERTURK, *et al.*, 2011; MINETO, 2013).

Segundo CALIÒ (2014), *Energy Harvesting* também pode ser chamado de *Energy Scavenging*, definido por ele como um processo de extrair uma quantidade de energia do ambiente através de variadas origens de energia. No estudo de Caliò, a energia disponível é principalmente provida pela luz ambiente (artificial ou natural), termais e mecânicas.

Com os recentes avanços em tecnologias como *wireless* e sistemas micro eletromecânicos (MEMS), os estudos relacionados a essa área estão sendo cada vez mais procurados e desenvolvidos. Esta modalidade de geração é importante para viabilizar redes inteligentes de baixa potência. Um dos maiores objetivos nessa área de pesquisa é utilizar a energia vinda das vibrações mecânicas de mecanismos para estimular o carregamento destes

pequenos dispositivos eletrônicos. O estudo da geração de energia elétrica através de vibrações estruturais foi primeiramente estudado por Williams e Yates (WILLIAMS e YATES, 1996).

A coleta e análise dos dados mostram que o interesse, definido pelo número de artigos científicos publicados sobre geração de energia por efeito piezoeletrico cresceu exponencialmente na última década. A área mostra uma notável discrepância, de um lado, tem-se uma considerável geração de ideias e inovação, e de outro lado temo baixa comercialização e desenvolvimento.

LAUMANN *et al.* (2017) examinaram o interesse acadêmico crescente no campo de pesquisa apesar de mostrar um baixo nível de capacidade de converter a tecnologia da academia para a indústria. Os autores expõem que a falta de comercialização não está inibindo o interesse de pesquisa, o que pode sugerir problema na gestão e priorização de pesquisas energéticas pelas nações.

De frente a essas barreiras, o desenvolvimento de aparatos e dispositivos que pudessem converter a energia proveniente de vibrações em energia elétrica através de piezoeletricos se torna uma tarefa atraente, de modo que podem ser implementados para que a vida útil de baterias seja estendida (WILLIAMS e YATES, 1996). O emprego do conceito de *Energy Harvesting*, onde materiais piezoeletricos são utilizados, requer os seguintes passos:

- (1) Identificação de parâmetros das vibrações mecânicas, como a amplitude e frequência;
- (2) desenvolvimento de um dispositivo utilizando material piezoeletrico;
- (3) circuito que possua um conversor AC/DC e um regulador de tensão com o objetivo de armazenar energia através de capacitores ou baterias, para que dispositivos eletrônicos de baixa potência sejam alimentados. As etapas citadas são vistas na Figura 5.

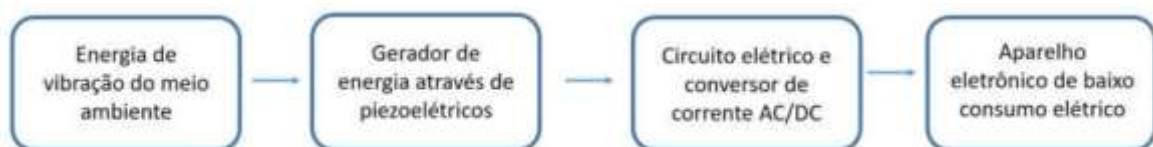


Figura 5 - Esquema de um gerador piezoeletrico de energia a partir de vibrações mecânicas (ERTRUK, *et al.*, 2011).

### 2.2.1 Geradores Piezelétricos Lineares

Piezeletricidade, de modo simples, é a capacidade que alguns materiais têm em gerar tensão elétrica quando sofrem algum tipo de esforço mecânico e vice-versa.

A piezeletricidade foi descoberta na França pelos irmãos Pierre e Jacques Curie em 1880, onde o efeito piezelétrico foi apresentado em cristais. Porém, a partir dessa descoberta, o efeito inverso não foi previsto. O efeito inverso foi matematicamente deduzido por Gabriel Lippmann em 1881. Com isso, os Curie imediatamente confirmaram a existência do efeito inverso, onde a reversibilidade completa de um acoplamento eletromecânico para as deformações em cristais piezelétricos foi evidenciada de forma quantitativa.

Hoje, os piezelétricos mais encontrados no mercado são: Cristais de Quartzo, Turmalina, Oxido de Zinco, PZT (Titanato Zirconato de Chumbo), PVDF (Polifluoreto de Vinilideno). O uso de materiais piezelétricos aumentou consideravelmente a partir de 2000, quando começaram a usar mais vezes sensores, dispositivos *wireless* e transdutores. TOIT (2005); LEO (2007); ERTURK (2009); ERTURK, *et al.*, (2011).

Em 1996, Williams e Yates propuseram um dispositivo com o intuito de gerar eletricidade quando aplicado em um ambiente vibratório. Para que esse dispositivo pudesse ser avaliado, um transdutor eletromagnético foi escolhido. Com a análise, foi demonstrado que o gerador teria um desempenho ruim em baixas frequências. Também foi determinado, por análise, que um baixo fator de amortecimento era necessário para que a geração de energia pudesse ser potencializada, portanto, o projeto deve permitir grandes deformações. Para um dispositivo, a geração de energia prevista foi de  $1 \mu W$  na frequência de excitação de  $70 Hz$  e  $0,1 mW$  a  $330 Hz$  (assumindo uma deflexão de  $50 \mu W$ ). Concluíram que a geração é proporcional ao cubo da frequência vibratória, e que, respeitadas as dimensões do gerador, quanto maior a massa e a distância que a mesma percorrer, maior será a geração

COOK-CHENNAULT *et al.*, (2008) e, em paralelo, ERTURK e INMAN, (2011), mostram que a principal vantagem de materiais piezelétricos é sua grande densidade de potência e a sua facilidade de aplicação (abrangência de tensão elétrica). Na Figura 6, há uma comparação de densidade de potência por diferença de potencial, onde os piezelétricos abrangem uma larga área.

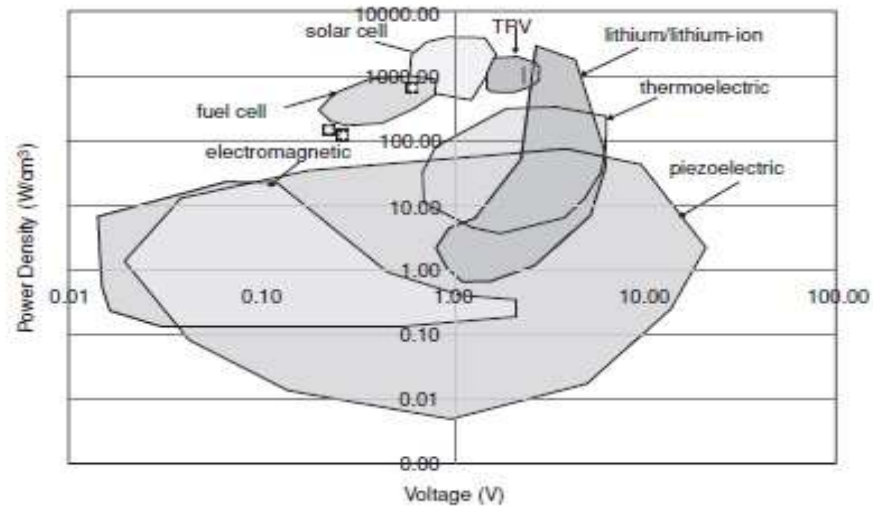


Figura 6 - Comparação de densidade de potência por voltagem de alguns materiais (ERTURK e INMAN, 2011).

GUIZZETTI *et al.*, (2009) estudaram uma técnica para a tentativa de encontrar uma espessura ótima para o dispositivo piezelétrico que maximize a potência elétrica gerada, computada através do Método de Elementos Finitos. A técnica de otimização consistia em variar a geometria de um gerador de energia formado por uma viga em balanço. Eles obtiveram o resultado que esperavam, determinando a espessura ótima, encontrando a potência máxima de saída.

ERTURK *et al.*, (2009) realizaram um estudo que chamou atenção para modelos *unimorph* e *bimorph*. A cerâmica piezelétrica é um material frágil, tornando necessário a junção de outro material para aumentar a flexibilidade, permitindo assim a flexão do dispositivo. O modelo *unimorph* possui apenas uma camada piezelétrica e uma de substrato, enquanto o *bimorph* possui duas camadas piezelétricas e uma de substrato.

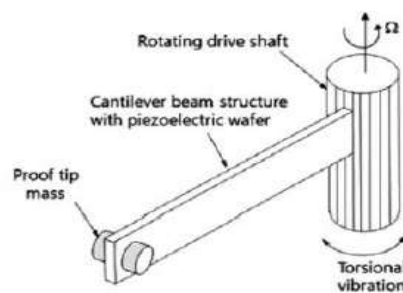


Figura 7 - Diagrama do protótipo do coletor de energia piezelétrico com motores de combustão interna. (KIM,2014)

KIM (2014) projetou um coletor de energia piezelétrico (PEH), que coleta energia através da vibração de torção induzida por motores de combustão interna. O desempenho de colheita do protótipo é experimentalmente validado através de testes em laboratório usando uma baixa inercia do dinamômetro. O esquema do protótipo pode ser visto na Figura 7.

WANG *et al.*, (2016) estudaram sobre a relação entre a performance da vibração com a dimensão menos o fator de força. Intervalos numéricos da dimensão menos fator de força foram definidos para casos de fraca taxa de modo e forte acoplamento. As relações de acoplamento, fator de perda, força de acoplamento crítica, quociente de acoplamento, fator de acoplamento eletromecânico, fator de perda de amortecimento e densidades modais foram estabelecidos em sistemas de geração de energia linear. Sendo esse estudo uma contribuição na determinação de uma faixa de frequência onde a captação de energia de vibração é aplicável.

JIMÉNEZ *et al.*, (2017) estudaram uma forma virtual de se obter modelos elétricos lineares dos elementos piezelétricos envolvidos em aplicações de geração de energia em ambientes de tráfego rodoviário. Os dispositivos piezelétricos em teste (PDUT) são mecanicamente acionados por uma bancada de testes, que simula o efeito de veículos pesados ou leves em uma pista real. Parâmetros como a taxa de fluxo do tráfego e a velocidade do veículo são considerados. No modelo estudado, é possível dimensionar o número de elementos e encontrar a topologia ideal necessária para otimizar a geração de energia.

Com o passar do tempo, a engenharia vem se desenvolvendo, misturando áreas de conhecimento. Um exemplo desta mistura é a conexão entre materiais piezelétricos e outros materiais inteligentes. Essa mistura tem o objetivo de aumentar a eficiência dos dispositivos e a partir dela, novos trabalhos vêm sendo publicados. Como exemplo disso, ZAKHAROV, *et al.* (2012), realizaram um experimento que utiliza energia térmica para que um fio de memória de forma pudesse ser deformado, fazendo fletir uma amostra piezelétrica na configuração de viga engastada. Constatou-se que o volume de material ativo de  $0,2 \text{ cm}^3$  é capaz de gerar  $90 \mu\text{J}$  durante a etapa de aquecimento e  $60 \mu\text{J}$  na etapa de resfriamento, onde foi considerada uma variação de  $20^\circ\text{C}$ . Uma ilustração do experimento pode ser vista na Figura 8.

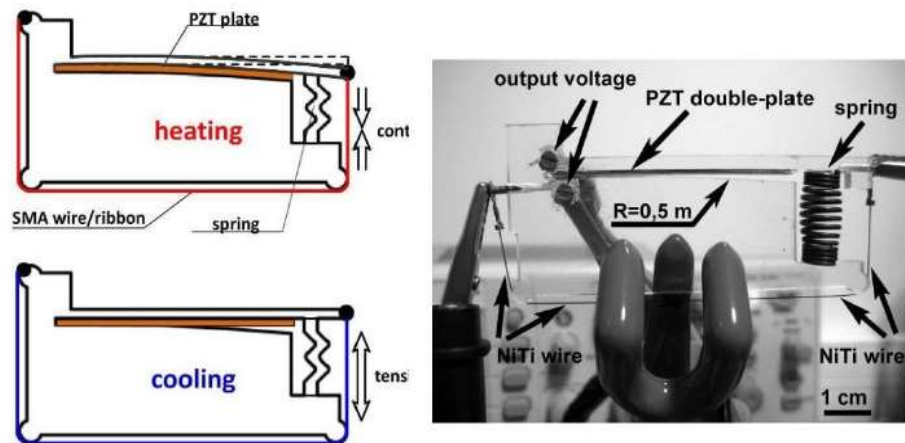


Figura 8 - Fios de Ligas de Memória de forma combinado com efeito piezelétrico. Adaptado de (ZAKHAROV, *et al.*, 2012)

Até então, foram apresentados alguns exemplos de estudos de dispositivos lineares, porém, hoje em dia, os estudos de dispositivos que apresentam fenômenos não lineares ganharam foco por permitir a captura de energia em uma faixa mais ampla de frequências. Ainda utilizando a combinação entre memória de forma e efeito piezelétrico, o regime não linear será abordado na próxima seção.

### 2.2.2 Geradores piezelétricos não lineares

Os efeitos não lineares podem ser divididos em constitutivos e mecânicos (geométricos) relacionados a grandes deslocamentos. Não linearidade constitutiva se refere, por exemplo, à descrição do acoplamento eletromecânico à mudança de geometria. Grande parte dos pesquisadores desse ramo descrevem o acoplamento eletromecânico através de modelos lineares. Esta aproximação gera resultados imprecisos de potência gerada quando comparam com resultados experimentais (KIM, *et al.*, 2010).

CRAWLEY *et al.* (1990), realizam um trabalho sobre não linearidade onde mostraram que o acoplamento eletromecânico é considerado constante para valores pequenos de deformação de um material piezelétrico. Porém, na ressonância, o acoplamento eletromecânico possui uma relação não linear com altos valores de deformação.

O acoplamento de elementos mecânicos a um piezelétrico em vibração também gera um tipo de não linearidade mecânica. Um bom exemplo sobre este caso são osciladores do tipo *Duffing*, onde ímãs podem ser adicionados na viga piezelétrica em balanço e a interação com

imãs nas proximidades pode resultar em um sistema biestável (PAIVA, *et al.*, 2006; INMAN, *et al.*, 2009; de PAULA, *et al.*, 2015).

BAI *et al.*, (2014) realizaram um estudo que mostrou com uma viga *bimorph*, que massas assimétricas são capazes de introduzir não linearidades mecânicas modificando consideravelmente a dinâmica do oscilador.

Como as pesquisas relacionadas a geração de energia limpa estão sendo mais frequentes atualmente, fica interessante combinar materiais inteligentes, como SMA e o piezelétrico. SILVA *et al.*, (2015) idealizaram um dispositivo onde existia a combinação de um elemento piezelétrico e um elemento de liga de memória de forma para geração de energia elétrica. Com isso, é possível controlar a rigidez do sistema, uma vez que as ligas com memória de forma podem ter seu módulo de elasticidade alterado devido às transformações de fase, além dos efeitos histeréticos associados a dissipação que estes materiais apresentam. Através disso, consegue-se mudar a frequência natural do sistema, aumentando a faixa de operação do dispositivo. É considerado um modelo numérico de uma viga em balanço para um sistema massa-mola-amortecedor-piezelétrico-SMA, mostrado na Figura 9. Os efeitos de memória de forma e pseudoelasticidade foram obtidos através do modelo constitutivo de Brinson (BRINSON, 1993) e (SILVA *et al.*, (2015).

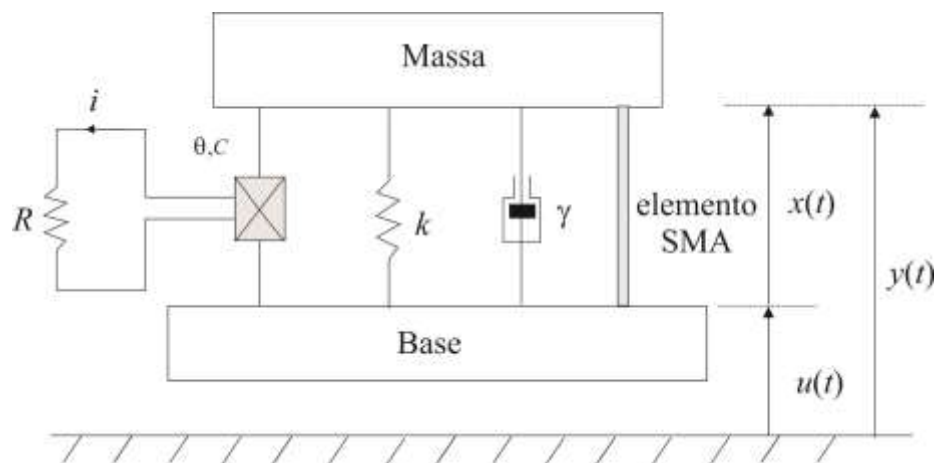


Figura 9 - Dispositivo para geração de energia envolvendo elemento piezelétrico e memória de forma.

(SILVA, *et al.*, 2015)

No trabalho realizado, utilizam-se equações de movimento adimensionalizadas, onde consideram diferentes valores de vibração de base ( $\zeta$ ) e diferentes temperaturas ( $T$ ). Inicialmente, são implementados pequenos valores de vibração de base para não ocorrer transformação de fase induzida por tensão no elemento com memória de forma (amplitude de



vibração da base adimensional  $\zeta = 0,001$ ). A Figura 10 mostra diferentes curvas para o sistema utilizado, aumentando-se gradativamente a temperatura do elemento com memória de forma. Percebe-se que a mudança da rigidez do material com memória de forma altera consideravelmente a ressonância do sistema.

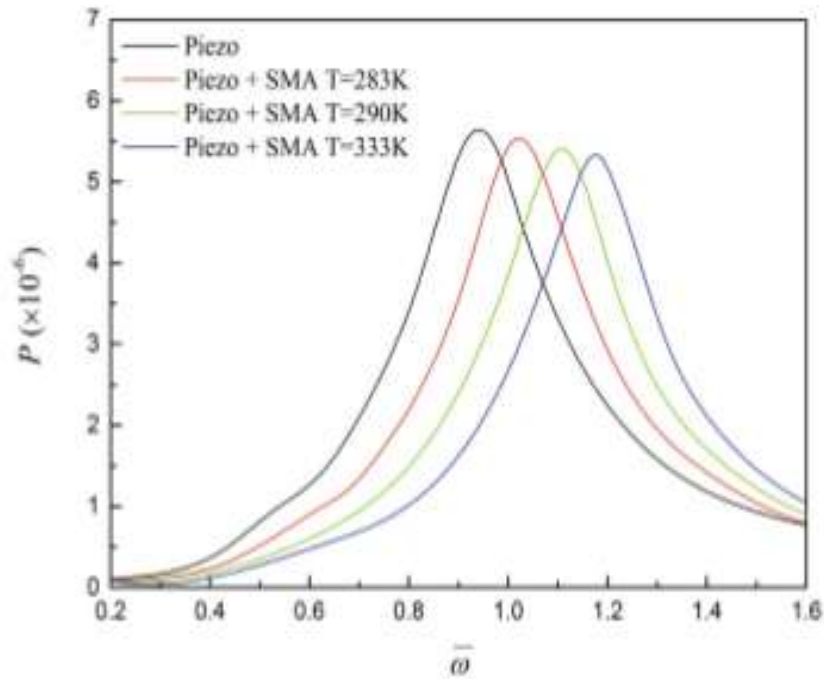
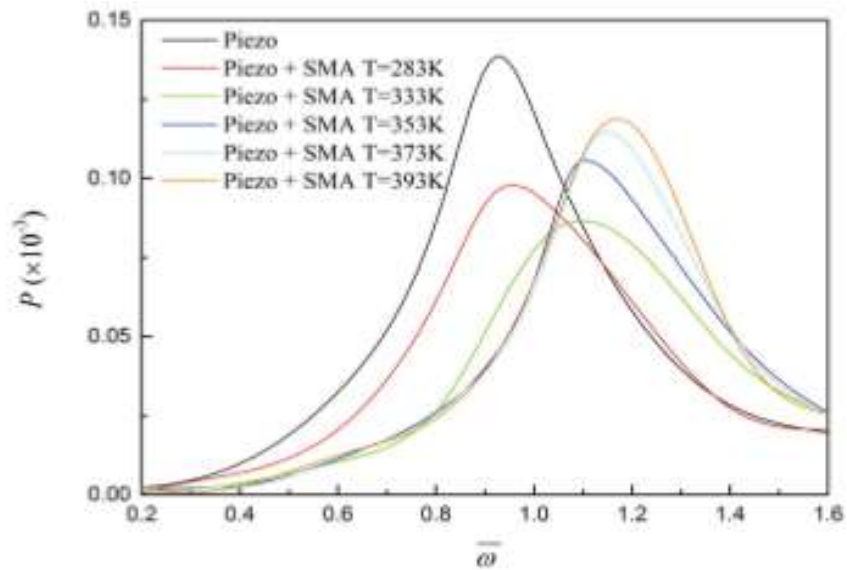
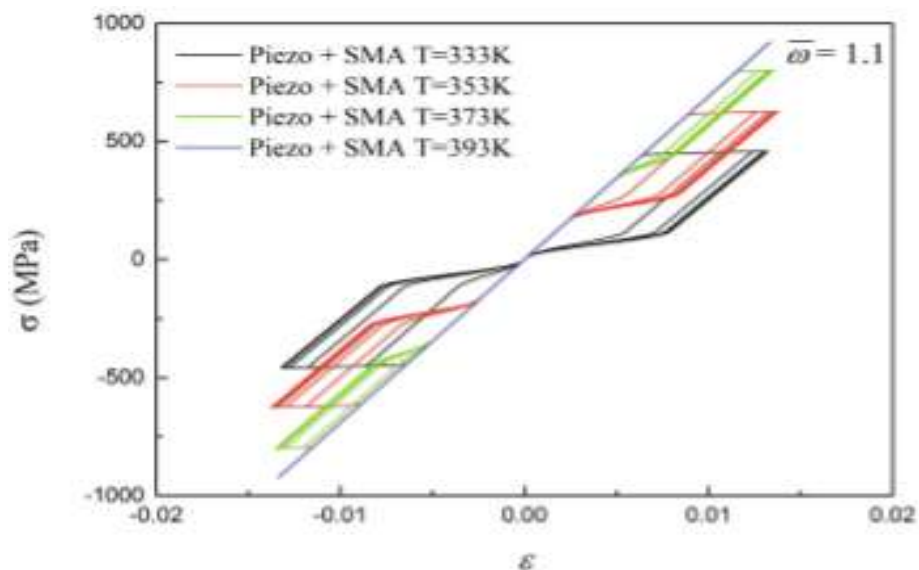


Figura 10 - Potência máxima gerada versus frequência de oscilação. Comparação de um modelo apenas com elemento piezelétrico e outros com memória de forma variando a temperatura ( $\zeta = 0,001$ ). (SILVA, *et al.*, 2015)

Posteriormente, aumenta-se razoavelmente os níveis de vibrações da base acarretando transformações de fase incompletas no material com memória de forma induzida por tensão ( $\zeta=0,005$ ). A Figura 11 (a) que com o aumento da amplitude de vibração da base, o elemento com memória de forma, devido a seu laço de histerese, tende a atenuar a vibração. Aumentando a temperatura, as tensões críticas de transformação de fase aumentam tornando os ciclos de histerese cada vez menores, diminuindo a dissipação, até o momento que o elemento de SMA trabalhar no regime elástico na fase austenítica, quando a tensão crítica de início da transformação assume um valor muito além do carregamento que acontece no elemento, podendo ser visto na Figura 11 (b).



(a)



(b)

Figura 11 - (a) Potência máxima gerada x frequência de oscilação. Comparação entre o modelo clássico e modelos com SMA para diferentes temperaturas ( $\zeta=0,005$ ). (b) Curvas tensão-deformação em diferentes temperaturas para um valor de frequência angular adimensionalizadas ( $\bar{\omega}$ ). (SILVA, *et al.*, 2015)

Quando se aumenta a amplitude de vibração da base ( $\zeta = 0,025$ ), o sistema apresenta resultados próximos para altas e baixas temperaturas. Os pontos mais altos de potência são similares. A Figura 12 (a) mostra as curvas para temperaturas diferentes. Os resultados podem ser explicados observando a Figura 12 (b), porque as transformações são quase completas para

todas as temperaturas que foram implementadas, os ciclos de histerese possuem áreas similares, além disso os valores de rigidez variam pouco.

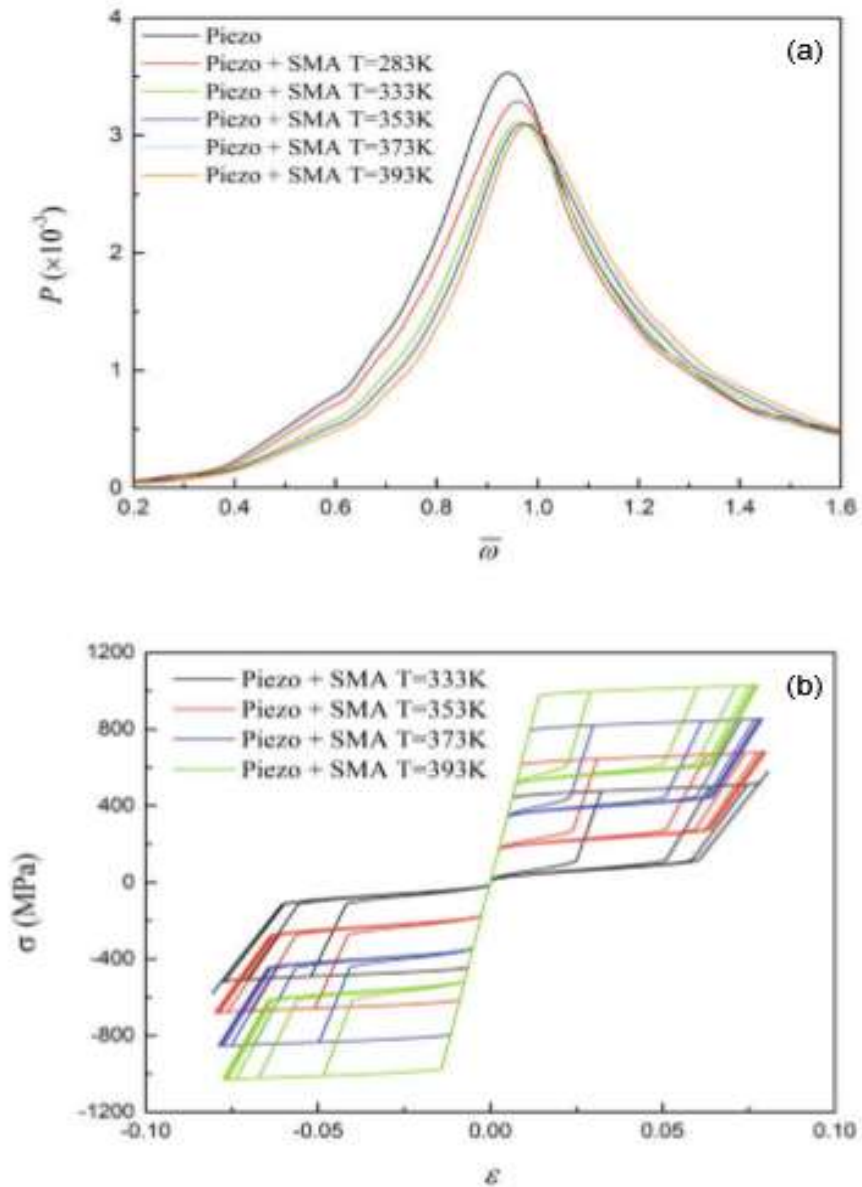


Figura 12 - (a) Potência máxima gerada x frequência. Comparação entre o modelo clássico e modelos com SMA para diferentes temperaturas ( $\zeta = 0.025$ ). (b) Curvas tensão-deformação em diferentes temperaturas para um valor de frequência angular adimensionalizada ( $\bar{\omega}$ ). (SILVA, *et al.*, 2015)

Com a apresentação deste estudo, fica evidente a necessidade da análise detalhada sobre o acoplamento dos fenômenos piezolétrico e do uso de memória de forma para desenvolver modelos precisos. A combinação e utilização de materiais inteligentes pode iniciar campos de grande economia de energia.

## Capítulo 3

### Fundamentação Teórica

#### 3.1 Ligas com Memória de Forma

O crescimento da demanda por materiais mais leves e resistentes com mais funcionalidades além de estruturais favoreceu o surgimento de um novo grupo de materiais chamado “materiais multifuncionais”. A partir disso surgiu um novo subgrupo de materiais chamado “materiais inteligentes”. Esses materiais são capazes de ter uma ou mais propriedades alteradas de forma controlada através de estímulos externos, tais como: carregamentos mecânicos, mudanças de temperatura, campo elétrico, magnético, etc.

As ligas com memória de forma (SMA) são uma classe de materiais capaz de recuperar uma forma previamente conhecida quando a sua temperatura aumenta. Além disso, sobre condições específicas, as SMAs têm a habilidade de absorver e dissipar energia de diferentes formas de carregamento cíclicos. Essas características únicas das SMAs as popularizaram para aplicações como sensores e atuadores.

A descoberta dos aços com estrutura martensítica nos anos 1890 por Adolf Martens foi o maior passo dado em direção da eventual descoberta das ligas com memória de forma. A transformação martensítica foi observada em sistemas Fe-C e inicialmente determinado como um processo irreversível. O conceito de transformação martensítica termoelástica, que explica a reversibilidade da transformação martensítica, foi introduzida em 1949 por Kurdjumov e Khandros (LAGOUDAS, 2008).

Os materiais com memória de forma possuem duas fases distintas e conseqüentemente diferentes propriedades. Uma é a fase de alta temperatura chamada austenítica (A) e a outra fase é a martensítica, que é a baixa temperatura. Esta última pode se apresentar em duas variantes martensíticas, Martensita maclada ( $M_t$ ) e a Martensita não maclada ( $M_d$ ). Quando o material é aquecido sem carregamento mecânico, ele começa a se transformar de martensita maclada em austenita. A temperatura de início da transformação austenítica ( $A_s$ ) é a temperatura em que esta transformação inicia, e a temperatura  $A_f$  é a temperatura em que esta transformação é concluída. A transformação de fase inversa ocorre com a transformação de martensita para austenita com a redução de temperatura, sendo  $M_s$  a temperatura em que esta transformação se

inicia e  $M_f$  a temperatura em que esta transformação termina. Duas propriedades chaves para todo material inteligente são: frequência de acionamento e a densidade energética de acionamento *Actuation energy density* [ $\text{J}/\text{m}^3$ ], que é o trabalho disponível por unidade de volume.

Os principais efeitos que estas ligas apresentam são conhecidos como SME (*Shape Memory Effect*) e pseudoelasticidade (ou superelasticidade), podem ser divididos em três características distintas como segue (Figura 13):

- i. Efeito de memória de forma de uma via (OWSME – “One-way shape memory effect”): Nesse caso o material retém um estado de deformação após a retirada da força externa e então recupera a forma original quando aquecido.
- ii. Efeito de memória de forma de duas vias (TWSME – “Two-way shape memory effect”) ou SME reversível: Nesse caso o material é capaz de retornar a forma original tanto em alta quanta em baixa temperatura, após sofrer um treinamento termomecânico adequado. Porém esse caso é menos utilizado porque normalmente somente é capaz de recuperar parte da deformação quando comparado ao efeito de memória de forma unidirecional. (Jaronie *et al*, 2013).
- iii. Pseudoelasticidade ou superelasticidade: a SMA retorna a sua forma original ao sofrer carregamentos mecânicos em ensaios isotérmicos a altas temperaturas, normalmente acima de  $A_f$ .

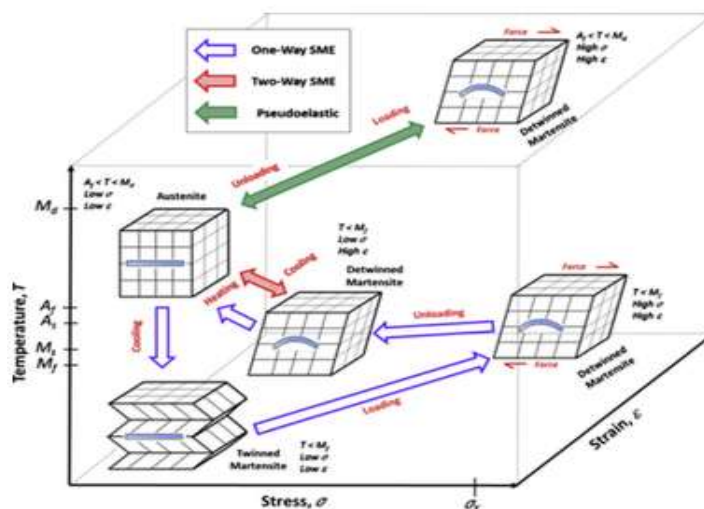


Figura 13 - Característica dos efeitos de mudança de forma. (JARONIE *et al*, 2013)



temperatura acima de  $A_f$ , conforme mostra a Figura 15. Acima de  $A_f$ , a forma austenítica do material é estável. Com isso o material é tensionado e então inicia-se uma deformação elástica.

Continuando a aumentar a tensão aplicada, o material inicia uma deformação devido à transformação de fase (ponto B), o que indica o início da transformação martensítica ( $\sigma_{Ms}$ ). O término da transformação martensítica ocorre quando a tensão atinge  $\sigma_{Mf}$  (ponto C), e então o material se encontra na forma martensita com variante não maclada. Após se completar a transformação, o aumento da tensão não resultará em outra transformação, apenas em uma deformação elástica da martensita não maclada (até o ponto D). Então, inicia-se o processo de descarregamento mecânico gradual, o ponto E caracteriza o início da transformação austenítica,  $\sigma_{As}$ ; e  $\sigma_{Af}$  é a tensão final de transformação, de modo que, o material seja completamente austenítico e então se descarrega até o estado original no início do processo (ponto A). (LAGOUDAS, 2008; AGUIAR 2011; da HORA *et al.*, 2013)

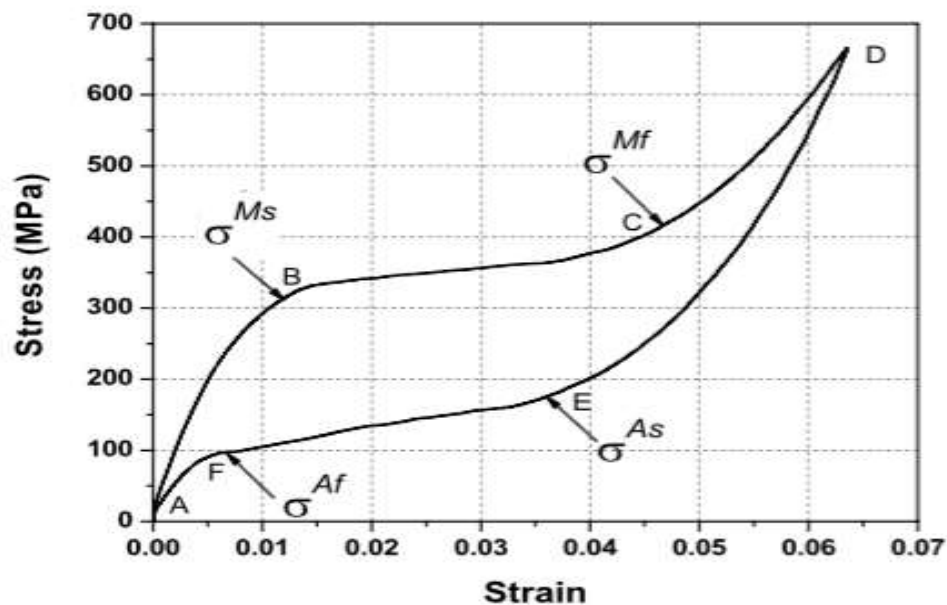


Figura 15 - Típico carregamento cíclico pseudoelástico em uma liga Ni-Ti (Lagoudas,2008).

### 3.2 Material Piezelétrico

A maioria dos materiais piezelétricos pertence à classe de sólidos cristalinos. Os cristalógrafos estudaram e classificaram os cristais em diversos grupos, cada grupo é caracterizado por um determinado arranjo atômico. Alguns grupos de cristais exibem um eixo

polares no qual existe uma rede de separação entre as cargas positivas e negativas. Esta separação de carga produz um dipolo elétrico, que pode dar origem a piezoelectricidade.

Materiais piezoeletricos produzem um deslocamento elétrico quando uma tensão mecânica é aplicada (efeito direto) e podem se deformar sob a aplicação de um campo elétrico (efeito indireto). O efeito direto foi descoberto pelos irmãos Curie, e posteriormente, Lippman demonstrou matematicamente o efeito piezoeletrico inverso, comprovado experimentalmente pelos irmãos Curie logo a seguir (LEO, 2007).

Materiais piezoeletricos podem ser aplicados como atuadores, sensores e para geração de energia (RIAGUSOFF, 2012), este texto dá ênfase na sua utilização para geração de energia.

### 3.2.1 Efeito Direto

Na Figura 16, pode-se verificar que aplicando tensão,  $T$ , ao material ocorre o alongamento na direção da carga aplicada, e considerando que hipótese de estado de tensão uniaxial, a deformação,  $S$ , é definida como o alongamento total dividido pelo comprimento original da amostra.

Na região elástica linear, a inclinação da curva tensão-deformação é constante. A inclinação da linha é chamada de módulo de Young, denotado como “ $Y$ ” e tem unidade em  $[N / m^2]$ .

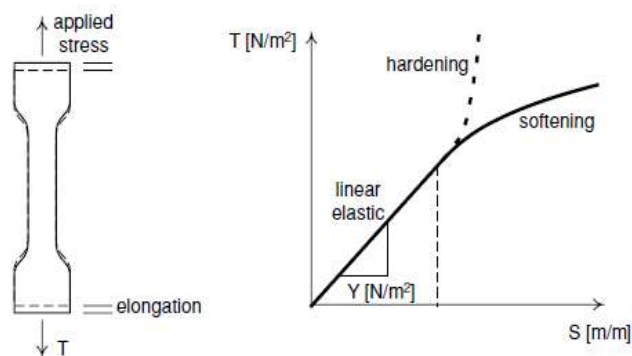


Figura 16 Tensão x Deformação (LEO, D.J, 2007)



Da relação deformação-tensão nessa região, tem-se Eq. 1:

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

onde “ $s$ ” é chamado de conformidade mecânica ( $m^2/N$ ).

Se uma tensão mecânica é aplicada ao material, o dipolo elétrico no cristal irá surgir. O movimento de carga produzirá um fluxo de carga que pode ser medido nas faces do material. Os eletrodos colocados nas faces do material medirão um fluxo de carga ou corrente. Esta é a base física para o efeito piezelétrico direto.

Se um material piezelétrico é submetido a uma tensão, além de se alongar irá produzir um fluxo de carga nos eletrodos colocados nas duas extremidades da amostra. A carga produzida dividida pela área dos eletrodos é o deslocamento elétrico, que tem unidades de  $C/m^2$ . Na Figura 17 pode-se verificar a relação entre essa tensão e o deslocamento elétrico.

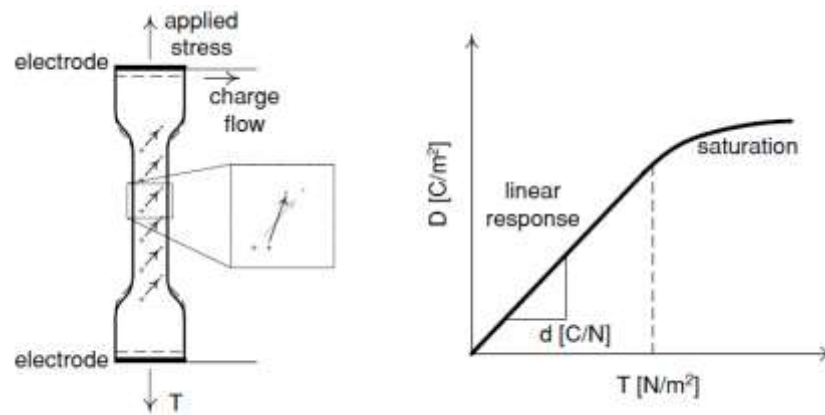


Figura 17 – Efeito direto. Relação entre tensão mecânica e aumento no deslocamento elétrico. (LEO, D.J, 2007)

Na região linear, esta relação pode ser expressa como a Eq. 2:

$$D = dT \quad (2)$$

onde  $D$  é o campo de deslocamento elétrico ( $C / m^2$ ) e “ $d$ ” é o coeficiente piezelétrico ( $C / N$ ).

### 3.2.2 Efeito Inverso

Os materiais piezelétricos também exibem um efeito em que um campo elétrico aplicado produzirá uma resposta mecânica e elétrica, Figura 18. Ao se polarizar, o material produzirá deslocamento elétrico, sendo a relação entre campo elétrico e deslocamento elétrico no regime linear dada pela Eq. 3.

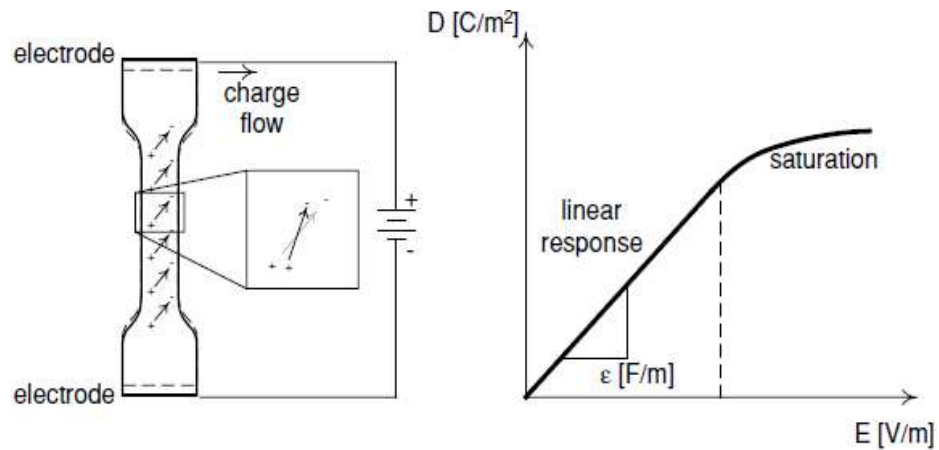


Figura 18- Efeito inverso. Relação entre campo elétrico e deslocamento elétrico. (LEO, 2007)

$$D = \varepsilon E \quad (3)$$

onde  $D$  é o campo de deslocamento elétrico ( $C / m^2$ ) e “ $\varepsilon$ ” é a permissividade elétrica ( $F / m$ ) e  $E$  é o campo elétrico ( $V/m$ )

Aplicando valores suficientemente baixos de campo elétrico, verificaria-se uma relação linear entre o campo elétrico aplicado e a deformação mecânica, como mostrado na Figura 19.

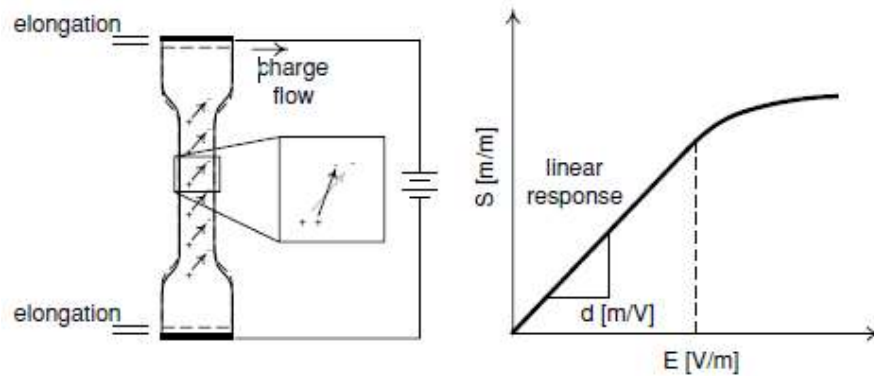


Figura 19 - Relação entre campo elétrico e tensão. (LEO, D.J, 2017)

A relação pode ser expressa como a Eq. 4:

$$S = dE \quad (4)$$

Nesta expressão, o coeficiente piezelétrico,  $d$ , tem a unidade [m/V]

As propriedades básicas de um material piezelétrico são expressas matematicamente como uma relação entre duas variáveis mecânicas, tensão e deformação, e duas variáveis elétricas, campo elétrico e deslocamento elétrico. Os efeitos piezelétricos direto e inverso são escritos como o conjunto de equações lineares nas equações já expostas. As expressões para o efeito piezelétrico direto e inverso podem ser combinadas em uma expressão matricial escrevendo a relação entre tensão e deslocamento elétrico em função do estresse aplicado e campo aplicado, descrito pela Eq. 5.

$$\begin{Bmatrix} S \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s & d \\ d & \varepsilon \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ E \end{Bmatrix} \quad (5)$$

A parte superior da equação representa uma equação para o efeito piezelétrico inverso, enquanto a parte inferior representa uma expressão do efeito direto.

### 3.2.3 Fabricação

A fabricação de materiais piezelétricos sintéticos começa com os materiais constituintes sob a forma de pó. Uma mistura típica de materiais que exibem propriedades piezelétricas são o nitreto de alumínio (AlN), óxido de zinco (ZnO), titanato de bário (BaTiO<sub>3</sub>), Fluoreto de Polivinilideno (PVDF), Titanato zircanato de chumbo (PZT), os cristais ferroelétricos PMN-PT, PZN-PT, que são utilizadas em dispositivos que exigem propriedades

especiais e muito específicas, como transdutores para alta temperatura. AlN e ZnO têm um efeito piezelétrico muito mais fraco do que os outros materiais listados. Eles são geralmente adotados em configurações de filme fino em microescala (ALEXANDRU *et al*, 2018).

Os monocristais PMN-PT e PZN-PT demonstram as maiores propriedades piezelétricas, mas são mais sensíveis à mudança de temperatura, suscetíveis à fadiga e mais difíceis de fabricar do que o titanato de zirconato de chumbo (PZT). Portanto, o PZT ainda é o material piezelétrico mais popular nas aplicações de engenharia (YANG *et al*, 2018).

Depois da escolha do material constituinte o pó composto é então aquecido e compactado na forma desejada. Depois disso, os elementos experimentam um processo de queima de atingir uma estrutura cristalina densa. O resultado deste processo é geralmente uma pastilha de dimensões na ordem de alguns centímetros.

Após o termino da sua produção, o material ainda não apresenta fortes propriedades piezelétricas, pois os dipolos elétricos estão apontando em direções aleatórias. Para maximizar o efeito piezelétrico utiliza-se um processo chamado polarização (Figura 20). A polarização requer que o material piezelétrico seja aquecido acima de sua temperatura Curie ( $T_C$ ), depois os cristais são então colocados em um forte campo elétrico aonde os dipolos são organizados.

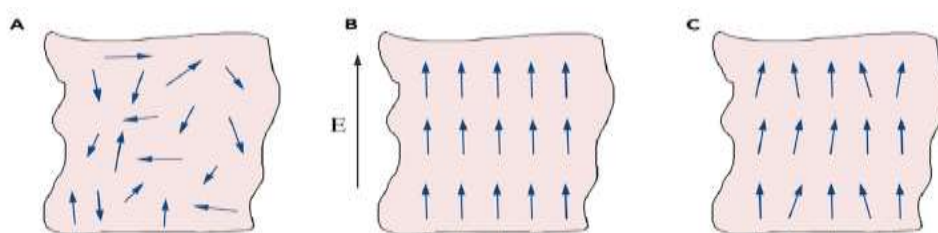


Figura 20 - (A) Orientação aleatória (B) Polarização m campo elétrico constante (C) Polarização depois da remoção do campo elétrico. (Yang *et al*, 2018)

### 3.2.4 Modos de Operação

Como os piezelétricos são materiais transversalmente isotrópicos, os efeitos são dependentes da direção. Por convenção a direção positiva de polarização é usualmente escolhida para ser coincidente com o eixo 3 como mostra a Figura 21 (RALIB, 2010). Esta direção é estabelecida durante a fabricação do material.

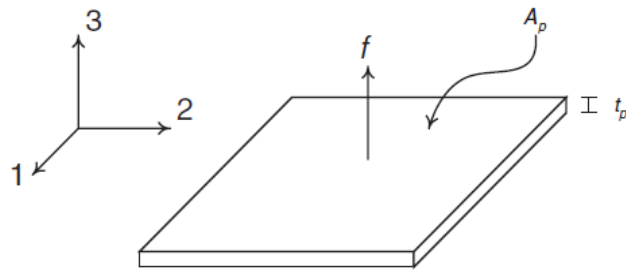


Figura 21 - Placa Piezoelétrica (RALIB, 2010)

De acordo com as direções de polarização e tensão mecânica, é possível categorizar dois modos principais de operação:  $d_{31}$  e  $d_{33}$ . Como ilustrado na Figura 22. No modo  $d_{31}$ , a direção de polarização é a “3”, isto é, o campo elétrico é perpendicular à direção da tensão aplicada “1”. Este é o modo de operação mais usado, principalmente em estrutura de viga de flexão. O modo  $d_{33}$  aparece em aplicações de compressão / tração direta com o eletrodo interligado. A polarização e a tensão aplicada estão na mesma direção.

Algumas aplicações também empregam o modo de cisalhamento, onde a constante de carga  $d_{15}$  desempenha o papel. Os elementos piezoelétricos que trabalham no modo de cisalhamento precisam de um tratamento especial, pois os eletrodos são formados em superfícies paralelas à direção da polarização.

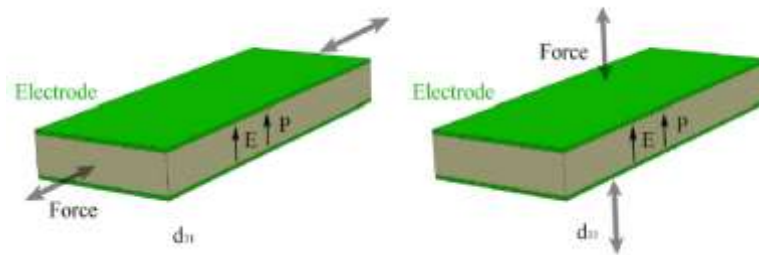


Figura 22 - Ilustração dos modos  $d_{31}$  e  $d_{33}$ . (Yang *et al*, 2018)

Como demonstrado na Tabela 2, geralmente tem-se:  $d_{15} \gg d_{33} > d_{31}$ . Para um PZT,  $d_{31} \approx 0.5d_{33}$ . A Tabela 2 resume as propriedades desses materiais piezoelétricos.

**Tabela 2** - Materiais piezelétricos e suas propriedades

	BaTiO <sub>3</sub>	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-8
<b>d<sub>31</sub> (10<sup>-12</sup> C/N)</b>	-78	-123	-171	-275	-97
<b>d<sub>33</sub></b>	149	289	374	593	225
<b>d<sub>15</sub></b>		496	584	741	330
<b>g<sub>31</sub> (10<sup>-3</sup> Vm/N)</b>	5	-11,1	-11,4	-9,1	-11
<b>g<sub>33</sub></b>	14,1	26,1	24,8	19,7	25,4
<b>k<sub>33</sub></b>	0,48	0,7	0,71	0,75	0,64
<b>Mechanical Q<sub>M</sub></b>	300	500	75	65	1000
<b>Dielectric Loss</b>		0,40%		2	0,40%
<b>Curie Temperature (°C)</b>	115	328	365	193	300

Fonte: Khan *et al.*, Caliò *et al.*, Uchino, Zhang *et al.*, e Yang e Zu.

As equações constitutivas unidimensionais de material piezelétrico apresentam transformação eletromecânica, sendo possível como modos de operação a direta e a inversa. O efeito inverso está associado à geração de tensão em resposta a um campo elétrico aplicado; por outro lado, o efeito direto está relacionado à carga elétrica que é uma resposta a uma tensão aplicada. O efeito piezelétrico direto, bem como o efeito piezelétrico inverso, pode ser expresso como uma relação entre tensão, deformação, campo elétrico e deslocamento elétrico.

As relações constitutivas são de extrema importância para entender o princípio de funcionamento do acoplamento eletromecânico. A seguir, apresenta-se o modelo constitutivo do material com memória de forma e em sequência o modelo de colheita de energia com um grau de liberdade utilizando um material piezelétrico acoplado a um elemento com memória de forma.

## Capítulo 4

### Modelos

#### 4.1 Modelo Polinomial para SMA – Falk

FALK (1980), desenvolveu um modelo onde examinou cristais únicos sob tensão de cisalhamento na direção  $\pm[110]$ . Restringiram a tensão cisalhante e na mesma direção, que deveria ser homogênea em todo cristal, de acordo com a Figura 23.

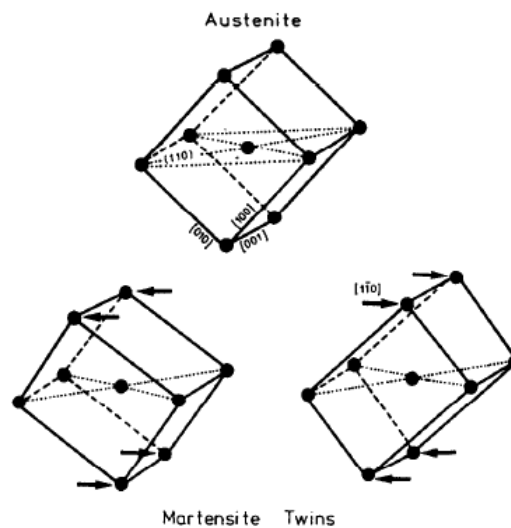


Figura 23- Estrutura de um cristal martensítico e austenítico (FALK, 1980).

Esse modelo, proposto por FALK (1980) e seus colegas de trabalho, é baseado na Teoria de Devonshire, considerando um polinômio no qual, nem as variáveis internas, nem o potencial de dissipação são necessários para descrever a pseudoelasticidade e o efeito de memória de forma. Posteriormente, PAIVA e SAVI (2006), realizaram uma revisão sobre o modelo anteriormente definido por Falk e será por ele que este trabalho será baseado.

Sendo assim, a energia livre é definida como uma equação polinomial de sexto grau, de um modo os pontos de equilíbrio representam as fases dos materiais com memória de forma. Para altas temperaturas ( $T > T_A$ ) a energia livre em função da deformação possui apenas um ponto de equilíbrio, representando o equilíbrio da fase austenítica. Para temperaturas intermediárias ( $T_M < T < T_A$ ), existem três mínimos correspondentes a duas fases estáveis, ou seja, austenítica (A), e as variantes martensita não maclada induzida por tensão (M+) e por

compressão (M-). E por último, em baixas temperaturas ( $T < T_M$ ), onde existe martensita estável e a energia livre deve ter dois pontos mínimos que são as duas variantes martensíticas (M+ e M-). A energia livre é apresentada como a Eq. 6:

$$W(\varepsilon, T) = \frac{a}{2}(T - T_M)\varepsilon^2 - \frac{b}{4}\varepsilon^4 + \frac{b^2}{24a(T_A - T_M)}\varepsilon^6 \quad (6)$$

onde  $\varepsilon$  é a deformação,  $T$  é a temperatura,  $a$  e  $b$  são constantes positivas do material,  $T_A$  é a temperatura acima onde a austenita é estável e  $T_M$  é a temperatura abaixo onde a martensita é estável. Portanto, segundo FALK (1980), a equação constitutiva da tensão é dada pela Eq. 7:

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} = a(T - T_M)\varepsilon - b\varepsilon^3 + \frac{b^2}{4a(T_A - T_M)}\varepsilon^5 \quad (7)$$

Com intuito de validar o modelo utilizado e aplicá-lo posteriormente neste trabalho, considerar-se-á inicialmente as constantes do material utilizadas por PAIVA e SAVI (2005), sendo  $a = 1 \times 10^3$  MPa/K;  $b = 40 \times 10^6$  MPa/K;  $T_M = 287$ K;  $T_A = 313$  K. A partir desses valores, com o auxílio do software MATLAB, foram geradas as curvas de Energia Livre x Deformação e Tensão x Deformação, considerando três diferentes temperaturas:  $T=283$ K,  $T=298$ K e  $T=323$ K.

Na Figura 24, considerando  $T = 283$  K, temperatura abaixo de  $T_M$ , pode-se verificar na curva dois pontos de mínimo, o que de acordo com a teoria apresentada a respeito do modelo constitutivo anteriormente, indicaria que ocorrem duas fases estáveis: Martensita não maclada induzida por compressão (M-) e por tração (M+).



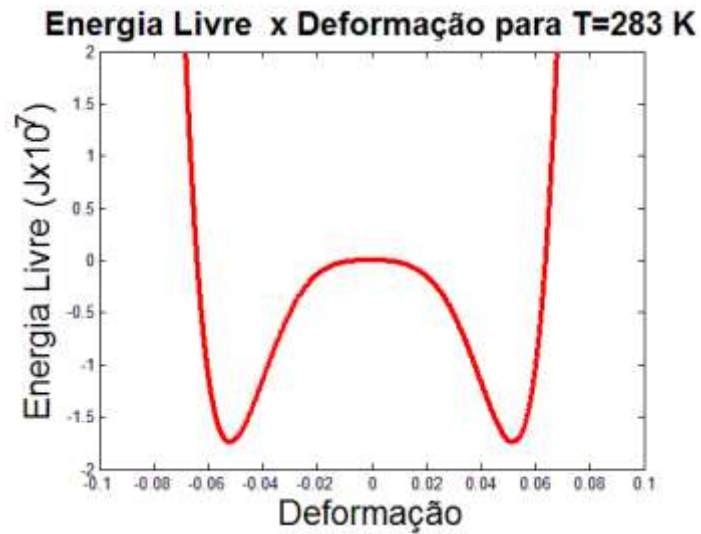


Figura 24 - Curva Energia Livre x Deformação para T=283 K

Na Figura 25 já pode-se observar um comportamento diferente da curva. Como a temperatura considerada é de 298 K, já pode-se verificar a existência de três pontos de equilíbrio, o que segundo a teoria apresentada seria uma outra fase estável além das citadas anteriormente, a fase austenítica. Isso acontece, pois,  $T$  está entre  $T_M$  e  $T_A$  e com isso nota-se as duas fases ainda presentes no material.

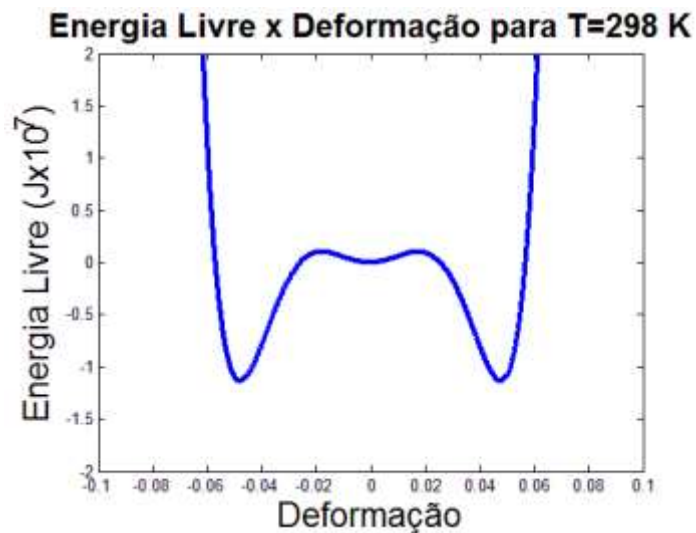


Figura 25 - Curva Energia Livre x Deformação para T=298 K

Na Figura 26, considerando a temperatura de 323 K, só se pode verificar um ponto de mínimo, o que indica somente uma fase estável. Como  $T$  nesse caso é maior que  $T_A$ , a única fase presente é a austenítica.



Figura 26- Curva Energia Livre x Deformação para T=323 K

A Figura 27 (a), (b) e (c) demonstram a curva Tensão x Deformação para cada temperatura especificada anteriormente, evidenciando os efeitos de memória de forma da SMA e pseudoelástico que também podem ser verificados, sem a histerese presente.

A relação constitutiva para a tensão apresentada na Eq. 7, será usada no modelo de geração de energia com o material piezoeletrico. A força de restituição que o elemento com memória de forma fará no material piezoeletrico será dada pela tensão multiplicada pela área do elemento SMA.

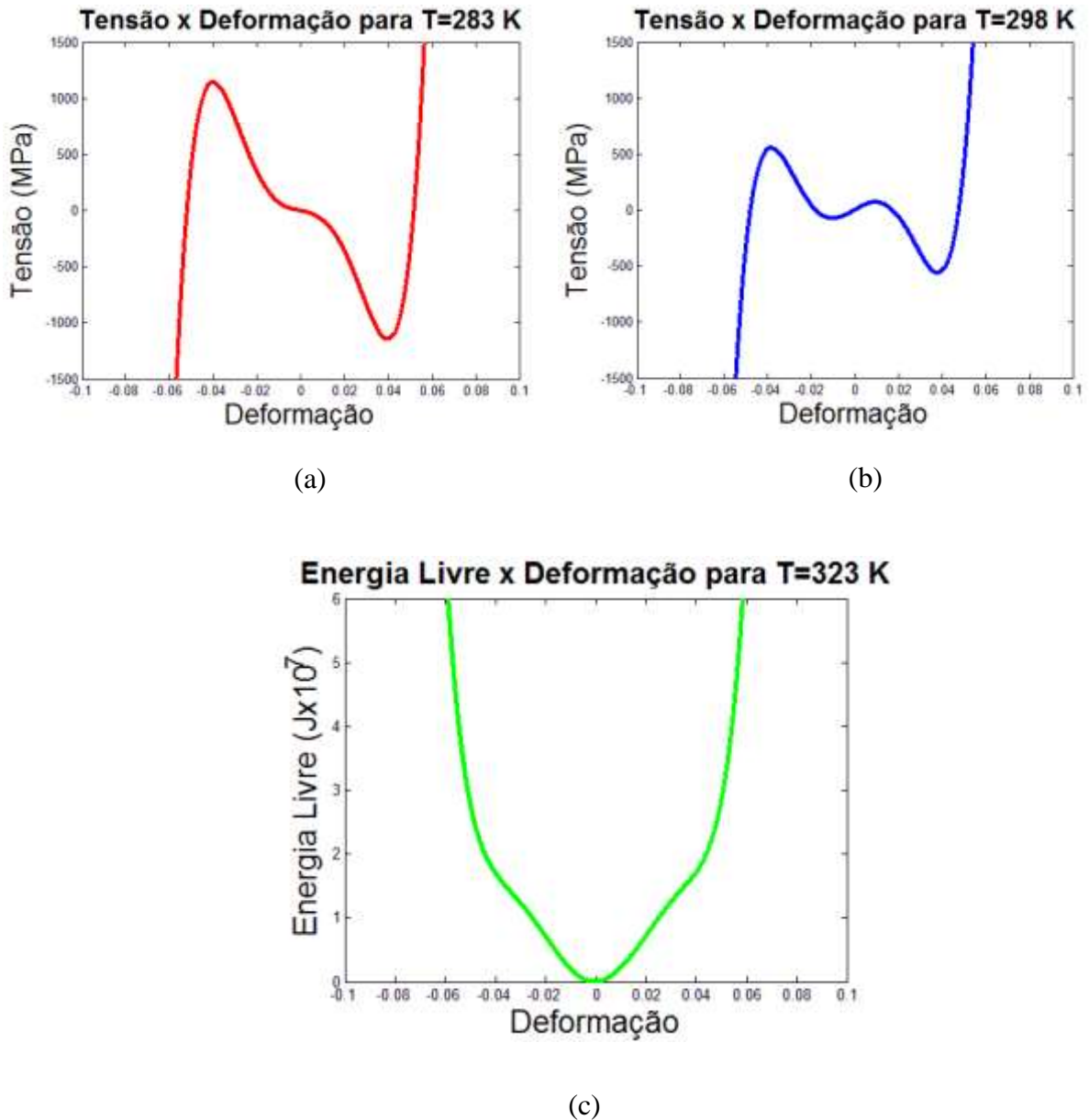


Figura 27- Tensão x Deformação para (a) T=283K (b) T=298K (c)T=323K

## 4.2 Modelo de Geração de Energia com Piezelétrico Acoplado a um Elemento SMA

O modelo arquetipo de um sistema de colheita de energia consiste de um oscilador mecânico acoplado a um circuito elétrico através de um elemento piezelétrico. Considere, portanto, o sistema com um grau de liberdade (1GdL) mostrado na Figura 28. O sistema possui massa  $M$ , deslocamento relativo  $x$  e o deslocamento da base  $u$ . O sistema possui ainda força de restituição definida por uma mola com constante  $k$  e amortecimento viscoso linear definido por

$\gamma$ . Além disso, o sistema possui um elemento piezelétrico que promove a conversão eletromecânica, definidos pelo coeficiente  $\theta$ . Define-se a resistência elétrica como  $R$  e o capacitor como  $C$ . A força de restituição de um elemento com memória é dada por  $\sigma A_{SMA}$ , sendo  $\sigma$  dada pela equação constitutiva apresentada na equação 7 e  $A_{SMA}$  é a área da seção reta do elemento de SMA. O comportamento do sistema é modelado como segue:

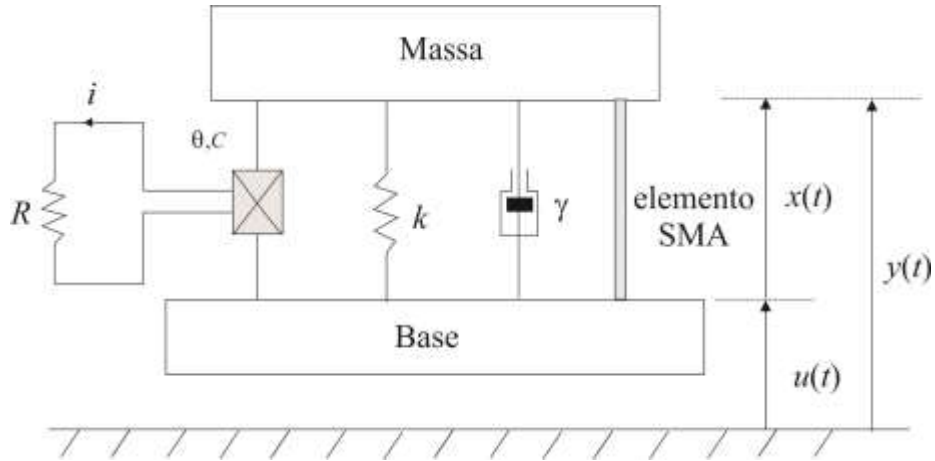


Figura 28- Modelo de geração de energia.

Fazendo o equilíbrio mecânico, chega-se a um sistema do tipo dado pela Eq. 8 e Eq. 9:

$$m\ddot{x} + \gamma\dot{x} + kx - \Theta V + \left[ a(T - T_M)x - bx^3 + \frac{b^2}{4a(T_A - T_M)}x^5 \right] A_{SMA} = -m\ddot{u} \quad (8)$$

$$\Theta\dot{x} + C\dot{V} + \frac{1}{R}V = 0 \quad (9)$$

onde  $\ddot{u} = \delta \text{sen}(\omega t)$ . A potência gerada no sistema de colheita de energia pode ser avaliada considerando a potência instantânea  $P = V^2/R$

A ideia é mostrar o comportamento geral do sistema, explorando a potência gerada. O método de Runge-Kutta de quarta ordem é utilizado para obter os resultados. Foi utilizada a linguagem de programação C para depurar o modelo. Foi utilizado o software gráfico *OriginLab* para análise de dados e estatística.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados na simulação. Os parâmetros utilizados foram tirados de (KIM *et al.*, 2010) e (PAIVA e SAVI, 2005).

**Tabela 3** – Parâmetros empregados no modelo (Kim *et al.*, 2010) e (Paiva e Savi, 2005).

$m$ (kg)	$C$ (F)	$R$ ( $\Omega$ )	$\gamma$ (Nsm <sup>-1</sup> )	$k$ (Nm <sup>-1</sup> )	$\theta$ (NV <sup>-1</sup> )
0.00878	$4.194 \times 10^{-8}$	$100 \times 10^3$	0.219	4150	-0.004688
$\delta$ (m/s <sup>2</sup> )	$a$ (MPa/m <sup>3</sup> .K)	$b$ (MPa/m.K)	$T_M$ (K)	$T_A$ (K)	
2.5	$1 \times 10^3$	$40 \times 10^6$	287	313	

A Figura 29 mostra os resultados de deslocamento máximo em função da frequência para os casos de piezelétrico sem o elemento de memória de forma e com elemento com memória de forma para cinco temperaturas 283 K ( $T < T_M$ ), 293 K ( $T_M < T < T_A$ ), 303 K ( $T_M < T < T_A$ ), 333K ( $T > T_A$ ) e 363 K ( $T > T_A$ ). Pode-se notar que com o controle de temperatura é possível deslocar as frequências de ressonância de forma a tornar o dispositivo um sistema banda larga.

A Figura 30 mostra os resultados de potência elétrica máxima gerada em função da frequência. Na Figura 30 verifica-se que ocorre uma diminuição na geração de energia conforme é aquecido o material com memória de forma, efeito este em função do aumento da rigidez do sistema. O modelo demonstrou que a presença do elemento *SMA* pode alterar de modo bastante expressivo o comportamento do sistema.

Na Figura 29 e Figuras 30, ao inserir a mola de *SMA* verifica-se que para as temperaturas acima de 283K o ponto de ressonância se desloca para a direita, ou seja, a frequência de ressonância aumenta, com exceção da temperatura de 283K. Tal comportamento se justifica por conta do modelo numérico utilizado, modelo de Falk. Como pode-se verificar analisando a Equação 8, o termo  $a(T - T_M)x$  em temperaturas onde  $T > T_M$ , o termo citado fica positivo, aumentando a rigidez do sistema, justificando então deslocamento do ponto de ressonância para direita para temperaturas acima de  $T_M$ , o mesmo não acontece para  $T < T_M$  – pois o termo torna-se negativa o faz o ponto ressonância diminuir de frequência e aparecer à esquerda do gráfico.

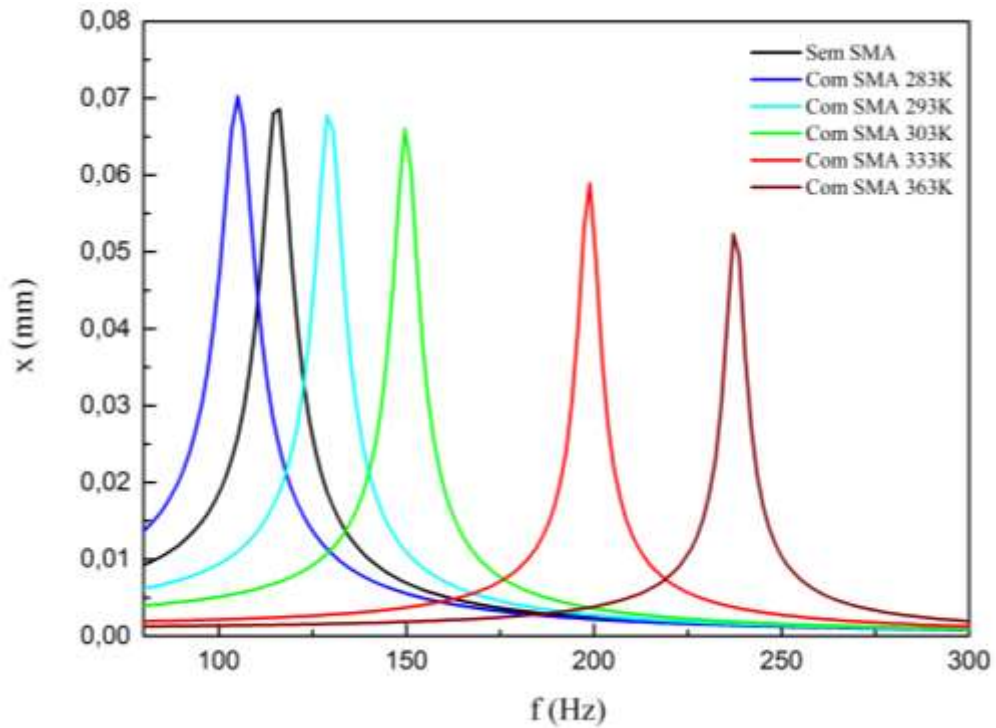


Figura 29 – Deslocamento  $x$  frequência : sem SMA e com SMA em cinco temperaturas 283 K ( $T < T_M$ ), 293 K ( $T_M < T < T_A$ ), 303 K ( $T_M < T < T_A$ ), 333K ( $T > T_A$ ) e 363 K ( $T > T_A$ ).

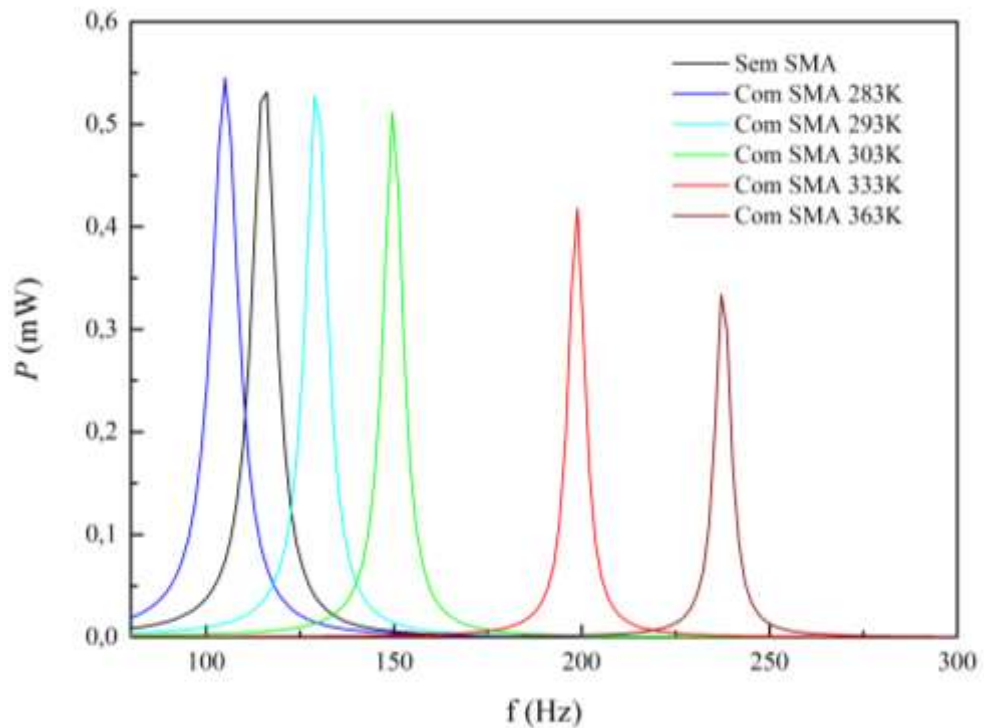


Figura 30— Potência elétrica em função da frequência : sem SMA e com SMA em cinco temperaturas 283 K ( $T < T_M$ ), 293 K ( $T_M < T < T_A$ ), 303 K ( $T_M < T < T_A$ ), 333K ( $T > T_A$ ) e 363 K ( $T > T_A$ ).

## Capítulo 5

### Metodologia Experimental e Resultados de Caracterização

Neste capítulo, será apresentado a metodologia experimental desenvolvida no projeto. O intuito deste modelo experimental é avaliar o desempenho e o comportamento de um material piezelétrico acoplado a elementos de ligas com memória de forma, para geração de energia. Uma série de experimentos preliminares foram executados com o objetivo de caracterizar o elemento de *SMA* (mola) e o sistema de geração de energia (piezelétrico acoplado a viga). Em seguida, o ensaio experimental foi dividido em duas etapas, sendo a segunda dividida em quatro condições diferentes de temperatura. Segue abaixo as duas etapas e suas condições de teste:

- 1) Viga de Alumínio (Comprimento 305 mm, Base de 30 mm e Espessura de 2,4 mm) com um piezelétrico acoplado: Uma extremidade engastada ao shaker e a outra extremidade livre para vibrar
- 2) Viga de Alumínio, mesma citada anteriormente, com um piezelétrico acoplado e mola de *SMA*: Uma extremidade engastada ao shaker e a outra extremidade possui uma mola de *SMA*. A mola de *SMA* foi submetida a quatro condições de temperatura diferentes através do efeito Joule.

#### 5.1 Equipamento Utilizados

A Figura 31 mostra o esquema final do experimento montado e na Figura 32 pode-se visualizar a montagem do experimento com os equipamentos usados. Os seguintes equipamentos foram utilizados: 2 Computadores; 2 Transdutores de sinal – *OPTONNCDT*; 1 Fonte *TOELLNER TOE 8951*; 1 Painel Agregador *NATIONAL INSTRUMENTS*; 1 Controlador do *shaker CRYSTAL*; 1 *Shaker V350* da *Data Physics*; 1 Célula de Carga de 20 kg; 1 Amplificador do *shaker*.

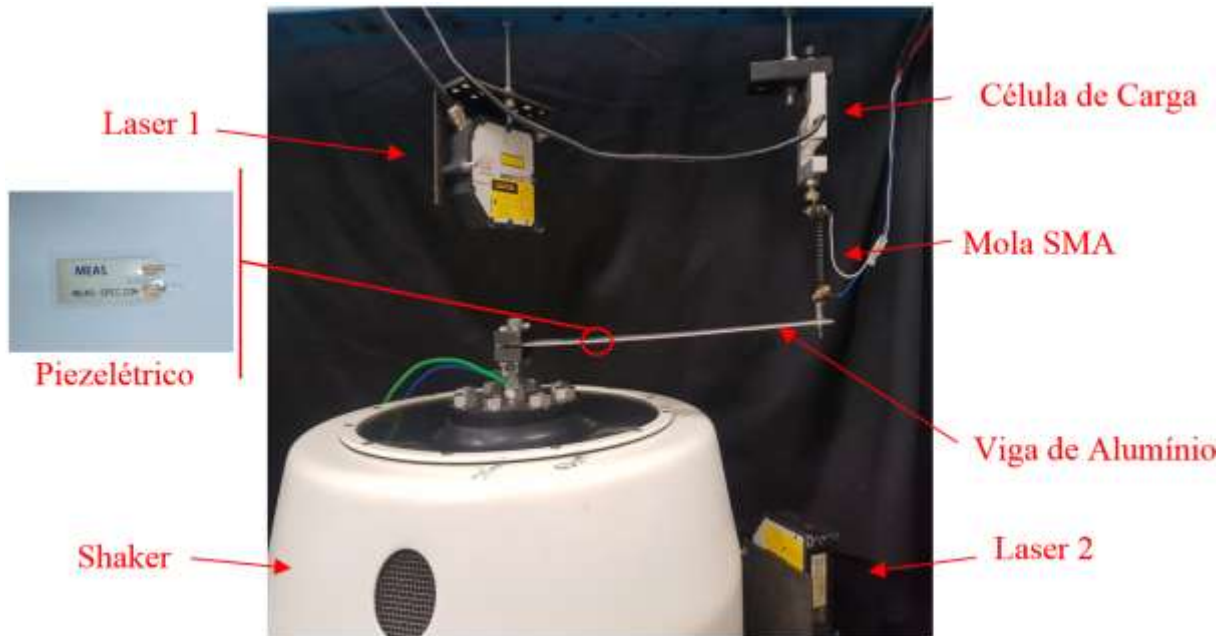


Figura 31- Esquema final do experimento

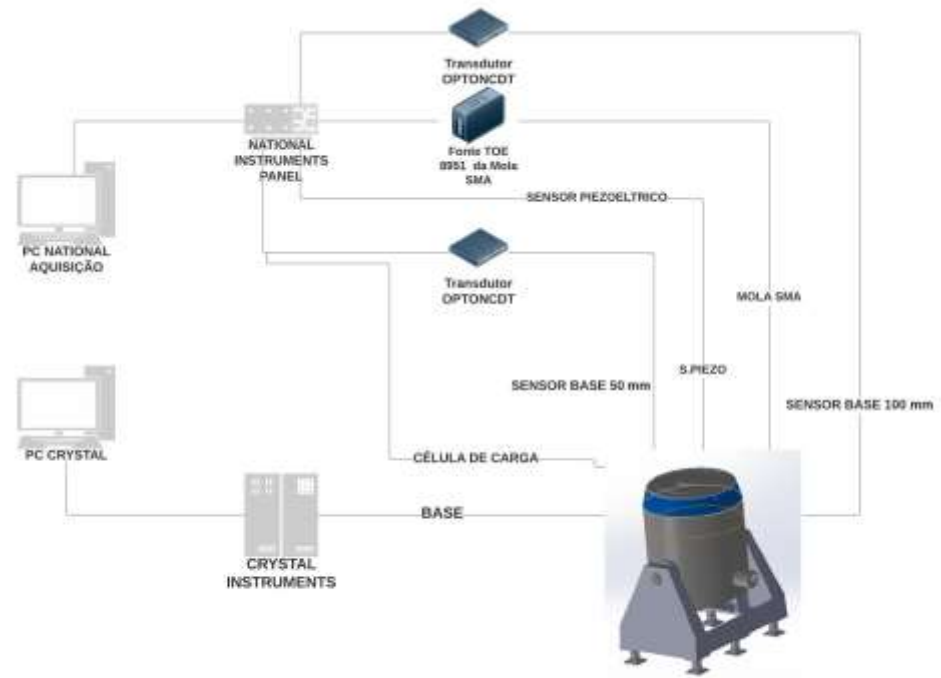


Figura 32 - Montagem do Experimento.



Em resumo, tem-se dois sistemas independentes: um para geração da vibração do shaker e outro para aquisição e registros dos dados, aonde será plotado os gráficos apresentados neste estudo. Uma ilustração mais detalhada do Shaker pode ser vista no ANEXO A, nas Figuras 53 e 54.

### 5.1.1 Equipamento de Excitação de Vibração Mecânica – *Shaker*

O equipamento utilizado para excitação de vibração mecânica foi um Shaker eletromecânico disponível no *LACTM* (Laboratório de Análise do Comportamento Termomecânico dos Materiais), laboratório localizado no *CEFET/RJ*. O modelo utilizado foi o *V350* da *Data Physics* acoplado a um sistema de controle de vibração da *Cristal Instruments* modelo *Spider 81*. A ilustração do shaker está sendo mostrada na Figura 33.



Figura 33 - Shaker modelo V350 e o sistema de controle de vibrações.

O sistema de controle de vibrações do *shaker* é composto pelo equipamento de controle, um acelerômetro e um computador. Foi utilizado o acelerômetro da fabricante *Dytran*, modelo *3055D4*, para conectar o *shaker* ao seu sistema amplificador.

### 5.1.2 Sistema de aquisição de dados National Instruments

Foi utilizado o sistema de aquisição de dados da *National Instruments*, cujo modelo é o *NI Cdaq-9174*. Os módulos utilizados foram o NI 9220, onde foram ligados o sensor piezelétrico, transdutores de deslocamento e o NI 9237, onde foi ligado a célula de carga. A união dos sinais medidos é feita pelo sistema de aquisição, Figura 34.

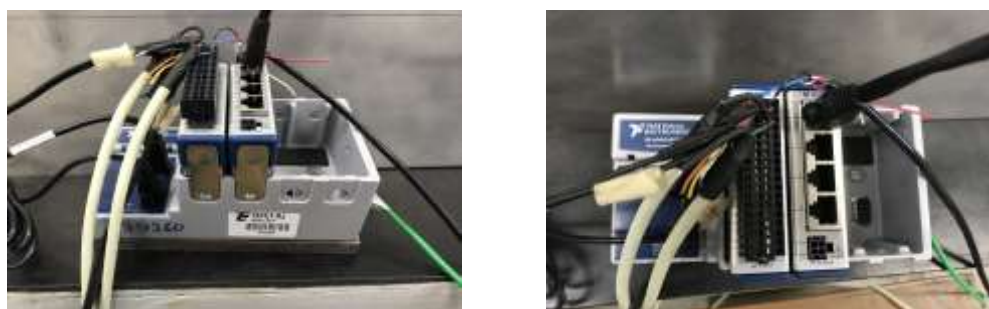


Figura 34 – Sistema de aquisição de dados National Instruments.

### 5.1.3 Sensor Piezelétrico

As amostras piezelétricas disponíveis no *LACTM* foram obtidas através do fabricante *MEAS* modelo *DT2-028K*. As Figuras 35 e 36 mostram o modelo utilizado.

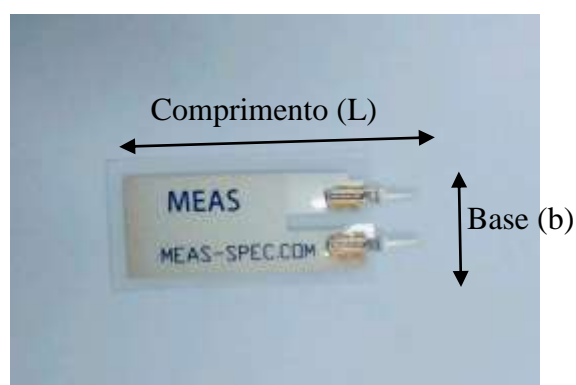


Figura 35 – Elemento piezelétrico utilizado. MEAS – Modelo LDT0-028K.

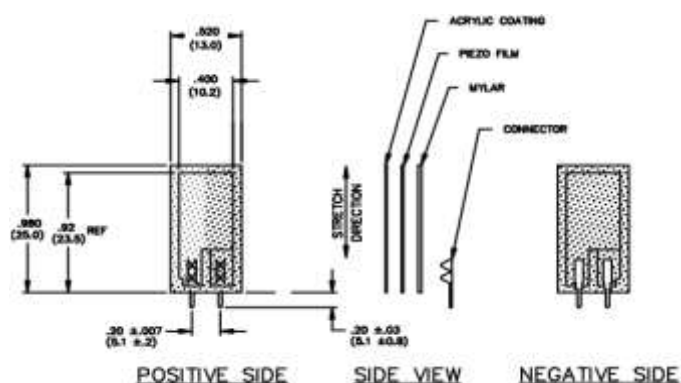


Figura 36 – Elemento piezelétrico utilizado. MEAS – Modelo LDT0-028K. (Datasheet da TE Connectivity Ltd. Family of companies, 2015).

A amostra de piezelétrico utilizada no projeto possui comprimento de 25 mm, base de 13 mm e espessura de 0,28 mm.

#### 5.1.4 Transdutores de Deslocamento

Os transdutores de deslocamento tipo laser serviram para acompanhamento da resposta do sistema. O Laser 1 (modelo 50 mm) é posicionado para medir o deslocamento na extremidade engastada da viga representando a excitação de base da viga. O Laser 2 (modelo 100 mm) é posicionado para medir o deslocamento da extremidade não excitada (livre) ou acoplada à mola de *SMA*. Ambos os sensores são da marca *Micro-Epsilon* ( $\mu\epsilon$ ) modelo *optonNCDT 2200*. A Figura 37 mostra os transdutores laser utilizados no experimento.

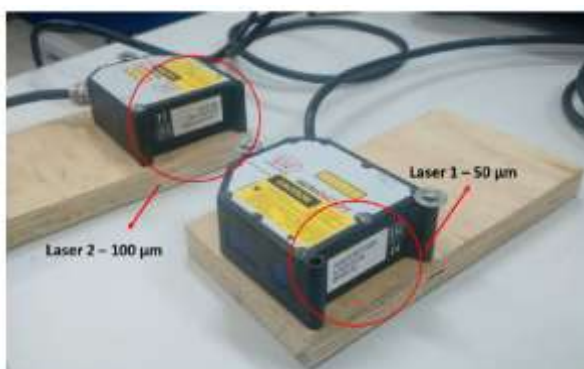


Figura 37 - Transdutores de posição tipo laser: Laser 1 - 50 mm e Laser 2 – 100 mm.

### 5.1.5 Célula de Carga

Para a medição da força que a mola de *SMA* produziu nos testes foi utilizada uma célula de carga. A célula escolhida foi a do fabricante Líder Balanças de modelo CS 20 com capacidade para 20 kg. A célula de carga pode ser vista na Figura 38.

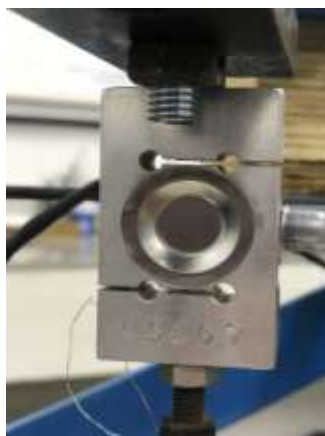


Figura 38 – Célula de carga. Líder Balanças – modelo CS 20

### 5.1.6 Mola de *SMA*

Foi utilizada uma mola de *SMA* comercial da *Flexinol* feita de Ni-Ti disponível no *LACTM (CEFET/RJ)*. A mola apresenta efeito memória de forma (*EMF*) à temperatura ambiente.

A Figura 39 mostra a mola em questão e a Tabela 4 mostra suas propriedades e características mecânicas. A rigidez da fase martensítica e austenítica foram extraídas do ensaio de tração que será comentado posteriormente (Seção 5.2).



Figura 39 - Mola SMA Flexinol

A Tabela 4 fornece as características na mola de SMA.

**Tabela 4** – Propriedades da mola SMA com estrutura martensítica.

Rigidez inicial a temperatura ambiente	≈142,5 N/m
Diâmetro do fio da mola	0,8 mm
Diâmetro interno da mola	5,6 mm
Número de espiras ativas	20
Comprimento Inicial livre de tensão	25 mm

ADEODATO (2017) realizou um ensaio DSC – *Differential Scanning Calorimetry* com amostra retirada da mola Flexinol (efeito memória de forma), obtendo os resultados encontrados na Tabela 5.

**Tabela 5** – Temperaturas de Transformação de fase da mola de memória de forma. Fonte: ADEODATO (2017)

Fio (mm)	Temperaturas Críticas de transformação – Média (°C)			
	$M_f$	$M_s$	$A_s$	$A_f$
0,80	31,75	41,65	26,1	50,04

### 5.1.7 Fonte de corrente elétrica

A mola de *SMA* (efeito memória de forma à temperatura ambiente) utilizada no experimento, foi aquecida via Efeito Joule com a intenção de promover a alteração de suas propriedades mecânicas alterando principalmente suas características de rigidez e dissipação. Com isso, é possível alterar o comportamento dinâmico do sistema estudado através da alteração da temperatura da mola. Utilizou-se correntes constantes em 4 situações diferentes para 0 A, 0,5 A, 1,5 A e 2,5 A.

A fonte de corrente elétrica utilizada para aquecer a mola será mostrada na Figura 40.



Figura 40- Fonte TOELLNER TOE 8951

## 5.2 Ensaio de Caracterização Mecânica da Mola *SMA*

Inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização mecânica da mola de *SMA* a diferentes temperaturas. Estes ensaios são importantes, pois visam a obtenção de parâmetros relevantes como os valores de rigidez da fase austenítica e martensítica da mola *SMA* e as tensões de início e fim das transformações. Durante os ensaios, a temperatura não foi medida diretamente, pois existe a dificuldade da implementação de termopares diretamente na superfície da amostra *SMA* com diâmetro reduzido. Portanto, na ausência de uma técnica precisa e confiável para a medição direta da temperatura da mola *SMA*, os diferentes comportamentos de *SMA*, memória de forma e efeito pseudoelástico, foram associados a valores de corrente elétrica.

### 5.2.1 Ensaio de Tração

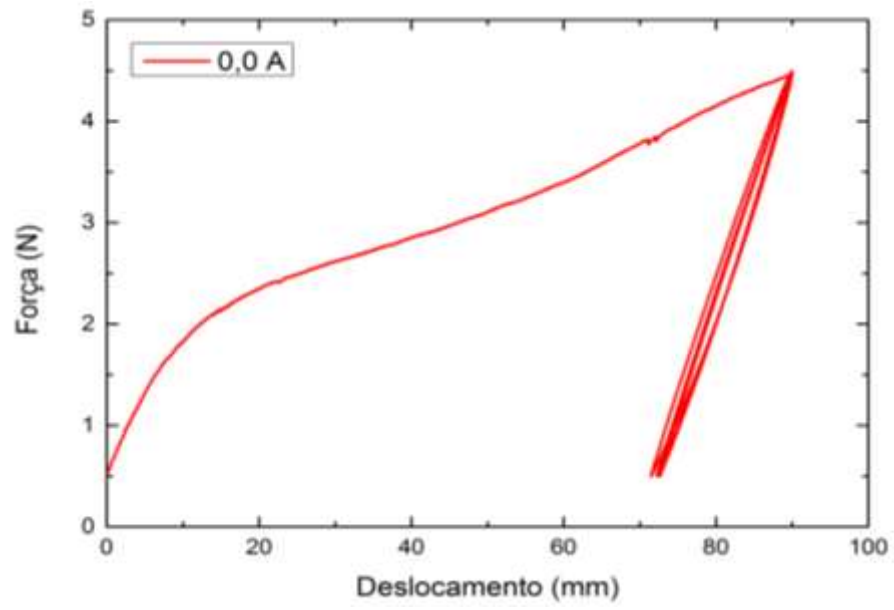
O primeiro ensaio preliminar realizado foi o teste de tração na *Instron* com a mola de memória de forma. Antes de tracioná-la, foi realizado um ciclo térmico onde foi mantida uma corrente elétrica de 2,0 A, durante 60 segundos. Posteriormente a mola foi resfriada até a temperatura ambiente (24 graus Celsius) por 5 minutos sem auxílio de fonte externa. O objetivo do ciclo térmico foi uma tentativa de homogeneizar a microestrutura do material e remover possíveis tensões residuais de outros ensaios termomecânicos.

Assim, a mola foi fixada na *Instron* para que o teste de tração quase estático fosse realizado, possuindo uma deformação prescrita máxima de 90 mm, uma taxa de deformação de 2 mm/min, contendo 4 ciclos mecânicos de carregamento e descarregamento. O resultado do teste de tração realizado na *Instron* pode ser visto na Figura 41-a.

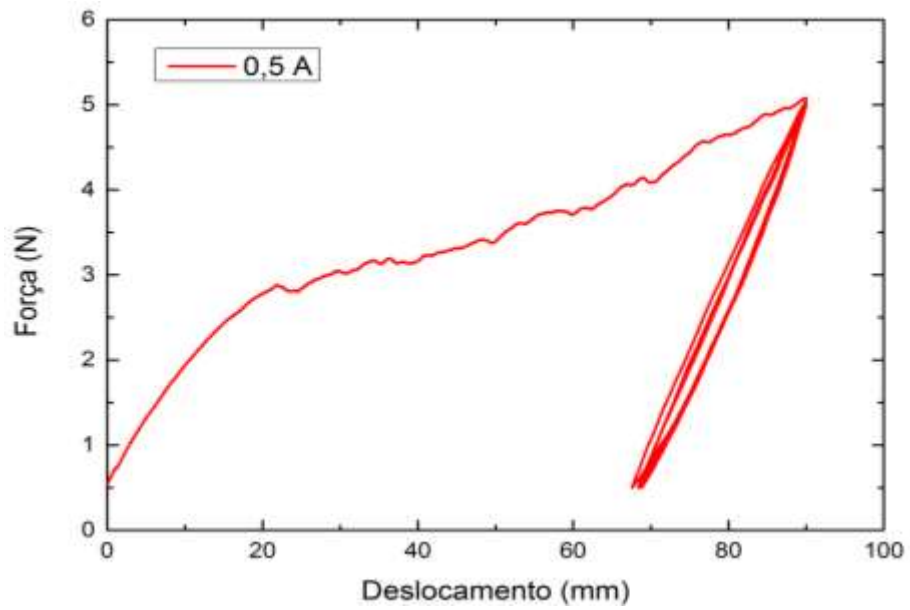
As Figuras 41-b, 41-c e 41-d, mostram o ensaio de tração realizado. O ensaio foi semelhante ao com a mola à temperatura ambiente, tendo mesma taxa de deformação. As Figuras mostram o aumento da corrente no decorrer dos ensaios. Antes de iniciar um novo ensaio, era realizado um novo ciclo térmico conforme descrito. A temperatura ambiente dos ensaios estava entre 24°C e 25°C medida com um termopar.

Na Figura 41-a, ocorre reorientação das maclas e transição de martensita maclada para não maclada. Na Figura 41-b, vê-se o efeito memória de forma acontecendo, ocorrendo a mesma reorientação que acontece na figura anterior com o aumento da força crítica de escoamento de 1,5 N para aproximadamente 2,2 N. Na Figura 41-c, vê-se o efeito pseudoelástico, a mola está aquecida predominando estrutura austenítica, depois do carregamento ocorre a transformação de Austenita para Martensita não maclada. Na Figura 41-d em 2,5 A, a temperatura de carregamento está tão alta que não ocorre a transformação de fase ficando assim em regime linear, ou seja, apresentando fase austenítica durante todo o ensaio.

Na Figura 41-a, a mola apresentou rigidez  $k_{mola} = 138,79$  N/m para martensita maclada e  $k_{mola} = 213,19$  N/m para martensita não maclada. Na Figura 41-b, a mola apresentou rigidez  $k_{mola} = 144,33$  N/m para Martensita maclada e  $k_{mola} = 203$  N/m para martensita não maclada. Na Figura 41-c, a mola apresentou  $k_{mola} = 230,40$  N/m para austenita e  $k_{mola} = 173,96$  N/m para martensita não maclada. Na figura 41-d, a mola apresentou  $k_{mola} = 286,39$  N/m para austenita.

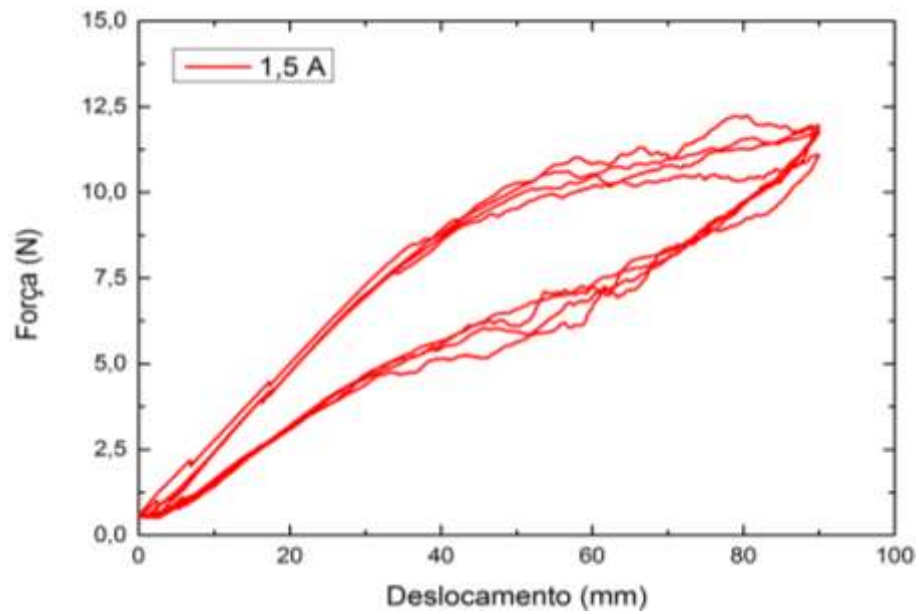


(a)

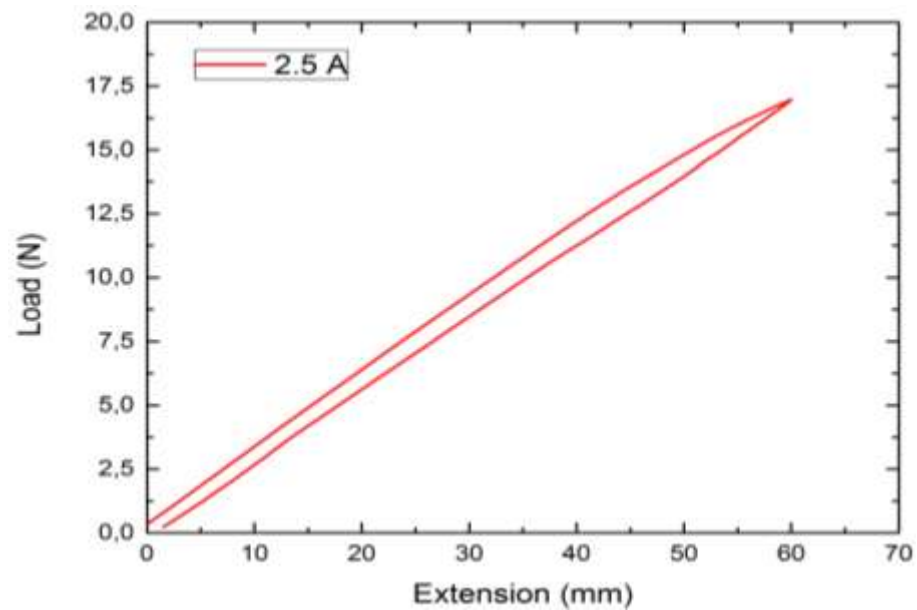


(b)





(c)



(d)

Figura 41- Ensaio de tração com mola em: 0,0A; (b) Mola à 0,5 A (c)Mola à 1,5 A (d) 2,5 A.

### 5.2.2 Ensaio Dinâmicos com Extremidade Livre

Além da caracterização quase estática, foi necessário a realização de ensaios dinâmicos no *shaker* com intuito de definir algumas propriedades da resposta do sistema.

Foi realizado um teste, conforme citado acima, onde uma barra foi engastada ao *shaker*, tendo a sua outra extremidade livre. Esse teste foi feito para perceber o comportamento linear com o aumento da amplitude de deslocamento da base e para definir melhor taxa de avanço de frequência de excitação.

A Figura 42 mostra o diagrama Deslocamento x Frequência, variando a taxa de avanço de frequência de excitação. O intuito desse diagrama é definir a melhor taxa de avanço para o sistema. De acordo com os testes e visualização desse diagrama, pode-se perceber que o sinal fica mais limpo com a diminuição da taxa. Com 0,5 Hz/s e 0,25 Hz/s, percebe-se um batimento no decorrer do sinal propagado, não sendo favorável para o ensaio. Com 0,05 Hz/s e 0,1 Hz/s, o sinal fica mais preciso, mostrando que são as melhores taxas de avanço para se trabalhar. Como 0,05 Hz/s torna o ensaio muito demorado, foi escolhida a taxa de avanço de 0,1 Hz/s para se trabalhar no decorrer do projeto.

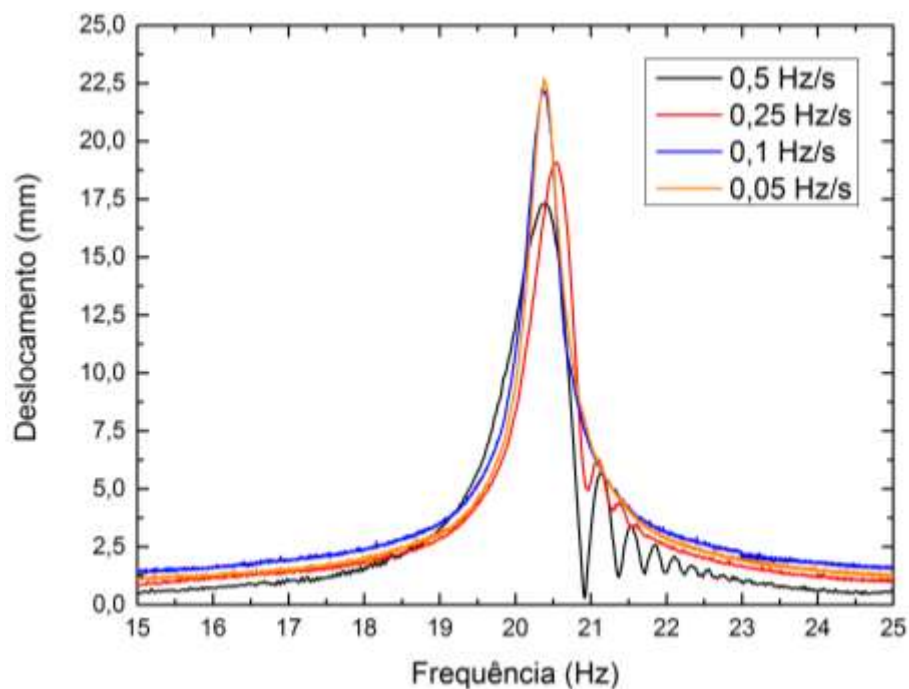


Figura 42 – Ensaio dinâmico variando a taxa de avanço de frequência de excitação.

A Figura 43 mostra o diagrama deslocamento x frequência, como resposta do ensaio dinâmico preliminar realizado. O intuito desse diagrama é mostrar o comportamento do deslocamento da extremidade da viga quando ocorre a variação da amplitude de deslocamento da base. De acordo com o diagrama, percebe-se o comportamento de resposta do sistema (considerando pequenos desvios).

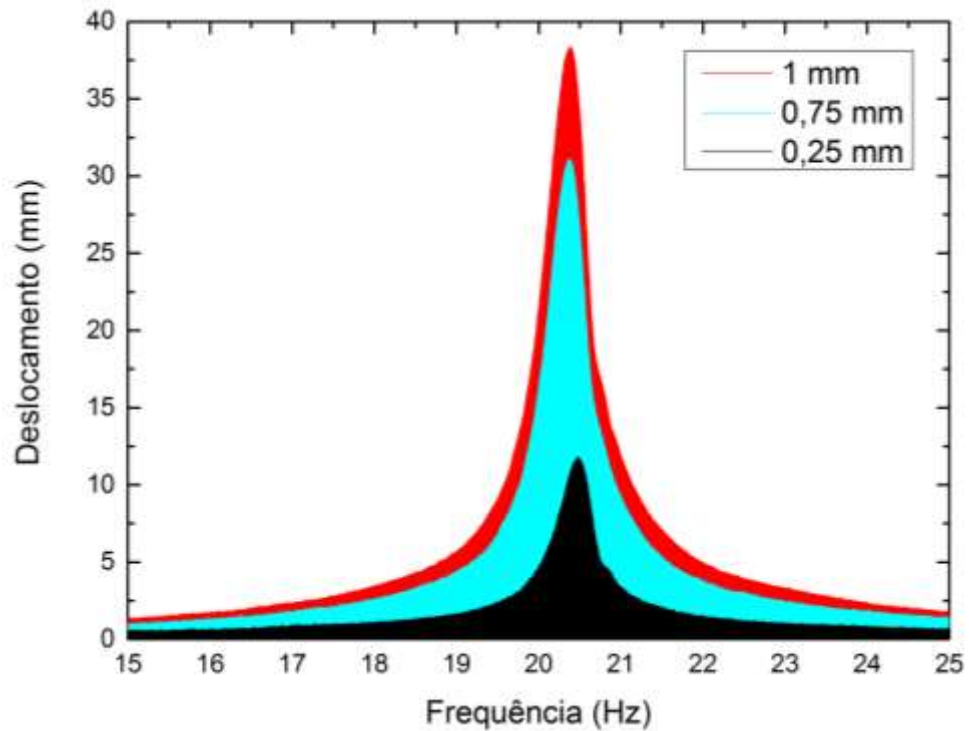


Figura 43 – Ensaio dinâmico na frequência de ressonância e variando a amplitude de deslocamento da base.

### 5.3 Ensaios Dinâmicos com mola de *SMA* na extremidade

A segunda parte dos ensaios experimentais constituiu-se de uma viga de alumínio mono engastada perpendicularmente ao eixo do shaker, com um piezelétrico acoplado a esta, e por fim uma mola de *SMA* acoplada a extremidade livre anteriormente.

Os testes foram feitos com temperatura ambiente do laboratório entre 24 °C e 26 °C controlada pelo ar condicionado do laboratório e medida com um termopar. Antes da realização da sequência de ensaios, em todas as etapas foi realizado um ciclo térmico com objetivo de fazer as propriedades da mola voltarem às fases inicial. Essas etapas foram:

- 1) Foi estabelecida a condição de 0,0A de corrente elétrica na mola de *SMA* e em seguida foi dada a pré-extensão de 60 mm na mola, dando início ao teste;
- 2) Aliviou-se a pré-extensão, e em seguida, esquentou a mola com 2,0 A por 60 segundos. Esperou-se que a mola resfriasse por 5 minutos. Com a mola resfriada, ajustou-se a corrente desejada, sendo a primeira de 0,5 A, esquentando assim a mola novamente. Antes de realizar o teste, foi dada uma nova pré-extensão de 60 mm, para que a mola já estivesse tensionada;

3) Foi feito o mesmo ciclo térmico do item 2, antes de ser colocado as próximas correntes, que foram 1,5 A e 2,5 A. Em todos os testes foram dadas as pré-extensões de 60 mm, antes que o teste pudesse ser efetuado.

### 5.3.1. Resultados para Amplitude de deslocamento da base de 0,1 mm

O primeiro teste foi feito com amplitude de deslocamento da base de 0,1 mm e taxa de avanço de frequência de excitação de 0,1 Hz/s.

Na Figura 44, é mostrado o diagrama de Tensão Elétrica x Frequência, onde mostra testes com correntes de 0,0 A, 0,5 A, 1,5 A e 2,5 A. Pode-se perceber que o fenômeno de ressonância do teste com corrente a 1,5 A ocorreu com menor frequência a 23,50 Hz. Já na condição de 2,5 A ocorreu com maior frequência a 25,44 Hz. Desta forma, pode-se perceber que o dispositivo é capaz de apresentar a condição de ressonância em uma faixa de aproximadamente 2 Hz, mostrando-se eficiente em uma faixa de frequência maior do que um dispositivo convencional onde só apresenta uma única frequência de ressonância, perdendo capacidade de geração de energia caso a frequência varie.

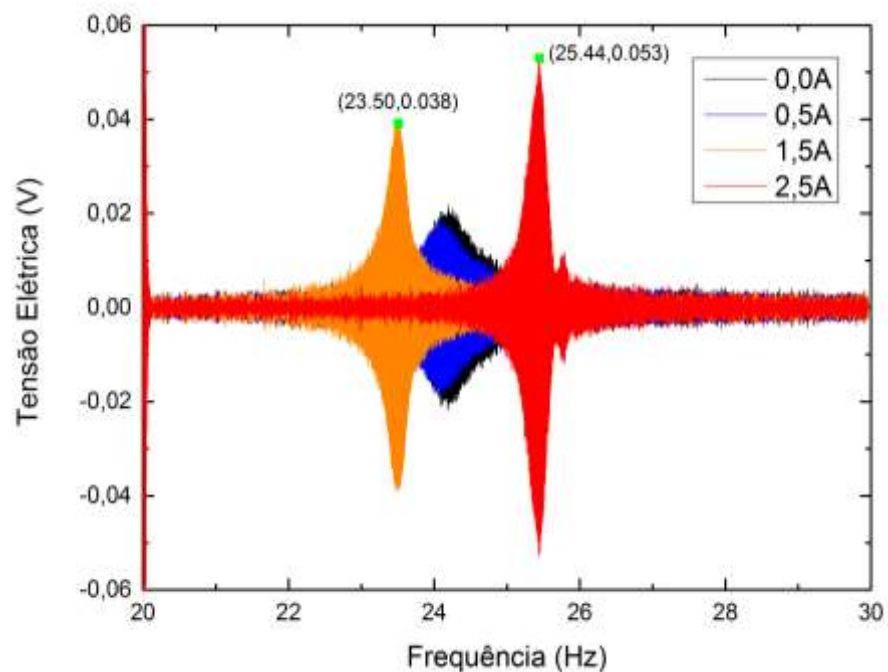


Figura 44 – Diagrama Tensão Elétrica x Frequência com amplitude de deslocamento de base 0,1 mm.

A Figura 45 mostra o diagrama Deslocamento da Extremidade da barra por Frequência, mostrando que o teste com corrente de 1,5 A teve efeito de ressonância em uma frequência de

23,48 Hz e o teste com corrente de 2,5 A teve efeito de ressonância em uma frequência de 25,40, apresentando uma faixa de 1,92 Hz, concordando com o diagrama anterior.

Conforme o modelo numérico apresentado na seção 4.2, o esperado antes da realização do ensaio era que a frequência de ressonância aumentasse conforme a mola fosse aquecida. Entretanto, no ensaio verifica-se que a frequência de ressonância diminui quando se varia a corrente de 0,0 A para 1,5 A. Esse acontecimento pode ser explicado pelo fator de amortecimento do sistema não ser controlado e estar competindo com a rigidez do mesmo.

Verifica-se também que no ensaio experimental ocorre um aumento no deslocamento da extremidade conforme o incremento da corrente elétrica, divergindo-se do que se verifica no modelo numérico. Estes efeitos estão extremamente relacionados com as dissipações devido às transformações de fase, características essas que o modelo constitutivo de Falk para as SMAs não captura.

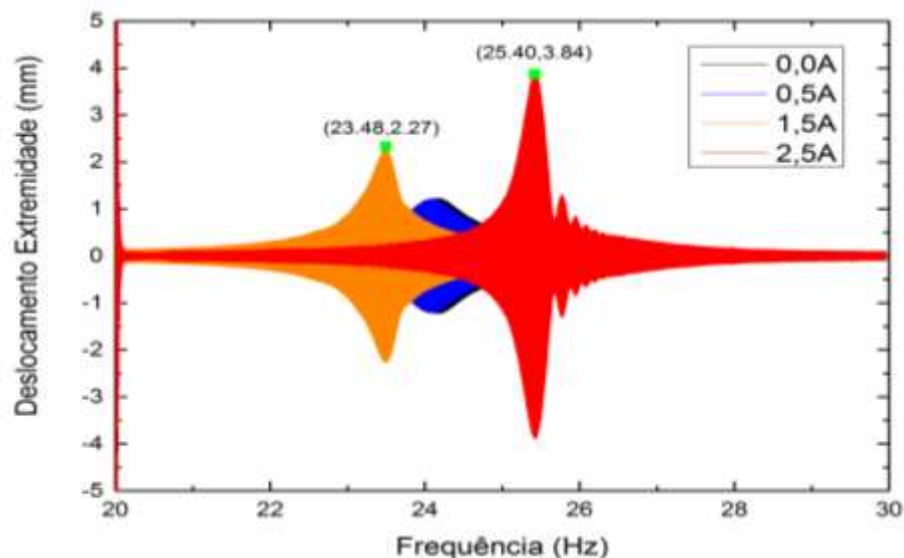


Figura 45 – Diagrama Deslocamento Extremidade x Frequência com amplitude de deslocamento 0,1 mm

Na Figura 46, pode ser visto o diagrama Força x Deslocamento do elemento SMA. Esse diagrama é importante pois com o mesmo pode-se notar o comportamento da rigidez da mola com o aumento de corrente e com o aquecimento da mesma. As curvas foram feitas nas frequências de 20 Hz a 30 Hz, com destaque na região de ressonância de cada caso.

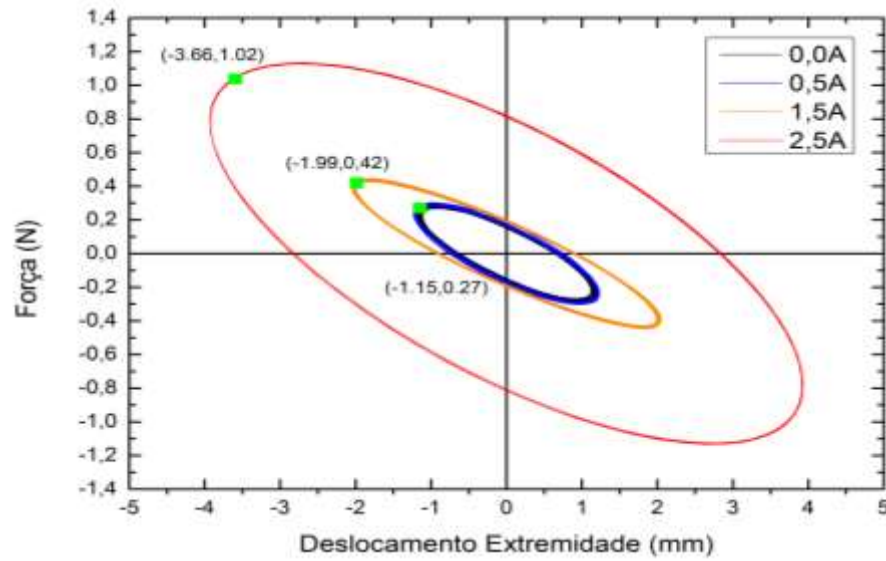


Figura 46 – Diagrama Força x Deslocamento Extremidade com amplitude de deslocamento 0,1 mm

Na Tabela 6, calcula-se a rigidez média da mola. Foi traçada uma reta desde a origem até os pontos verdes que se encontram na Figura 46. Os valores de rigidez das molas seguiram a seguinte formulação: Eq. 10:

$$k_{mola} = \frac{dF}{dx} \quad (10)$$

onde  $dF$  é a variação da força em um intervalo de deslocamento  $dx$ .

**Tabela 6**-Tabela com a rigidez média da mola encontrada nos testes com amplitude de deslocamento de 0,1 mm

Rigidez da Mola na amplitude:	<b>0,1 mm</b>
$k_{mola}$ à 0,0 A	234,78 N/m
$k_{mola}$ à 0,5 A	234,98 N/m
$k_{mola}$ à 1,5 A	211,05 N/m
$k_{mola}$ à 2,5 A	278,69 N/m

Consegue-se perceber que com correntes de 0,0 A e 0,5 A a rigidez é semelhante, indicando que nessa variação de temperatura não ocorreu a transformação de fase significativa. Com corrente de 1,5 A, a rigidez da mola diminui, conseguindo se aproximar de uma estrutura com mais martensita. Com corrente 2,5 A, a rigidez da mola aumenta, indicando que possui maior quantidade de Austenita em sua composição. Nesta última condição a amplitude de excitação da base não é suficiente para promover transformações de fase expressivas, o que justifica o aumento destacado da rigidez.

### 5.3.2. Resultados para Amplitude de deslocamento da base de 1,5 mm

O segundo teste foi feito com amplitude de deslocamento da base de 1,5 mm e taxa de avanço de frequência de excitação de 0,1 Hz/s.

A Figura 47 mostra o diagrama Tensão Elétrica x Frequência, pode-se perceber que o efeito de ressonância do teste com corrente a 1,5 A ocorreu em 23,05 Hz e o efeito de ressonância do teste com corrente a 2,5 A ocorreu em 25,03 Hz. Como no último teste, uma faixa de aproximadamente 2 Hz se manteve.

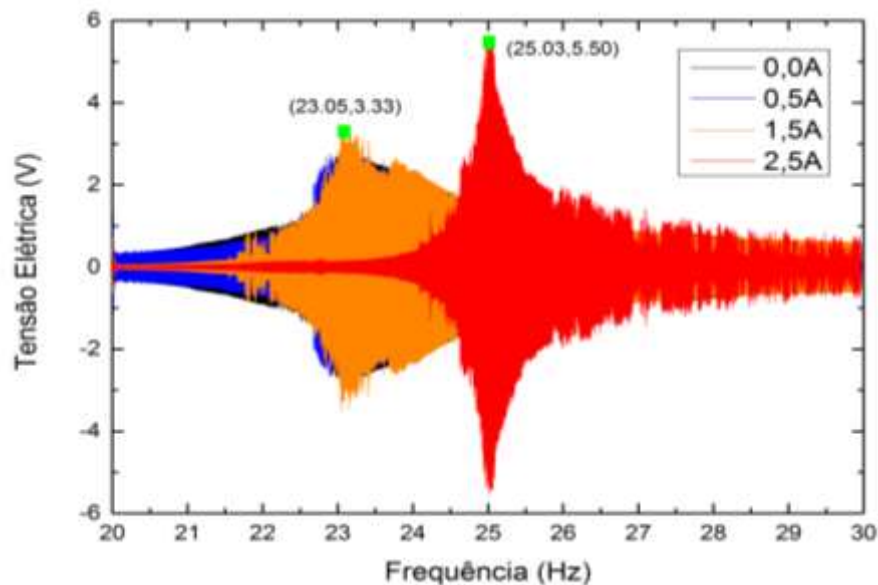


Figura 47 – Diagrama Tensão Elétrica x Frequência com amplitude de deslocamento 1,5 mm

A Figura 48 mostra o diagrama Deslocamento da Extremidade da barra X frequência, mostrando que o teste com corrente de 0,5 A teve efeito de ressonância em uma frequência de

22,91 Hz e o teste com corrente de 2,5 A teve efeito de ressonância na frequência de 25,04 Hz, apresentando uma faixa de 2,13 Hz, concordando com o diagrama anterior.

Comparando-se com o modelo numérico, percebe-se que o comportamento das frequências de ressonância é respeitado quando se varia a temperatura, ou seja, de acordo com que a corrente aumenta, a frequência de ressonância também aumenta.

Verifica-se também, da mesma forma que foi visto no ensaio com amplitude de deslocamento de 0,1 mm, que ocorre um aumento no deslocamento da extremidade conforme o incremento da corrente elétrica, divergindo-se do que se verifica no modelo numérico. Estes efeitos estão extremamente relacionados com as dissipações devido às transformações de fase, características essas que o modelo de Falk não captura.

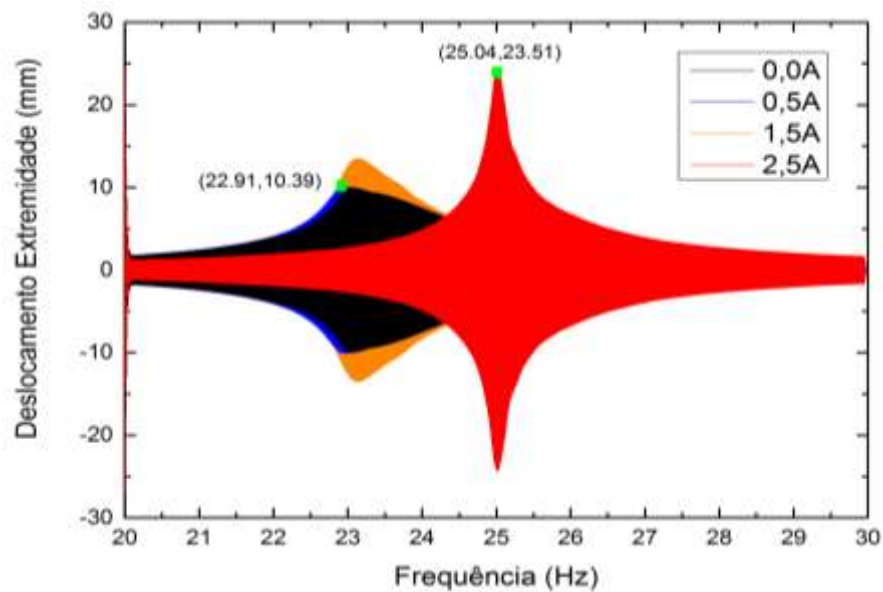


Figura 48- Diagrama Deslocamento Extremidade x Frequência com amplitude de deslocamento 1,5 mm

A Figura 49, mostra o diagrama Força x Deslocamento para nova amplitude de 1,5 mm. Como no caso anterior, as curvas foram feitas com destaque na região de ressonância de cada caso.



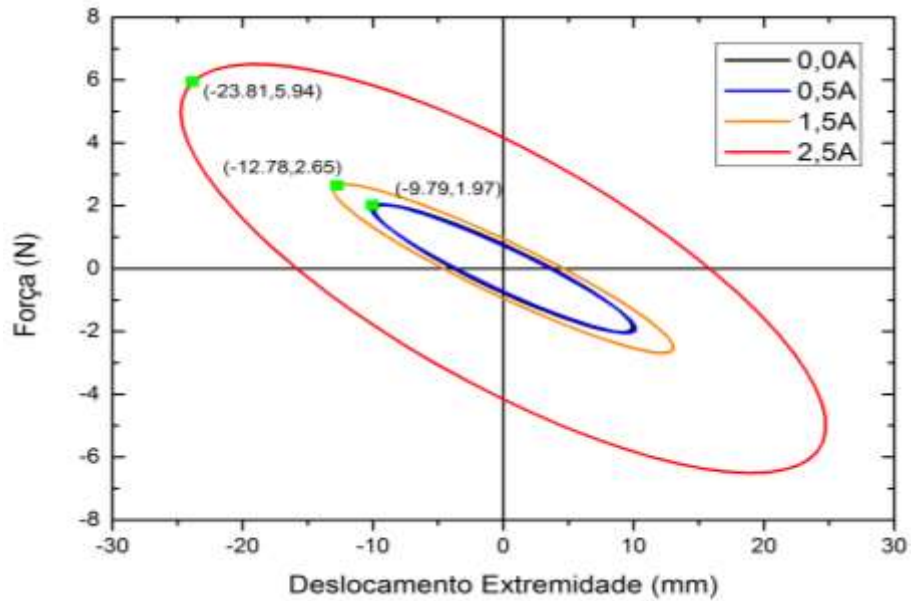


Figura 49 – Diagrama Força x Deslocamento Extremidade com amplitude de 1,5 mm

Realizando os mesmos cálculos com a nova amplitude, de acordo com os pontos marcados em cada curva, dividindo a força encontrada pelo deslocamento, encontra-se os seguintes valores de rigidez média, mostradas na Tabela 7.

**Tabela 7** – Comparação da rigidez média da mola com amplitude de 1,5mm e 0,1mm

Rigidez da Mola na amplitude:	<b>0,1 mm</b>	<b>1,5 mm</b>
$k_{mola}$ à 0,0 A	234,78 N/m	201,22 N/m
$k_{mola}$ à 0,5 A	234,98 N/m	201,52 N/m
$k_{mola}$ à 1,5 A	211,05 N/m	207,36 N/m
$k_{mola}$ à 2,5 A	278,69 N/m	249,48 N/m

Consegue-se perceber que com correntes de 0,0 A e 0,5 A rigidez é semelhante, indicando que nessa variação de temperatura, assim como na amplitude anterior, não houve uma mudança de fase significativa. Com corrente de 1,5 A, a rigidez da mola aumentou, conseguindo converter mais Austenita em Martensita devido ao forçamento. Com corrente 2,5

A, a rigidez da mola aumenta, possuindo maior quantidade de Austenita em sua composição. Caracteriza-se aqui a transformação de fase devido ao carregamento mecânico.

Para fazer as análises de variação de energia e ver se o sistema estudado é banda-larga, foi utilizado os resultados do ensaio com amplitude de deslocamento de 1,5 mm. Essa amplitude foi escolhida porque tem mais influência da força, logo, pode-se analisar melhor as transformações de fase.

A Figura 50 faz uma comparação dos resultados entre o sistema sem variação de corrente e o sistema em diferentes correntes elétricas ambos para uma amplitude de deslocamento da base de 1,5 mm. Traçou-se uma envoltória sobre todas as curvas da Figura (47) com corrente elétrica diferente de zero para mostrar que um sistema com controle ativo pode estender a banda de frequências. Pode-se notar que, caso fosse possível implementar um sistema de controle ativo o sistema seria capaz de: Reconhecer as frequências de forçamento das quais o dispositivo é submetido; e ao aquecer a mola *SMA*, seria possível mudar o sistema da condição marcada no ponto verde (aproximadamente 2,032 V) para a condição ótima de máxima geração de energia da curva com a mola de *SMA*, o que representa 5,483 V que ocorre em 24,148 Hz. Um aumento de aproximadamente 170 % é alcançado, por exemplo.

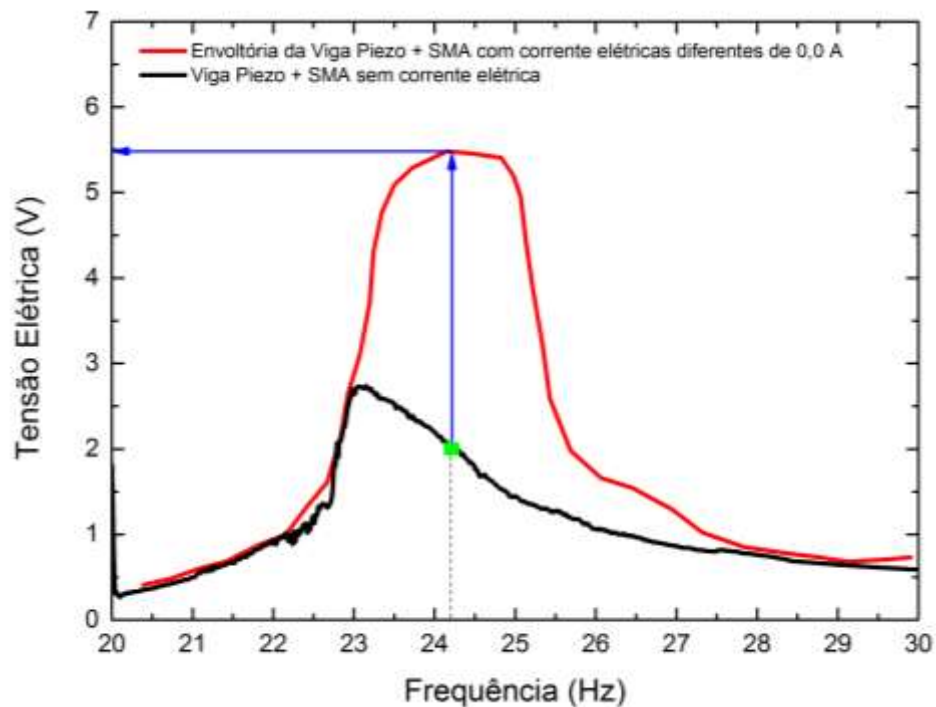


Figura 50 – Comparação das envoltórias do sistema com e sem o Efeito Memória de Forma.

A Figura 51 mostra a mesma Figura 50, porém destacando um critério idealizado para estimar o ganho de largura de banda do sistema com mola *SMA* fazendo o controle de corrente elétrica em relação do sistema com mola *SMA* sem corrente elétrica. Definiu-se como critério estimar as larguras das curvas  $\Delta f_{NL}$ , que é a largura de banda de um dispositivo não linear (com corrente elétrica) na altura média da curva e  $\Delta f_L$ , que é a largura de banda do dispositivo linear (sem corrente elétrica) altura média da curva. Pode-se notar que, enquanto o dispositivo com a mola *SMA* sem aquecimento varia de 22,730 Hz para 24,901 Hz totalizando  $\Delta f_L = 2,171$  Hz o dispositivo com mola *SMA* varia entre 22,924 Hz e 25,432 Hz totalizando  $\Delta f_{NL} = 2,508$  Hz. Assim, pode-se dizer que houve um aumento de 0,337 Hz da faixa de frequência operacional do sistema, representando um aumento de 15,5%, tornando-o um sistema de banda-larga.

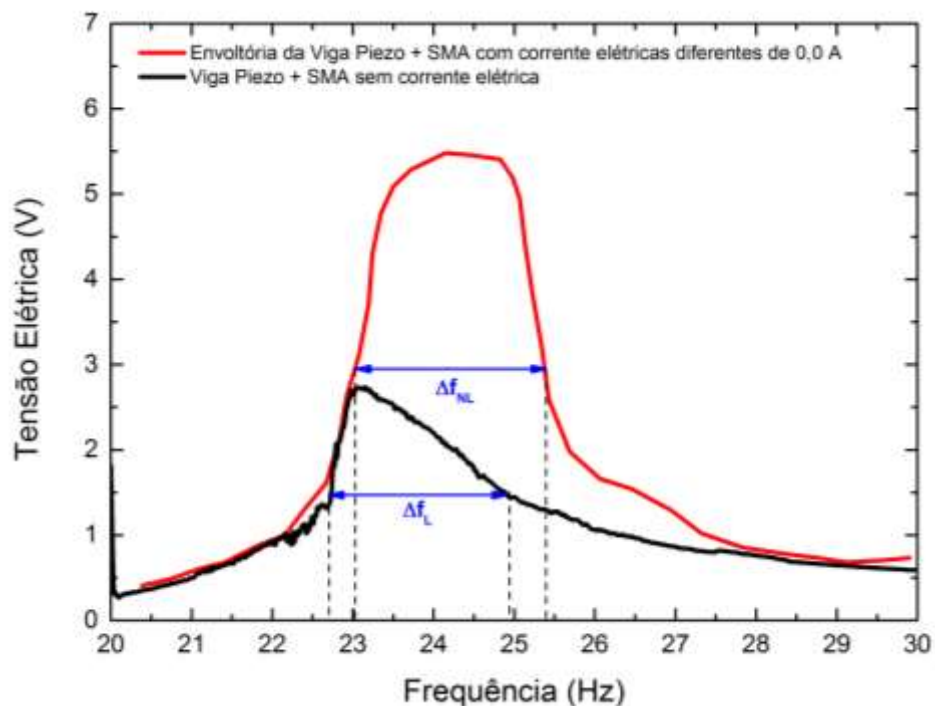


Figura 51 – Comparação da faixa de frequência: Viga piezo e Viga Piezo Mola (Efeito Memória de Forma).  
Altura média da altura máxima da curva

Foi feita outra análise mostrada na Figura 52, onde foi escolhida a altura que representa 75% da altura máxima da curva. Pode-se notar que, enquanto o dispositivo com a mola *SMA* sem aquecimento varia de 22,835 Hz para 24,119 Hz totalizando  $\Delta f_L = 1,284$  Hz o dispositivo com mola *SMA* varia entre 23,241 Hz e 25,259 Hz totalizando  $\Delta f_{NL} = 2,018$  Hz. Assim, pode-se dizer que houve um aumento de 0,734 Hz da faixa de frequência operacional do sistema,

representando um aumento de 57,16%, mostrando que se pode alcançar resultados melhores, dependendo da posição escolhida.

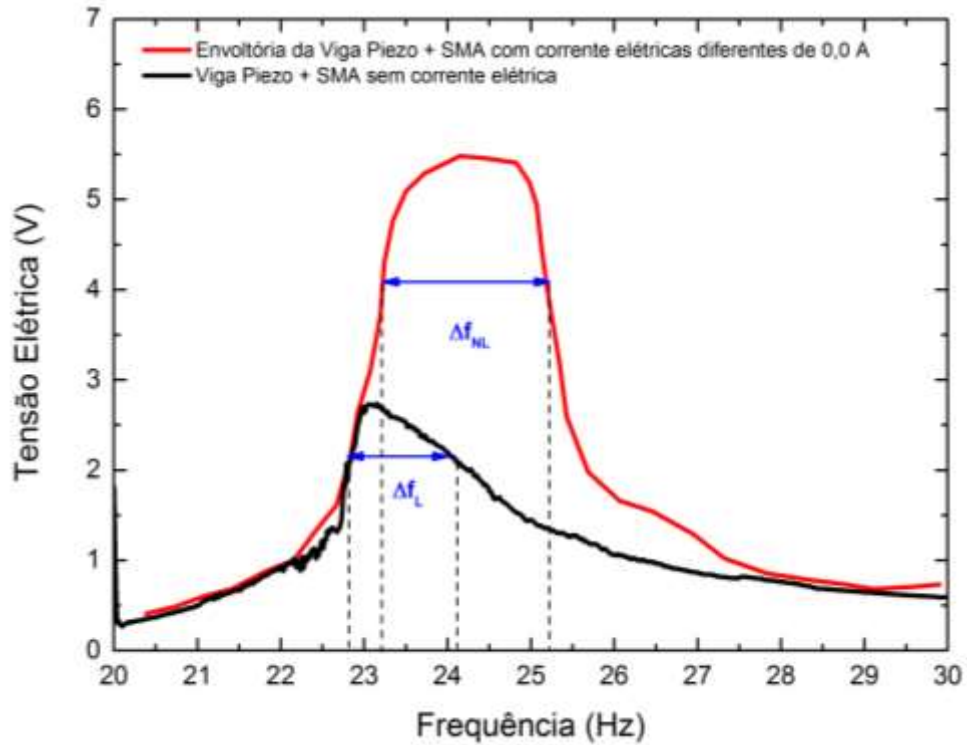


Figura 52 - Comparação da faixa de frequência: Viga piezo e Viga Piezo Mola Efeito Memória de Forma. 75% da altura máxima da curva

Estes resultados em conjunto evidenciam que o uso combinado de materiais inteligentes pode ser uma solução atraente para sintonização do dispositivo de geração de energia para uma determinada faixa de frequências utilizando o controle ativo de temperatura.

## Capítulo 6 – Considerações Finais

### 6.1 Conclusões

Este estudo serve como contribuição aos atuais estudos sobre as características da geração de energia através de acoplamentos utilizando piezelétricos e *SMA*. Ao início foi comprovado o potencial do estudo desta área para aplicações de engenharia por meio de uma revisão bibliográfica.

Os materiais piezelétricos, devido ao seu efeito direto, possuem uma enorme importância ao converter deformação mecânica em tensão elétrica. Na prática, as vibrações presentes no cotidiano são instáveis e fornecem diferentes frequências naturais, ou seja, estão em constante mudança. Aproveitar a energia mecânica desses sistemas dinâmicos é o principal motivo dessa área de estudo. Visto isso, este projeto buscou através de experimentos e simulações numéricas, estudar a faixa de operação e a capacidade de adaptação de um dispositivo piezelétrico em diferentes frequências e temperaturas. Para isso, adicionou-se uma mola *SMA* com intuito de explorar suas características de pseudoelasticidade e memória de forma, que ocorrem mediante a uma transformação reversa entre as fases austenita e martensita.

Desenvolveu-se um modelo arquetipo de um sistema de colheita de energia constituído de: um oscilador mecânico, um elemento piezelétrico acoplado a um circuito elétrico e uma mola de memória de forma. Viu-se a grande influência de diferentes temperaturas no sistema. Verificou-se que é possível deslocar as frequências de ressonância, o que pode ser utilizado futuramente para controle do sistema de forma a sintonizar com as frequências do ambiente, otimizando a geração de energia. Resultados numéricos corroboram qualitativamente com os resultados experimentais encontrados.

Verificou-se que quando a frequência natural dos sistemas no ambiente se altera, perde-se a eficiência do dispositivo conversor de energia mecânica em elétrica. Entretanto, confirma-se que através da utilização dos efeitos de memória de forma e pseudoelasticidade das *SMA*s, é possível mudar a frequência natural do dispositivo levando o sistema à otimização na nova condição, sendo assim, capazes de gerar energia em diversos ambientes. Concluímos que a variação da temperatura com o carregamento mecânico aplicado foi capaz de aumentar a largura da banda de frequência do dispositivo tradicional.

É importante citar que neste trabalho não foi realizado o cálculo do consumo energético para aquecimento do material com memória de forma tampouco um estudo da sobre a potência gerada. Fica evidente que a energia necessária para aquecer o material deve ser menor que a energia gerada pelo dispositivo para que o sistema seja aceitável e viável para aplicações futuras. Porém, o foco deste trabalho se deu no entendimento dos diferentes fenômenos envolvidos de forma a demonstrar que é possível transformar este dispositivo como um banda larga.

## 6.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

- A criação de um mecanismo de controle automático do aquecimento da *SMA* ao perceber qualquer alteração da frequência de vibração do ambiente, buscando assim o ponto ótimo.
- Um sistema de armazenamento de energia acoplado ao dispositivo de geração.
- Análise da eficiência da geração de energia pelo dispositivo apresentado.
- Estudos mais detalhados poderiam detectar e acompanhar a variação da temperatura através de uma câmera termográfica durante os ensaios dinâmicos.
- Realizar um estudo quantitativo comparando a energia fornecida para aquecimento dos elementos com memória de forma e a energia gerada pelo material piezelétrico para verificar a eficiência do dispositivo.
- Neste trabalho o modelo constitutivo utilizado para capturar os efeitos de memória de forma e pseudoelasticidade foi o de Falk. Este modelo é simplificado e não captura os efeitos dissipativos destes materiais. Existem outros modelos mais robustos, como o modelo apresentado em BRINSON, L (1993) que leva em consideração as mudanças de rigidez e a histerese do material.

## Referências Bibliográficas

ADEODATO, A. Análise experimental do uso de ligas com memória de forma e materiais piezoelétricos para geração de energia. Dissertação de Mestrado, 2017.

AMBIENTE – Disponível em <http://ambiente.kazulo.pt/5000/combustiveis-fosseis-e-poluicao.htm>. Acessado em junho de 2018

ANTON KOLESNIKOV, VLADIMIR G. KUTCHEROV, ALEXANDER F. GONCHAROV. Methane-derived hydrocarbons produced under upper-mantle conditions. *Nature Geoscience*, 2009.

BAI, Yang; MEGGS, Carl; BUTTON, Tim W. Investigation of using free-standing thick-film piezoelectric energy harvesters to develop wideband devices. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, v. 14, n. 08, p. 1440016, 2014.

BAKKER, R.H.; PEDERSEN, E.; VAN DEN BERG, G.P.; STEWART, R.E.; LOK, W.; BOUMA, J. Impact of wind turbine sound on annoyance, self-reported sleep disturbance and psychological distress. *Science of the Total Environment*, v.425, p. 42-51, 2012.

BORGES, Ane Caroline Pereira *et al.* Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia, 2017.

BRINSON, L. Catherine. One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable. *Journal of intelligent material systems and structures*, v. 4, n. 2, p. 229-242, 1993.

CALIÒ, Renato *et al.* Piezelectric energy harvesting solutions. *Sensors*, v. 14, n. 3, p. 4755-4790, 2014.

COOK-CHENNAULT, K A, THAMBI, N. e SASTRY, A.M.; Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezelectric energy harvesting systems. *Smart Material and Structure*. 2008.

CRAWLEY, EDUWARD F. e ANDERSON, ERIC H. 1990. Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams. *Journal of Intelligent Material System and Structures*. 1990.

DA HORA, Rodolpho Barbosa *et al.* MODELING PSEUDOELASTIC VIBRATION ATTENUATORS ELEMENTS USING THE FINITE ELEMENT METHOD. 2013.

DE OLIVEIRA FEITOSA, Erialdo *et al.* Utilização de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica no Estado do Ceará. *Conexões-Ciência e Tecnologia*, v. 11, n. 1, p. 57-63, 2017.

DE PAULA, ALINE S., INMAN, D. J. e SAVI, M. A. 2015. Energy harvesting in a nonlinear piezomagnetoelastic beam subjected to random excitation. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 54, 2015, Vol. 405.

DUTOIT, NOËL E.; WARDLE, BRIAN L. Performance of microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters. *Integrated Ferroelectrics*, v. 83, n. 1, p. 13-32, 2006.

EDALATI, Saeed *et al.* Solar photovoltaic power plants in five top oil-producing countries in Middle East: A case study in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 69, p. 1271-1280, 2017.

ENERGY.GOV. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. How wind Turbines Work. 2015. U.S. Department of Energy. Disponível em: <<http://energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work>>. Accessed: Maio de 2018.

ERTURK, Alper; INMAN, Daniel J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart materials and structures*, v. 18, n. 2, p. 025009, 2009.A.

ERTURK, Alper; INMAN, Daniel J. Piezoelectric energy harvesting. John Wiley & Sons, 2011.A.

ERTURK, Alper. Electromechanical modeling of piezoelectric energy harvesters. 2009. Tese de Doutorado. Virginia Tech.

FALK, F. Model free energy, mechanics, and thermodynamics of shape memory alloys. *Acta Metallurgica*, v. 28, n. 12, p. 1773-1780, 1980.

FANG, Cheng *et al.* Application of an Innovative SMA Ring Spring System for Self-Centering Steel Frames Subject to Seismic Conditions. *Journal of Structural Engineering*, v. 144, n. 8, p. 04018114, 2018.

FERNANDES, F.B; Ligas com memória de forma. Lisboa, 2006.

GASCH, R; TWELE, J. Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation. Solarpraxis AG, 2002.

GREENPEACE – Disponível em <http://www.greenpeace.org/brasil/pt/Noticias/e-licas-podem-reduzir-emiss-o/>. Acessado em maio de 2018.

GUARDABASSI, Patricia Maria. Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento. Universidade de São Paulo (Dissertação). São Paulo, 2006.

GUIZZETTI, M. *et al.* Thickness optimization of a piezoelectric converter for energy harvesting. In: Proceedings of the COMSOL Conference. 2009.

HEPBASLI, A.; OZGENER, O. A review on the development of wind energy in Turkey. *Renewable and Sustainable Reviews*, v.8, p. 257-276, 2004.

IMHOFF, J. Desenvolvimento de Conversores Estáticos para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia Elétrica da UFSM, Santa Maria. 2007. 146.



IVAN, Ioan Alexandru *et al.* Comparative material study between PZT ceramic and newer crystalline PMN-PT and PZN-PT materials for composite bimorph actuators. Review on Advanced Materials Science (RAMS), v. 24, n. 15-16, p. 1-9, 2010.

JANI, J. Mohd *et al.* A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. Materials & Design (1980-2015), v. 56, p. 1078-1113, 2014.

JIMÉNEZ, F. J. *et al.* Virtual instrument to obtain an optimal linear model for piezoelectric elements involved in road traffic energy harvesting. Computer Standards & Interfaces, v. 51, p. 1-13, 2017.

KIM, G. W.; Piezoelectric energy harvesting from torsional vibration in internal combustion engines. International Journal of Automotive Technology. 2014.

KIM, M.; *et al.* 2010. Modeling and experimental verification of proof mass effects on vibration energy harvester performance. Smart materials and structures.

KLOTZLE, Marcelo Cabus. Consumo de energia renovável e crescimento econômico para países em desenvolvimento. 2017.

LAGOUDAS, Dimitris C. (Ed.). Shape memory alloys: modeling and engineering applications. Springer Science & Business Media, 2008.

LAUMANN, Felix, *et al.*; Energy Procedia 142 (2017) 3062–3068

LEO, D.J.; Engineering Analysis of Smart Materials Systems. John Wiley & Sons, Inc., 2007.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Photovoltaic Solar Energy: A Briefly Review. Revista Virtual de Química, v. 7, n. 1, 2015.

NASCIMENTO, Rodrigo Limp. Aproveitamento da energia dos oceanos para produção de eletricidade. 2017.

PAIVA, Alberto; SAVI, Marcelo Amorim. An overview of constitutive models for shape memory alloys. Mathematical problems in engineering, v. 2006, 2006.

PEREIRA, J.; Um estudo termomecânico em atuadores com ligas com memória de forma. Rio de Janeiro: CEFET - Maracanã, 2009.

RALIB, Aliza Aini Md; NORDIN, Anis Nurashikin; SALLEH, Hanim. A comparative study on MEMS piezoelectric microgenerators. Microsystem technologies, v. 16, n. 10, p. 1673-1681, 2010.

ROSA, Aldo. Processos de Energia Renováveis. Elsevier Brasil, 2016.

SAVI, M. A.; BRAGA, A. M. B. Chaotic vibrations of an oscillator with shape memory. J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng, v. 15, n. 1, p. 1-20, 1993.

SAMPAIO, P. G.; GONZÁLEZ, M.O.; Photovoltaic solar energy: Conceptual framework, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 74, 2017.

SHAH, Imran Hussain; HILES, Charlie; MORLEY, Bruce. How do oil prices, macroeconomic factors and policies affect the market for renewable energy? *Applied Energy*, v. 215, p. 87-97, 2018.

SILVA, Djalma J. A; Biogás—uma energia limpa. *Revista Eletrônica Novo Enfoque*, v. 13, p. 142-149, 2011.

SILVA, L. L. *et al.* Synergistic use of smart materials for vibration-based energy harvesting. *The European Physical Journal Special Topics*, v. 224, n. 14-15, p. 3005-3021, 2015.

SILVEIRA, J.L.; TUNA, C. E.; DE QUEIROZ LAMAS, W.; The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 20, p. 133-141, 2013.

SODANO, Henry A.; INMAN, Daniel J.; PARK, Gyuhae. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials. *Shock and Vibration Digest*, v. 36, n. 3, p. 197-206, 2004.

VIER, Lucas Carvalho *et al.* ESTUDO DE VIABILIDADE PARA UTILIZAÇÃO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS EM HABITAÇÕES POPULARES. *REVISTA GESTÃO E DESENVOLVIMENTO EM CONTEXTO*, v. 5, n. 1, p. 49-52, 2017.

WANG, Shifeng; WANG, Sicong; SMITH, Pete. Ecological impacts of wind farms on birds: questions, hypotheses, and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 44, p. 599-607, 2015.

WANG, Xu *et al.* Coupling analysis of linear vibration energy harvesting systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 70, p. 428-444, 2016.

WILLIAMS, C. B.; YATES, Rob B. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. *sensors and actuators A: Physical*, v. 52, n. 1-3, p. 8-11, 1996.

YANG, Zhengbao *et al.* High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications. *Joule*, 2018.

ZAKHAROV, Dmitry *et al.* Thermal energy conversion by coupled shape memory and piezoelectric effects. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, v. 22, n. 9, p. 094005, 2012.

## ANEXO A – Desenho do Shaker

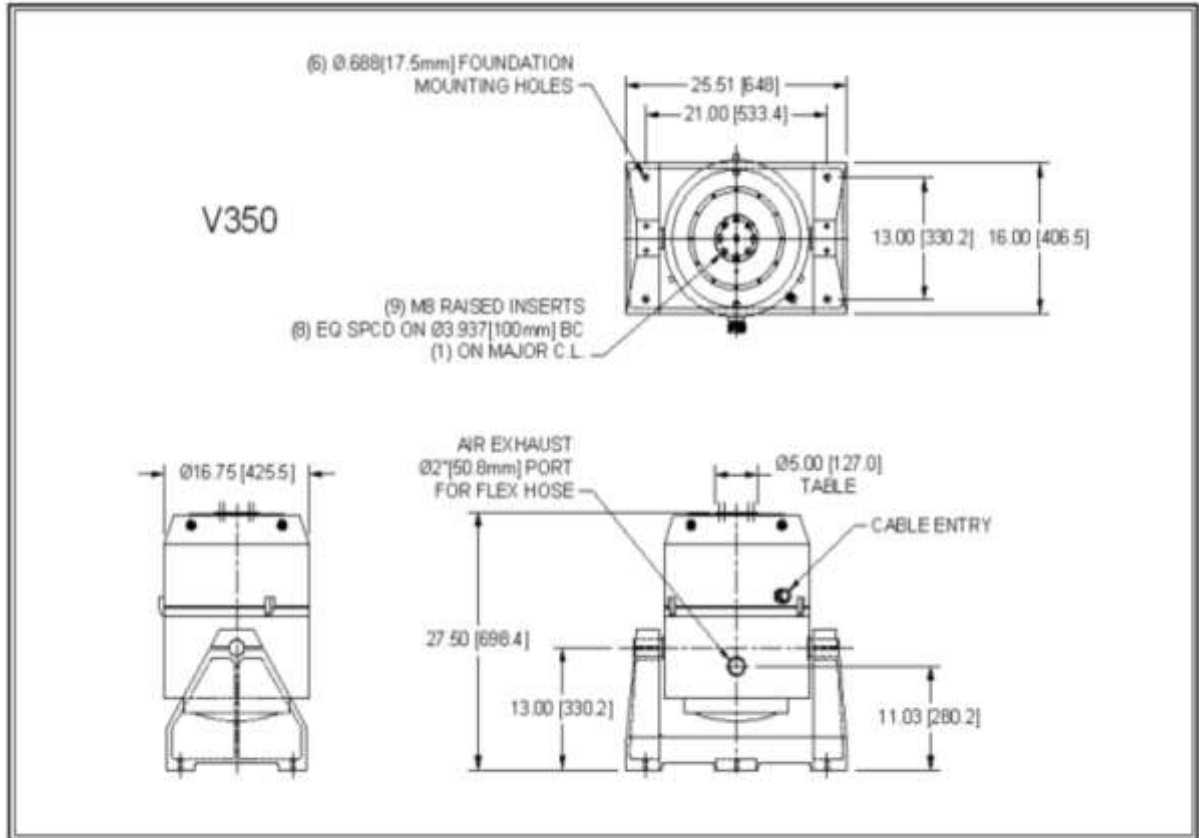


Figura 53 – Shaker V350 -Data Physics

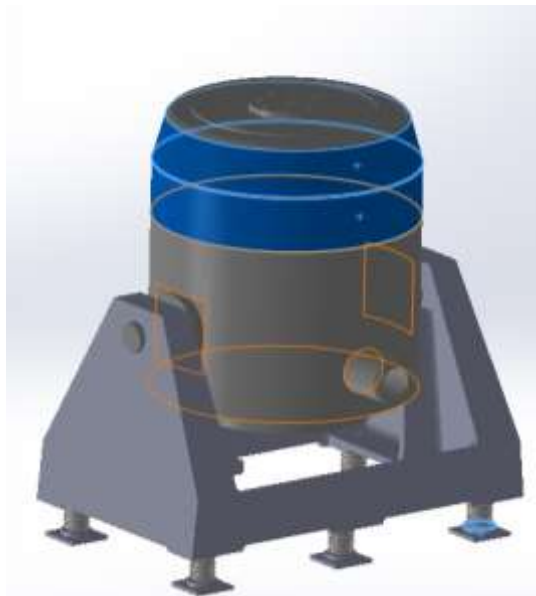


Figura 54 – Ilustração do Shaker