

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**“Avaliação Experimental de um Sistema Não Linear para
Extração de Energia Através de Vibrações Utilizando
Material Piezelétrico”**

Felipe Carmo Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Vicente Lopes Jr.

Coorientador: Prof. Dr. Samuel da Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- C331a Carvalho, Felipe Carmo.
Avaliação experimental de um sistema não linear para extração de energia através de vibrações utilizando material piezelétrico / Felipe Carmo Carvalho. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2014
113f : il.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área do Conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2014
- Orientador: Vicente Lopes Júnior
Co-orientador: Samuel da Silva
Inclui bibliografia
1. Colheita de energia. 2. Extração de energia. 3. Máxima transferência de potência. 4. Conversores não lineares. 5. Sistema autônomo.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Avaliação experimental de um Sistema Não-linear para Extração de Energia Através de Vibrações Utilizando Material Piezelétrico

AUTOR: FELIPE CARMO CARVALHO

ORIENTADOR: Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. SAMUEL DA SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área: MECANICA DOS SÓLIDOS, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. JOAO ANTONIO PEREIRA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MILTON DIAS JUNIOR
Departamento de Sistemas Integrados / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 30 de maio de 2014.

AGRADECIMENTOS

Não seria justo apresentar um trabalho com meu nome, sem antes agradecer aos colaboradores diretos e indiretos responsáveis pelas reflexões e incentivos que possibilitaram esse feito.

Primeiramente a Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

A minha família, pelo apoio incondicional. Em especial, meus pais Daltro e Geise, minha irmã Thalita e minha avó Delminda, que não pouparam carinho e esforços para manterem minha estrutura sólida e meu caminho bem traçado, a vocês não existe palavras que expressem meu sentimento e minha gratidão. Amo todos vocês!

A minha família de coração, Marlene, Jefferson, Renata e Sara, por me acolherem e compartilharem todo amor e alegria. Em especial a minha namorada Sara, pela compreensão e dedicação em me fazer feliz a cada dia.

Aos amigos (presentes e desencarnados) que fizeram parte desse momento sempre me ajudando e incentivando. Não caberia descrever todos vocês aqui, mais acredito fielmente que cada um sabe do seu papel e da importância particular na minha vida. A vocês meus sinceros agradecimentos e que brindemos dia após dia pelo simples motivo de estarmos juntos.

Ao meu orientador pela oportunidade, paciência e desafios, que me proporcionaram crescimento pessoal e profissional.

Aos meus colegas de trabalho, por compartilharem seus conhecimentos, pela paciência, pela dedicação e pelos desafios traçados e vencidos como um grupo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ, pelo apoio financeiro e pelo interesse nesse este estudo.

*“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo
começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim”*

(Chico Xavier)

RESUMO

Afim de suprir a necessidade por fontes alternativas de energia para a alimentação de sistemas microeletrônicos autônomos, os estudos têm se voltado para a utilização de materiais piezelétricos para a transformação de energia derivadas de vibrações mecânicas em energia elétrica. Como a potência fornecida pelas vigas com materiais piezelétricos é pequena e, geralmente, insuficientes para alimentar dispositivos eletrônico de forma autônoma, técnicas de extração, conversão e armazenamento de energia são utilizadas para otimizar a energia final acumulada. Neste sentido, este trabalho tem por objetivo a otimização de um sistema extrator de energia através de vibrações utilizando material piezelétrico, maximizando a potência extraída e melhorando o rendimento do sistema. Para isto, foram analisadas condições de linearidade e não linearidade no sistema e os respectivos circuitos conversores foram projetados e testados experimentalmente. A melhor configuração eletromecânica para extração de energia, o sistema será utilizada para alimentar um sistema autônomo. Foram projetados dois sistemas de monitoramentos com consumo de energia diferentes, para avaliar as limitações e potencialidades da proposta de sistema para extração de fontes alternativas de energia elétrica.

Palavras-chave: Colheita de energia. Extração de energia. Máxima transferência de potência. Conversores não lineares. Sistema autônomo.

ABSTRACT

In order to meet the need for alternative energy sources to power autonomous microelectronic systems, studies have focused on the use of piezoelectric materials to transform energy derived from mechanical vibrations into electrical energy. Once the power delivered by the cantilever beams with piezoelectric materials are insufficient to power electronic devices autonomously, extraction techniques, conversion and energy storage was used to optimize the final accumulated energy. Considering that, this work aims at the optimization of an extractor system energy through vibrations using piezoelectric material, maximizing the power extracted and improving system performance. To this end, conditions of linearity and non-linearity in the mechanical system, as well as designed and tested converter circuits were analyzed. The best setup for electromechanical energy extraction, was used to feed an autonomous system. Two different power consumption-monitoring systems were designed to assess the limitation and potentialities of the proposed alternative for energy harvesting.

Keyword: Energy harvesting. Maximum power transfer. Nonlinear converters. Autonomous system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição básica de um sistema autônomo de extração e armazenamento de energia.....	14
Figura 2 – Estrutura biestável. Viga com um ímã fixo na extremidade livre distante “d1” de outro ímã fixo a uma estrutura qualquer	15
Figura 3 – Representação esquemática proposta por Dai, utilizando múltiplos magnetos.....	21
Figura 4 – Representação linear e não linear do sistema descrito.....	23
Figura 5 – Esquema proposto por Zhou utilizando ímãs inclinados em relação a base de um ângulo α	25
Figura 6 – Relação dos piezelétricos e subgrupos baseados na simetria.....	28
Figura 7 – Cubo (paraelétrica) e tetragonal estrutura (ferroelétrica) de PZT e BaTiO ₃ antes e depois de um campo elétrico ser aplicada ou uma apresentar uma força mecânica em vigor..	29
Figura 8 – Curva de histerese de um ponto de vista cristalográfico, estes materiais piezoelétricos exibem o que é chamado de estrutura cristalina perovskita.....	29
Figura 9 – Representação simbólica dos processos de reorientação elétricos em estrutura de cristalito e domínio cerâmica piezelétrica.....	30
Figura 10 – Principal divisão dos materiais piezelétricos.....	30
Figura 11 – Subdivisão dos materiais piezelétricos “Duros” e “Macios” de acordo com uma norma americana DOD-STD-1376A(SH).....	31
Figura 12 – Polarização Direta.....	33
Figura 13 – Polarização Reversa.....	34
Figura 14 – A direção de polarização positiva normalmente é feita de forma a coincidir com o eixo Z.....	35
Figura 15 – Cálculo do fator de dissipação dielétrica.....	39

Figura 16 – Dependência térmica típica das propriedades piezelétrica dos compostos PZT5A e PZT5H.....	41
Figura 17 – Fator de qualidade mecânico em função da temperatura para diversas composições de PZT.....	42
Figura 18 – Circuito e gráfico da potência normalizada pela resistência normalizada.....	47
Figura 19 – Diagrama para o ajuste da impedância ótima para a máxima transferência de energia.....	49
Figura 20 – Diagrama de um circuito com carga puramente resistiva.....	50
Figura 21 – Diagrama de um circuito com carga reativa.....	52
Figura 22 – Viga engastada com PZT e massa na ponta.....	54
Figura 23 – Modelo esquemático eletromecânico.....	55
Figura 24 – Modelo elétrico para a piezoestrutura.....	56
Figura 25 – (a) Norton (fonte de corrente) circuito equivalente da colhedora de energia piezelétrica. (b) Thevenin (fonte de tensão) circuito equivalente da colhedora de energia piezelétrica.....	57
Figura 26 – Circuito padrão de interface.....	59
Figura 27 – Interface padrão: deslocamento, tensão e corrente.....	59
Figura 28 – Diagrama de bloqueio para PCM.....	61
Figura 29 – Diagrama de três conversores de comutação.....	62
Figura 30 – Interface do circuito de carga síncrono.....	64
Figura 31 – Interface de extração de carga síncrono: deslocamento, tensão e corrente.....	64
Figura 32 – Interface do circuito SSHI em paralelo.....	66
Figura 33 – Interface SSHI em paralelo: formas de onda do deslocamentos, tensões e corrente.....	66
Figura 34 – Interface do circuito SSHI em série.....	68

Figura 35 – Interface SSHI em paralelo: formas de onda do deslocamentos, tensões e corrente.....	68
Figura 36 – Diagrama esquemático do circuito de detecção de tensão, e a geração da corrente ideal.....	70
Figura 37 – Esquemática do circuito para detecção de corrente e o controlador PI.....	71
Figura 38 – Gerador de sinal PWM.....	72
Figura 39 – Oscilador biestável mostrando exemplos de trajetórias para (a) vibrações de baixa energia, (b) as vibrações caóticos e (c) oscilações periódicas de alta energia.....	74
Figura 40 – Exemplo de respostas do deslocamento em função do tempo de um oscilador biestável, onde (a) representa as vibrações de baixa energia, (b) as vibrações caóticos e (c) oscilações periódicas de alta energia.....	74
Figura 41– Dinâmicas do sistema. (a) Sistema linear definido pela distância do imã gera uma função de energia parabólica. (b) Pequena distância entre os ímãs causa a bi estabilidade aparecendo dois pontos de equilíbrio dados por X_1 e X_2	75
Figura 42 – Exemplos de Sistemas extratores biestáveis por: (a) Repulsão magnética. (b) Atração magnética. (c) Carga axial.....	76
Figura 43 – Projeto do sistema biestável.....	78
Figura 44 – Deflexões da viga. Posição estável 01 e 02.....	78
Figura 45 – Sistema típico.....	78
Figura 46 – Topologia das vigas e dos materiais piezelétricos com os respectivos pontos de medida da velocidade.....	81
Figura 47 – Modelo esquemático do dispositivo para coleta de energia.....	83
Figura 48 – Projeto real para ensaios experimentais e instrumentos utilizados.....	83
Figura 49 – Frequências naturais e tensão de pico para diferentes topologias de PZT para a viga fina sem massa.....	86
Figura 50 – Frequências naturais e tensão de pico para diferentes topologias de PZT para a viga fina com massa.....	87

Figura 51 – Frequências naturais e tensão de pico para diferentes topologias de PZT para a viga grossa sem massa.....	88
Figura 52 – Frequências naturais e tensão de pico para diferentes topologias de PZT para a viga grossa com massa.....	88
Figura 53 – Análise qualitativa para o caso linear considerando a viga fina com massa e PZT em paralelo e $d1=0,035m$	89
Figura 54 – Frequências naturais para diferentes topologias de PZT para a viga fina com massa utilizando o sistema de biestabilidade.....	91
Figura 55 – Transição entre as condições de monoestabilidade e biestabilidade do sistema para $D=0,035m$ (distância entre magnetos) e amplitude de $2,5V_{pp}$	91
Figura 56 – Análise qualitativa para o caso não linear considerando a viga fina com massa e PZT em paralelo considerando o sistema biestável.....	92
Figura 57 – Alteração da posição do ímã para análise da não linearidade. Amplitude de $3V_{pp}$ e $D=0,025m$ (distância entre magnetos).....	92
Figura 58 – Análise qualitativa para o caso não linear alterando a disposição do ímã. Amplitude de $3V_{pp}$ e $D=0,025m$	93
Figura 59 – Análise da não linearidade através do incremento e decremento da frequência para diferentes amplitudes e $d1=0.025m$	94
Figura 60 – Potência na carga em função da resistência para diferentes topologias de conversores.....	96
Figura 61 – Tempo de carregamento do supercapacitor considerando o conversor de interface tradicional, SECE e SSHI em paralelo.....	97
Figura 62 – Monitorador de vibrações alimentado por um supercapacitor de $1,5F$ e $5V$	98
Figura 63 – Tensão no supercapacitor, alimentando o circuito monitorador de vibrações.....	99
Figura 64 – Projeto sistema autônomo para análise de temperatura, com transmissão de dados via Xbee.....	100
Figura 65 – Tensão no supercapacitor alimentando um sistema autônomo para análise de temperatura, com transmissão de dados via Xbee.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos resultados de diferentes experimentos de extração de energia....	26
Tabela 2 – Principais características dos materiais cerâmicos.....	33
Tabela 3 – Elementos da constante de carga piezométrica.....	35
Tabela 4 – Elementos da constante de tensão piezométrica.....	36
Tabela 5 – Elementos da constante dielétrica.....	37
Tabela 6 – Elementos da constante de Young.....	37
Tabela 7 – Elementos do fator de acoplamento eletromecânico.....	38
Tabela 8 – Principais materiais piezométricos comerciais e seus respectivos valores constantes.....	43
Tabela 9 – Propriedades do PZT.....	82
Tabela 10 – Propriedades da viga.....	82
Tabela 11 – Propriedades da massa magnética.....	82
Tabela 12 – Comparação da potência, resistência, corrente e ganho para as diferentes topologias de conversores.....	96

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITOS DE PIEZELETRICIDADE.....	16
2.1 Captação de Energia Através da Vibração Mecânica.....	16
2.2 Evolução dos Circuitos Conversores e Retificadores.....	18
2.3 Utilização da Não Linearidade para Geração de Energia.....	20
2.4 Conceitos Básicos de Piezeletricidade.....	26
2.4.1 <i>Classificação e Efeito Piezelétrico.....</i>	<i>27</i>
2.4.2 <i>Domínios ferroelétricos e polarização piezelétrica.....</i>	<i>33</i>
2.4.3 <i>Constantes Piezelétricas.....</i>	<i>34</i>
2.4.4 <i>Limitações.....</i>	<i>40</i>
2.4.5 <i>Equações constitutivas.....</i>	<i>43</i>
3 TEOREMA DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA.....	46
3.1 Impedância.....	48
3.2 Cálculo da impedância para circuitos puramente resistivos.....	50
3.3 Cálculo da impedância para circuitos reativos.....	51
4 MODELAGEM DO PIEZOGERADOR.....	54
4.1 Modelagem Elétrica.....	54
4.2 Circuitos de interface.....	57
4.3 Interface padrão.....	58
4.4 Técnicas de retificação não Lineares.....	63
4.4.1 <i>Extração por Carga Elétrica Síncrona (SECE).....</i>	<i>63</i>
4.4.2 <i>Extração por Comutação Sincronizada no Indutor (SSHI) em Paralelo.....</i>	<i>65</i>
4.4.3 <i>SSHI em série.....</i>	<i>68</i>
4.5 Topologia do circuito de controle.....	69
4.6 Modelagem Estrutural.....	73
4.6.1 <i>Sistema Biestável.....</i>	<i>73</i>

<i>4.6.2 Projetos de dispositivos biestáveis.....</i>	<i>76</i>
<i>4.6.3 Sistema biestável proposto e equações do oscilador.....</i>	<i>77</i>
5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	81
5.1 Caso Linear.....	85
5.2 Caso Não Linear.....	90
5.3 Conversores Não Lineares.....	95
5.4 Sistema Autônomo.....	98
6 CONCLUSÃO E ETAPAS FUTURAS.....	102
6.1 Sugestões para Etapas Futuras.....	103
REFERÊNCIAS.....	104

1 INTRODUÇÃO

Com a modernidade, aumentou-se a utilização de comunicações sem fio, bem como a tentativa de reduzir o consumo de energia, assim, novas aplicações tornam-se possíveis. Sensores Wireless (WSNs – Wireless Sensor Nodes) que consistem em pequenos sensores e rádios, estão se tornando uma área de interesse comum para os pesquisadores, pois sua utilização vem sendo empregada em várias aplicações. (STOJCEV et. al., 2009).

A alimentação de WSNs é um desafio particularmente interessante e difícil para a eletrônica moderna. Em sua maioria, não são colocados perto de fontes de energia permanentes, e devem, ou extrair a energia do ambiente ou operar utilizando somente a energia armazenada.

A utilização de baterias é uma solução mais fácil, porém, em muitos casos, não é a solução ideal. Embora a pesquisa tenha aplicado vários métodos de redução de consumo de energia, todas as baterias eventualmente descarregam, exigindo sua substituição (TACCA et al., 2007). Sua substituição é trabalhosa e onerosa, exigindo que ela esteja em um local de fácil acesso sempre que necessário, gerando gastos desnecessários.

As pilhas são muitas vezes um dos maiores componentes da placa, implicando no aumento do tamanho e peso total do sistema final.

Uma alternativa viável e popular para as baterias, em muitas aplicações, é a captação de energia, que tem tido inúmeras pesquisas na história recente, tanto em fontes de energia e técnicas de rede sem fio (CHULSUNG et al., 2006; HONGSEOK et al., 2012; NIYATO et al., 2007).

Técnicas de captação de energia consiste em extrair a energia do ambiente que seria desperdiçada, de modo usá-la para alimentar os circuitos eletrônicos. Na teoria, dispositivos como WSNs podem ser perpetuamente alimentados, sem a necessidade de substituições.

As fontes mais populares para captação de energia são energia solar, térmica e a de vibração. Das três, a energia solar tem a maior densidade, mas nem sempre é uma opção viável para a captação de energia, devido à falta de luz em determinados locais e horas do dia.

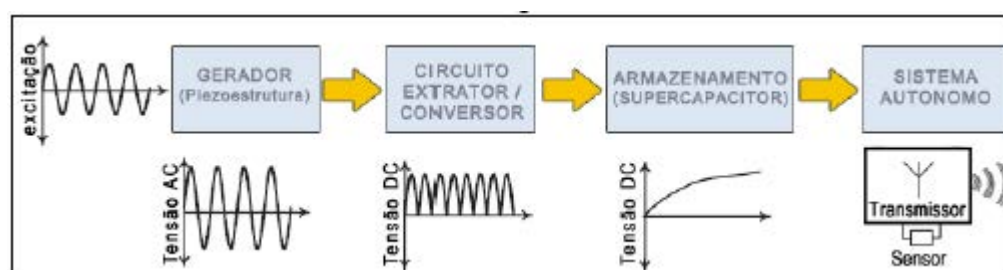
Esta pesquisa, centra-se na otimização da captação e extração de energia por vibração, que é abundante em muitos ambientes (TORRES et al., 2009).

As cerâmicas piezelétricas são dispositivos que realizam conversão de energia mecânica em elétrica e vice e versa quando excitadas mecânica ou eletricamente.

As cerâmicas piezelétricas vêm sendo utilizadas comercialmente desde o começo da década de 50, quando foram utilizadas inicialmente como um transdutor. Atualmente, existem diversas instituições que realizam pesquisas com cerâmicas piezelétricas, o que fez com que novas tecnologias surgissem.

Segundo Camara (2012), um sistema autônomo do tipo WSNs, elemento Piezelétrico, para extração com um supercapacitor para armazenamento, pode ser basicamente dividido em quatro partes: a fonte de energia, o circuito extrator/coletor, o dispositivo de armazenamento e o sistema que é alimentado pela energia produzida e armazenada, conforme visto na figura 1.

Figura 1 – Composição básica de um sistema autônomo de extração e armazenamento de energia.



Fonte: (CAMARA, 2012)

Materiais inteligentes são compostos por estruturas capazes de atuarem como sensores, controlar e atuar no meio em que estão inseridos.

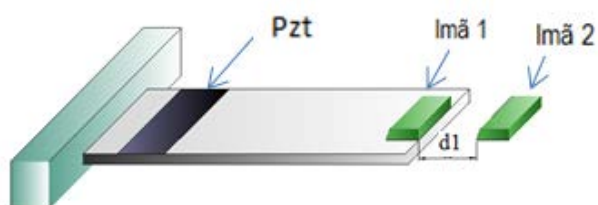
Esta área de pesquisa vem sendo explorada de modo intenso pelos engenheiros, pois exhibe uma vasta área de aplicações. Com a evolução dos atuadores piezelétricos, atualmente estão disponíveis atuadores mais potentes, abrindo novas fronteiras para aplicações do dispositivo.

Este estudo fundamenta-se em pesquisar diferentes configurações de piezo estrutura, que seja capaz de produzir um alto valor de energia, mesmo que a frequência de excitação apresente oscilações dentro de uma faixa pré-estabelecida. Além disso, a utilização de diferentes circuitos retificadores e conversores contínuos (DC-DC), possibilitam, o trabalho em uma maior largura de banda de frequência, extraindo o máximo de energia disponível no gerador piezelétrico para ser armazenada.

O sistema de armazenamento utilizado é um supercapacitor, uma vez que, apesar de armazenar uma quantidade menor de energia que uma bateria recarregável, possui vida útil maior que as baterias comuns, pois enquanto houver energia alimentando o supercapacitor, ele permanecerá funcionando (CAMARA, 2012)

Como complemento do trabalho, será abordada a ideia do uso de propriedades dinâmicas não lineares, em particular biestáveis. O princípio biestável é observado, quando se tem um ímã colocando adequadamente na extremidade livre da viga e outro em uma estrutura fixa, na frente da mesma, sob uma distância definida d_1 . O método não linear só será assumido quando a distância entre os ímãs for pequena como pode ser visto na figura 2.

Figura 2- Estrutura biestável. Viga com um ímã fixo na extremidade livre distante “ d_1 ” de outro ímã fixo a uma estrutura qualquer.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E CONCEITOS DE PIEZELETRICIDADE

Apresenta-se neste capítulo a revisão bibliográfica sobre a evolução da colheita de energia utilizando cerâmicas piezelétricas, bem como, a pesquisa na otimização de sistemas e suas aplicações na ciência e no cotidiano.

2.1 Captação de Energia Através da Vibração Mecânica

A descrição completa do efeito piezelétrico e os métodos utilizados para modelar o comportamento destes materiais serão analisados em inúmeros artigos e livros.

Há um número significativo de trabalhos publicados, desenvolvendo modelos precisos e discussões acerca dos fundamentos destes materiais, como de Crawley e de Luís (1987), Crawley e Anderson (1990), Hagood et al (1990), Smits e Choi (1991), Smits et al. (1991), Gandhi e Thompson (1992), Ikeda (1996), Culshaw (1996).

Uma das primeiras aplicações sugeridas, envolvendo captação de energia de vibração usando materiais piezelétricos, foi apresentada por Wen H. Ko (1969) cujo título é "*Piezoelectric energy converter for electronic implants*". O sistema utiliza uma cerâmica piezelétrica em uma viga engastada com uma massa em uma de suas extremidades, para captação de energia, a partir dos batimentos cardíacos para o uso na alimentação de marca-passos.

Hausler et al. (1984) realizaram o que parece ser, o primeiro estudo experimental utilizando-se de materiais Piezelétricos para extração de energia. Propuseram a utilização de um filme de PVDF (*Poly vinylidene fluoride*) como uma fonte de alimentação implantável num sistema biológico. Um protótipo do dispositivo foi fabricado e implantado *in vivo* no tórax de um cão, coletando energia a partir da sua respiração.

Antaki et al. (1995) publicaram o primeiro trabalho sobre extração de energia do corpo humano, utilizando material piezelétrico, incorporando pilhas piezo cerâmicas na sola de um sapato para armazenar a energia durante a caminhada e corrida. O projeto da extração utilizando sapato focou na transferência de energia máxima para as pilhas durante a compressão do piezo eletrodo, localizado no calcanhar do sapato.

Vários pesquisadores do MIT (*Massachusetts Institute of Technology* - EUA) também investigaram a extração piezelétrica de movimento do corpo humano, durante o mesmo período de tempo. Starner (1996) publicou um artigo descrevendo a energia gasta durante várias atividades diárias, incluindo caminhadas, respiração, movimento dos membros superiores, bem como da energia disponível do calor corporal e pressão arterial. Ele Propôs que a energia eliminada pelo corpo poderia ser utilizada para alimentar os dispositivos eletrônicos portáteis.

Umeda et al. (1996) desenvolveram pela primeira vez um modelo de circuito equivalente para analisar a resposta de uma placa piezelétrico quando impactada com uma esfera de aço. Os resultados das simulações mostraram que uma resistência de carga ideal existe para a máxima transferência de potência.

No ano seguinte, Umeda et al. (1997) realizaram um estudo experimental para validar o modelo desenvolvido anteriormente, incluindo retificação e armazenamento da energia elétrica do vibrador piezelétrico, através de uma ponte retificadora e um capacitor de armazenamento.

Williams e Yates (1996) propuseram um dispositivo que gera eletricidade quando incorporado num meio de vibração. Na sua avaliação, um transdutor eletromagnético foi escolhido. Uma análise harmônica do gerador foi realizado a fim de avaliar a viabilidade do dispositivo, para otimizar a concepção.

Foi determinada a partir desta análise que a quantidade de energia gerada era proporcional ao cubo da frequência de vibração. Isto ilustra que o gerador tinha um desempenho ruim em baixas frequências. Foi determinado também que um fator de baixo amortecimento fosse necessário para maximizar a geração de energia.

Grande interesse foi colocado pela comunidade pesquisadora sobre o desenvolvimento de modelos eletromecânicos que pudessem otimizar o comportamento de um sistema de extração de energia piezelétrica com maior precisão. Para melhorar os modelos existentes, Roundy e Wright (2004) e Dutoit et al. (2005) apresentaram um modelo com um único grau de liberdade para a análise dos parâmetros para extração de energia.

Em um esforço para aperfeiçoar os modelos extratores piezelétricos, formulações discretas de Rayleigh - Ritz (originalmente desenvolvido por Hagood et al. (1990)) foram desenvolvidos em uma viga engastada de Euler- Bernoulli por Sodano et al. (2004) e Dutoit et al. (2005 e 2007) e mais tarde aperfeiçoada por Elvin (2009).

A formulação de Rayleigh - Ritz fornece uma aproximação discreta (com graus finitos de liberdade) do sistema de parâmetros distribuídos, e rendeu aproximações mais precisas do que os modelos de 1º grau de liberdade.

Mais recentemente, Erturk e Inman (2008 e 2009) apresentaram a solução eletromecânica exata da extração em uma viga engastada piezelétrica. A solução analítica exata fornece o modelo mais preciso de captação de energia de vibração em balanço. Além disso, Erturk e Inman (2009, 2010 e 2011) também apresentaram uma modelagem melhorada dos parâmetros distribuídos em vigas da extração de energia, que podem ser usados para modelar vigas não uniformes, onde uma solução exata inexistente.

De Marqui (2010, 2011 e 2013) analisou a possibilidade de se obter fontes alternativas de energia elétrica para sistemas eletro eletrônicos remotamente operados, e com fontes limitadas de energia através da coleta de energia em rotores de helicópteros com o intuito de alimentar sistemas de verificação de integridade estrutural, que podem estar localizados ao longo da estrutura de aeronaves. Como continuidade da pesquisa, desenvolveu-se um dispositivo piezelétrico passivo para coleta de energia e supressão de vibrações no pitch link da aeronave.

2.2 - Evolução dos Circuitos Conversores e Retificadores

O desenvolvimento de circuitos eficientes para aplicações de captação de energia, tem atraído o interesse de vários pesquisadores. Um elemento chave de qualquer sistema de captação é um circuito elétrico que pode condicionar e armazenar a energia colhida de forma eficiente.

Goldfarb e Jones (1999) analisaram a eficiência do material piezelétrico na configuração paralela para fins de geração de energia elétrica. Um modelo de análise é apresentado e sugere que o problema fundamental na geração de energia elétrica, a partir de material piezelétrico, é o fluxo bidirecional da energia. Eles afirmam que esta ocorrência é problemática quando o piezo cerâmico é colocado em paralelo com um condensador, que está em série com a carga. Portanto, sugere-se que a máxima eficiência de geração de energia pode ser conseguida minimizando a quantidade de energia armazenada no lado do material piezelétrico.

Alguns trabalhos em circuitos de captação de energia adaptativa e eficientes foram realizadas por Ottman e Hofmann (2002, 2003 e 2004). Seu trabalho envolve a melhoria da

eficiência na extração de energia através da introdução de um conversor contínuo (DC-DC) após a ponte retificadora convencional. Eles descobriram que o melhor ciclo de trabalho do conversor de comutação, altera significativamente com a frequência de excitação.

Hofmann et al. (2002) continuaram o trabalho de Ottman et al. (2002) através da implementação de circuitos para maximizar o fluxo de potência do dispositivo piezelétrico. Este estudo utiliza circuito semelhante ao anterior, mas reconhece que um dos inconvenientes do seu trabalho foi que o circuito de controle de PWM (*Pulse width modulation*) necessita de mais energia do que foi produzido. Para corrigir este problema, os autores perceberam que o ciclo de trabalho ideal, muda pouco em níveis mais elevados de geração de energia quando excitado com um sinal senoidal.

Sodano et al. (2002) realizaram um estudo para investigar a quantidade de energia gerada através da vibração de uma placa piezelétrica, bem como, métodos de armazenamento de energia.

A placa foi testada usando um excitador eletromagnético (*Shaker*) com sinais de excitação ressonantes e aleatórios. Verificou-se que o piezelétrico poderia gerar uma potência máxima de 2 mW. Este trabalho foi o primeiro a demonstrar que a potência de saída de material piezelétrico foi capaz de recarregar uma bateria totalmente descarregada, sem o uso de fontes de energia externas.

Lefevre et al. (2005) mais tarde desenvolveu o conceito de “extração elétrica síncrona”, um circuito auto adaptativo em que a extração da carga elétrica sobre um dispositivo piezelétrico é sincronizado com o sistema de vibração, a fim de melhorar a eficiência na transferência de energia.

Em estudos semelhantes, Badel et al. (2005), Guyomar et al. (2005), e Lefevre et al. (2006) desenvolveram uma outra técnica síncrona chamada "*synchronized switch harvesting on inductor*" (SSHI), que contém um dispositivo de chaveamento eletrônico que é acionado nos deslocamentos máximos e mínimos do dispositivo piezelétrico. O dispositivo de comutação e um indutor são colocados em série ou em paralelo com o piezelétrico antes da ponte de diodos.

Lallart et al. (2010) e Kong et al. (2010) desenvolveram a técnica de auto ajuste de baixo custo, que contém a detecção automática de frequência e atuação, em que uma técnica de ajuste de rigidez é utilizada para alterar a frequência natural do extrator piezelétrico para coincidir com a fonte de vibração.

2.3 Utilização da Não Linearidade para Geração de Energia

Ng e Liao (2005) apresentaram um estudo onde compararam o desempenho na extração de energia para uma viga engastada com uma extremidade livre para os casos *unimorph*, *bimorph*, com elementos piezelétricos conectados em série e em paralelo. Descobriram que cada configuração proporciona um ótimo desempenho em um nível de excitação diferente, portanto, todas as configurações são úteis.

Mateu e Moll (2005) realizaram um estudo similar no qual compararam uma extratora *unimorph* a dois *bimorphs*, um com uma camada de substrato o outro sem. Também compararam uma viga engastada com configuração retangular convencional e a uma viga triangular engastada, e descobriu que a triangular é capaz de fornecer potências maiores.

Erturk et al. (2009), Barton et al. (2010), e Stanton et al. (2010) investigaram o uso de um oscilador não linear magneto elástica biestável para fins de captação de energia, onde ímãs permanentes fornecem forças atrativas e repulsivas, causando resposta não linear em uma viga em balanço. As investigações apontam que o fenômeno não linear permite comportamento de ressonância sobre uma ampla faixa de frequência, melhorando as limitações dos sistemas lineares que sofrem de perda de desempenho quando excitados próximos a frequência de ressonância.

Dai et al (2011) constituíram um sistema para operação de sistemas não lineares. O projeto constituiu de uma viga, um circuito magnético, duas estruturas fixas com ímãs e o piezo eletrodo.

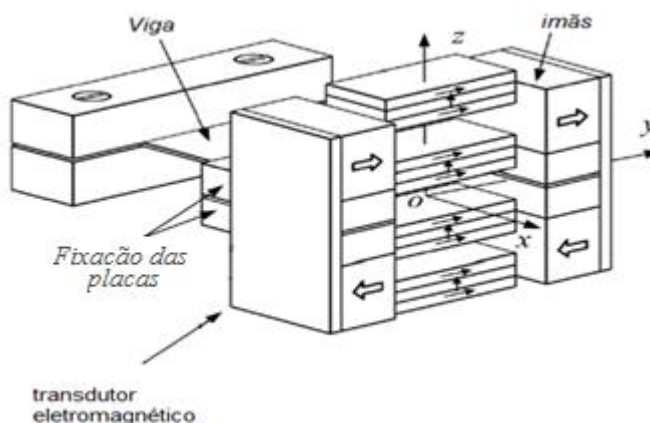
A disposição da viga central em relação aos ímãs produz um gradiente de fluxo de corrente. O circuito magnético, ou seja, o ímã está disposto na extremidade livre, e ainda, atua como corpo de prova. As estruturas ou placas fixas são intuitivas para aumentar a rigidez, evitando a torção da viga. Quando o sistema é excitado por uma força externa, este causa um movimento relativo entre o circuito magnético e o transdutor eletromagnético. O transdutor é influenciado pelo campo magnético gerando uma tensão, esta tensão é transmitida ao piezelétrico, produzindo energia elétrica.

Os autores observaram, a partir dos dados coletados, posições que tornam o transdutor propício a indução de grandes variações no campo magnético. Construiu-se diferentes protótipos de estruturas, a fim de estudar as características da energia coletada, sendo variado

o número de transdutores. A partir da quantidade de transdutores empregados, foi observada a extração de energia nos transdutores: 1.44mW, 3.95mW, 4.07mW e 7.13mW.

Logo, verifica-se que arranjado de maneira propícia, o sistema tem um ganho considerável, como pode ser visto na figura 3.

Figura 3 - Representação esquemática proposta por Dai, utilizando múltiplos magnetos.



Fonte: Dai et al. (2011).

Brennan et al. (2011) estudaram os benefícios de um coletor de energia aplicado a um sistema não linear. O projeto se baseia no princípio de conservação de energia para explorar o limite de desempenho de um projeto não linear em comparação a um linear e consiste em dois estágios.

O primeiro relaciona um projeto biestável, que move rapidamente a massa entre dois estados estáveis que resulta do aumento da velocidade de excitação, proporcionando maior coleta de energia. O segundo é a utilização de um elemento para o aumento da rigidez. A análise mostra que a largura da banda depende do coeficiente de amortecimento, da não linearidade do sistema como da aceleração de entrada. O objetivo deste experimento é aumentar a largura da banda, de modo que o dispositivo atue sobre uma faixa de frequência mais ampla.

Ferrari et al. (2010) estudaram a presença de bi estabilidade, fazendo com que o sistema opere entre dois estados através de uma excitação mecânica externa. O sistema é obtido através da fixação do ímã na viga e um ímã em sua frente, explorando o conceito de repulsão magnética. O projeto se baseia na variação de distância entre os ímãs. Como esperado, se a distância é perto o suficiente, o mecanismo bi estável é criado, saltando através de dois estados específicos. Um aumento de 88% na tensão RMS (*Root Mean Square*) é obtido a partir dos teste realizados em relação a um comportamento linear.

Yun e Yun (2010) estudaram um dispositivo de captação de energia que emprega tanto a conversão de energia mecânica quando o comportamento biestável com vigas presas operando na variação de frequência do ambiente. O sistema se mostrou eficiente em circunstâncias práticas, usando vibrações mecânicas variáveis no tempo.

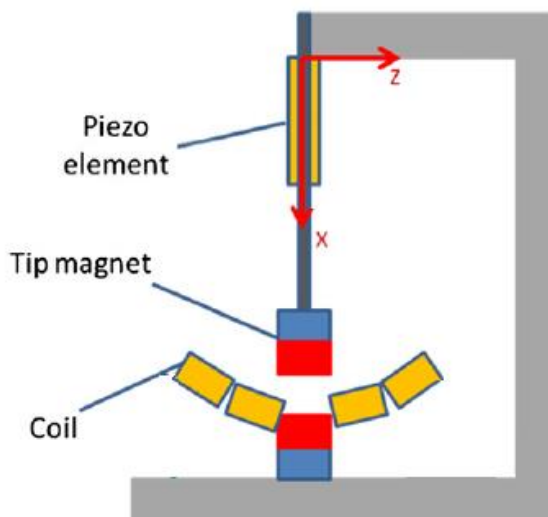
Ando et al. (2010) otimizaram o estudo de captação utilizando materiais piezelétricos associado a energia magnética. Sabendo da variação exercida sobre o ambiente com diferentes frequências, verificou-se que o uso do sistema não linear torna propícia a maior captação de energia. O projeto foi baseado em uma estrutura (viga) composta por um piezo eletrodo perto de sua extremidade fixa, enquanto em sua extremidade livre, apresenta um imã. Depois do imã preso na viga, é colocado outro imã disposto com variações de distâncias para que o melhor resultado seja obtido.

O sistema é relacionado através de dois estados estáveis, permanecendo em um dos estados quando o estímulo não é grande o suficiente para tira-lo desta condição. A partir desse experimento, verificou-se que uma maior quantidade de energia é captada sobre a excitação de baixas frequências. Variações de distância entre os imãs são relacionadas a um faixa de 1.5 mm a 4.5 mm e concluiu-se, como esperado, que pequenas distâncias exibem um melhor comportamento não linear com um rendimento desejado. Um valor aproximado de 1.7 mm foi detectado como condições ótimas para esse sistema não linear.

Karami e Inman (2010) estudaram o comportamento de um sistema linear, não linear e bi estável não linear. A figura 4 representa os mecanismos descritos. Através da vibração causada na viga na direção vertical, o sistema é descrito como um processo linear; adicionado imãs tanto na viga quanto em posições posteriores, fará com que o sistema se torne não linear, podendo ser bi estável, dependendo da configuração dos imãs presentes.

A preferência em estudar sistemas não lineares é devido ao fato que estes atingem uma faixa mais larga de frequências. Foi observado que a limitação do ciclo de oscilação é uma medida mais eficaz, mesmo aumentando a ordem de magnitude do sistema.

Figura 4 - Representação linear e não linear do sistema descrito.



Fonte: Karami e Inman (2010).

Stanton et al. (2010) estudaram as inconveniências que podem surgir na extração de energia através de uma ampla banda de frequências. A fim de demonstra-lo, um sistema foi montado para verificar o sistema bi estável. A viga é excitada horizontalmente com piezelétrico. Para ajudar na análise dos resultados, um modelo matemático foi determinado do sistema. A fim de solucionar o problema, foram utilizadas as equações de Euler-Lagrange. Na extremidade livre da viga foi colocado um ímã neodímio, que é orientado em polarização oposta ao campo magnético. Em frente dele, foi colocado um ímã, também neodímio, que é separado do primeiro a uma distância variável. Em uma distância crítica, a força de restauração elástica é superior à repulsão magnética, forçando o sistema a operar em dois estados estáveis. O modelo foi capaz de prever com precisão as principais características do sistema (como frequência, coeficiente de acoplamento, capacitância), bem como a quebra de simetria causada pelos efeitos da bifurcação sobre o sistema.

Tang et al. (2012) estudaram o acoplamento de ímãs ao projeto, sob diferentes cenários de vibração. Primeiramente, a adição de ímãs foi realizado a fim de melhorar a captação de energia. Tanto mono estável quanto bi estável, são investigados com frequências variáveis, com diferentes níveis de excitação.

As melhores características do projeto não linear podem ser destacadas por dois aspectos: a saída de excitação magnética aumenta para excitações de baixa frequência e a largura da banda aumentada para altas frequências. Configuração mono estável, há baixa

excitações, a parte não linear da força magnética é desprezível, sendo usada para sintonizar a frequência.

Em altas excitações, altas e baixas órbitas de energia coexistem em certas faixas de frequências. Verificou-se a melhora da situação não linear mono estável em relação à linear, principalmente a uma distância específica do ímã de 9.5 mm.

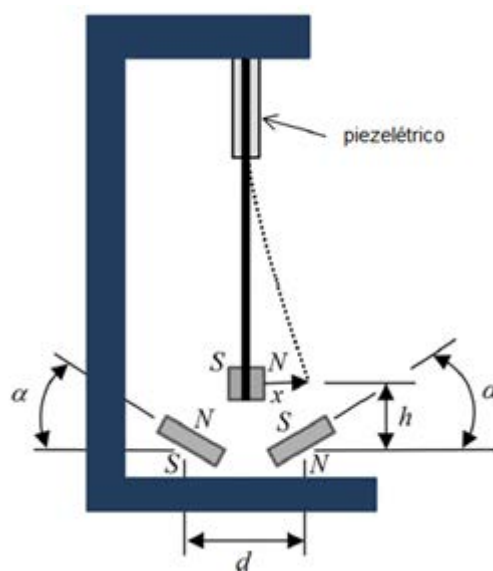
Para o segundo princípio, sendo bi estável, o sistema é quase sempre mais eficaz que um sistema linear, exceto quando os ímãs são colocados muito pertos, o que neste caso, o oscilador se mostra confinado em um “vale” de potencial, ou seja, um decréscimo considerável.

Por fim, a situação otimizada não linear consiste na transição entre a situação mono e bi estável. A partir desta parametrização é possível observar que ambas situações podem ser otimizadas, desde que os ímãs estejam em uma distância específica a essa transição.

Zhou et al. (2013) investigaram um sistema não linear através do acoplamento de ímãs rotativos (inclinados a um ângulo α com relação a horizontal). O sistema pode exibir tanto comportamento mono como o de bi estabilidade, sob uma faixa de frequências dependendo do ângulo α que os ímãs fazem. Cada um dos ímãs externos são fixados em um ângulo determinado. A configuração deste pode ser separada através da deflexão α , em vez da mudança das distâncias dos ímãs, que no caso, requer um maior volume de espaço para o experimento.

Verificou-se que os ângulos de inclinação dos ímãs desempenham um papel no aumento da banda, alterando assim, as características dinâmicas. Como citado anteriormente, uma enorme vantagem do sistema é a compactação, fazendo com que um volume menor de espaço seja necessário.

Figura 5 – Esquema proposto por Zhou utilizando ímãs inclinados em relação a base de um ângulo α .



Fonte: Zhou et al. (2013).

Alguns resultados experimentais publicados recentemente, referente a extração de energia utilizando diferentes métodos, são listados e resumidos na Tabela 1. A tabela está dividida em três seções, de acordo com o mecanismo de conversão de energia.

Tabela 1 – Comparação dos resultados de diferentes experimentos de extração de energia

Micro-gerador	Ano	Potência (μW)	Freq (Hz)	Volume* (cm^3)	Aceleração entrada (m/s^2)	NPD (kgs/m^3)
<i>Piezelétrico</i>						
Glynne-Jones	2004	3	80.1	70	NA	NA
Roundy	2003	375	120	1.0	2.5	60
Tanaka	2005	180	50	9	1	20.5
Jeon	2005	1.0	1.4×10^4	2.7×10^{-5}	106.8	3.2
Fang	2006	2.16	609	6.0×10^{-4}	64.4	0.9
Reilly	2006	700	40	4.8	2.3	28.2
Lefeuivre	2006	3.0×10^5	56	34	0.8	1.42×10^{-74}
Ferarri	2006	0.27	41	0.188	8.8	0.018
Mide	2010	8.0×10^{-4}	50	40.5	9.8	2.1
Kok	2011	110	155	0.12	4.9	38.2
<i>Eletromagnético</i>						
Ching	2000	5	104	1	81.2	7.6×10^{-4}
Li	2000	10	64	1.24	16.2	0.03
Williams	2001	0.33	4.4×10^3	0.02	382.2	1.1×10^{-4}
Glynne-Jones	2001	5.0×10^3	99	4.08	6.9	26.1
Mizuno	2003	4.0×10^{-4}	700	2.1	12.4	1.24×10^{-6}
Tanaka	2005	1.44	100	0.04	19.7	0.09
Beeby	2007	46	52	0.15	0.6	884
Torah	2008	58	50	0.16	0.6	1.0×10^3
Ferro Solution	2008	1.08×10^4	60	133	1	84.4
Perpetuum	2009	9.2×10^4	22	130.7	9.8	7.33
<i>Eletrostático</i>						
Tashiro	2002	36	6	15	12.8	0.015
Mizuno	2003	7.4×10^{-6}	743	0.6	14.0	6.34×10^2
Arakawa	2004	6.0	10	0.4	4.0	0.96
Despesse	2005	1.0×10^2	50	18	8.8	0.7
Miao	2006	2.4	20	0.6	2.2×10^3	8.0×10^{-7}
Basset	2009	0.06	250	0.07	2.5	0.15

* Tamanho do dispositivo não inclui o circuito de controle elétrico e o circuito de armazenamento.

NA = Dados não disponíveis na literatura.

NPD = Normalised Power Density.

Fonte: Adaptada de Swee Leong Kok (2011)

2.4 Conceitos Básicos de Piezeletricidade

Segundo Katzir (2003) o termo “piezo” significa pressão em grego. Em 1880, Jacques e Pierre Curie descobriram que cristais de quartzo e os sais de Rochelle, quando submetidos à pressão, podiam gerar potencial elétrico. Esse fenômeno é conhecido como efeito piezo.

A piezeletricidade inversa foi deduzida, matematicamente, dos princípios fundamentais da termodinâmica por Lippmann em 1889. Os irmãos Curies confirmaram imediatamente a existência do “efeito piezo inverso” (quando expostos a determinados potenciais elétricos, tais materiais mudavam sua forma, expandindo ou se contraindo), e continuaram os estudos para obter a prova quantitativa da reversibilidade completa das deformações eletromecânicas em cristais piezelétricos. (NATAL, 2008)

A aplicação feita por Paul Langevin foi através do desenvolvimento de sonares na primeira guerra mundial. Langevin utilizou cristais de quartzo acoplados a massas metálicas (criando um transdutor que recebeu seu nome) para gerar ultrassom na casa de kHz. A utilização da piezeletricidade no sonar, e o sucesso deste projeto, causaram um intenso interesse no desenvolvimento de dispositivos piezelétricos. (LUZ et al., 2003)

2.4.1 Classificação e Efeito Piezelétrico

A estrutura cristalina do material define a capacidade piezelétrica do material. O cristal tem composição química definida, de forma que o retículo cristalino é determinado de acordo com a disposição dos íons.

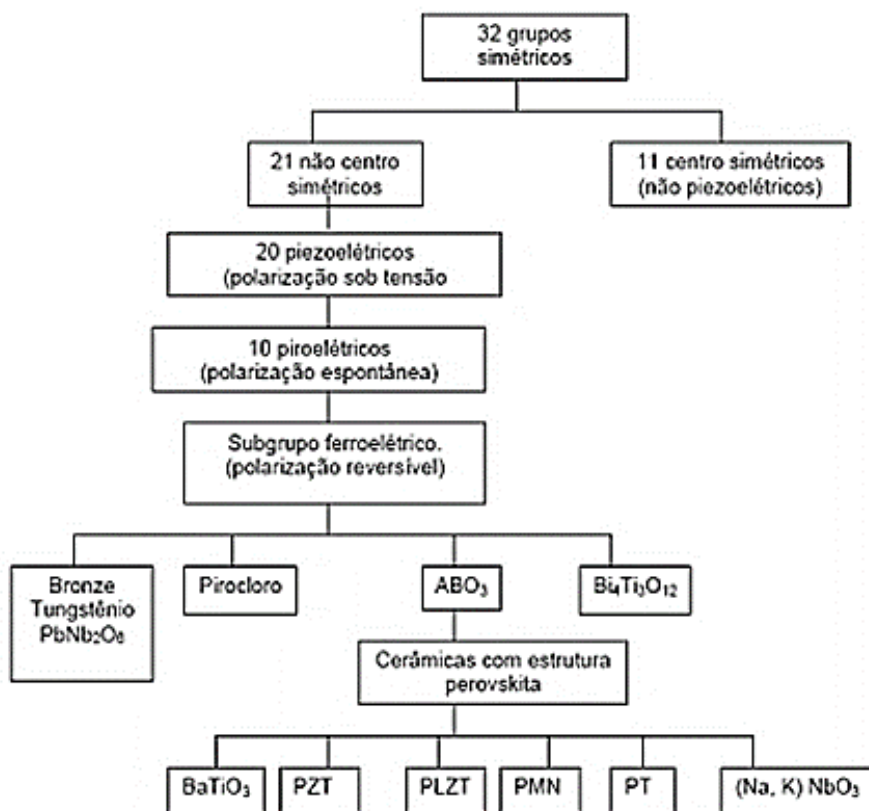
Uma cela unitária é definida como a menor unidade de repetição do retículo. A piezeletricidade no cristal depende da simetria específica desta cela. (GASPAROTTO, 2002)

A simetria em torno de um ponto no espaço foi definida pela utilização de elementos como: eixos de simetria, centro de simetria, planos de simetria e associações. (ROSANA, 2007)

Desta forma, os cristais são divididos em 32 classes ou grupos de simetria diferentes; 21 delas, não têm centro de simetria (condição necessária para a existência de piezeletricidade) e 11 são centrossimétricas. (GASPAROTTO, 2002)

Essas classes podem ser vistas na figura 6.

Figura 6 - Relação dos piezelétricos e subgrupos baseados na simetria.



Fonte: (GASPAROTTO, 2002).

A presença de piezeletricidade é definida pela ausência de centro de simetria. Quando não há centro de simetria os íons positivos e negativos se movimentam, um em relação ao outro, produzindo dipolos elétricos (polarização).

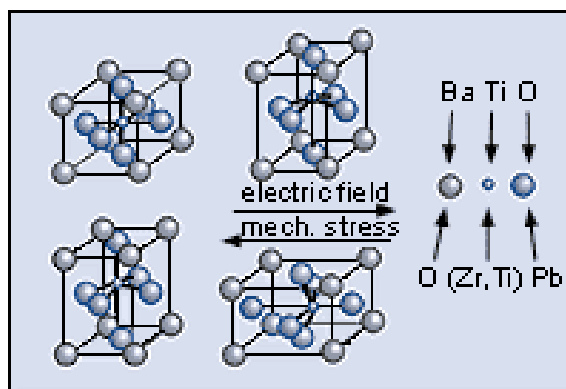
Segundo Rosana (2007), dos minerais que possuem esta propriedade, o quartzo é o mais expressivo, pois, ao se aplicar pequenas pressões paralelamente a um de seus eixos, produzirá uma corrente elétrica capaz de ser detectada.

A turmalina, por possuir característica piezelétrica, é usada como detector de pressão, isto é, cálculo da pressão a partir da corrente gerada. Outras substâncias artificiais que também apresentam piezeletricidade são: Sal de Rochelle, cerâmicas, PVDF-fluoreto de polivinilideno. (SUSLICK, 1989)

As cerâmicas piezelétricas pertencem ao grupo de materiais ferroelétricos. Esses materiais são cristais que são polares sem um campo elétrico aplicado, também denominado polarização espontânea como mostra a figura 7. Característico deste estado é a reversibilidade

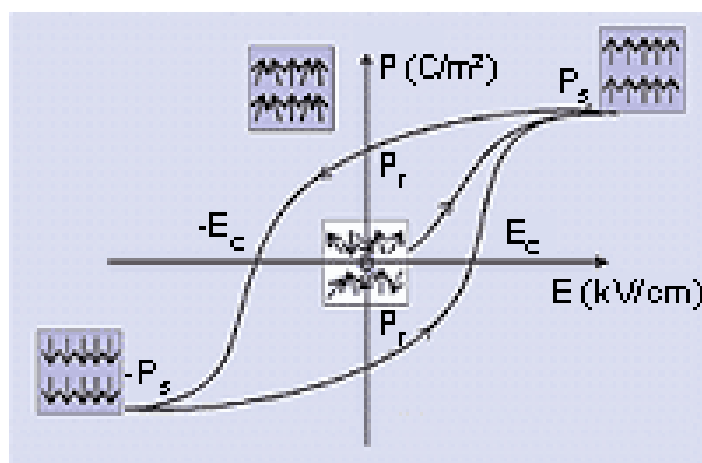
estável do eixo de polarização sob a influência de um campo elétrico descrito graficamente por uma curva de histerese observadas nas figuras 8 e 9. A reversibilidade da polarização e o acoplamento entre os efeitos mecânicos e elétricos são importantes para a ampla utilização tecnológica da piezo cerâmica.

Figura 7 - Cubo (paraelétrica) e tetragonal estrutura (ferroelétrica) de PZT e BaTiO_3 antes e depois de um campo elétrico ser aplicada ou uma apresentar uma força mecânica em vigor.



Fonte: *Piezo Company LTD.*

Figura 8 - Curva de histerese de um ponto de vista cristalográfico, estes materiais piezelétricos exibem o que é chamado de estrutura cristalina perovskita.



Fonte: *Piezo Company LTD.*

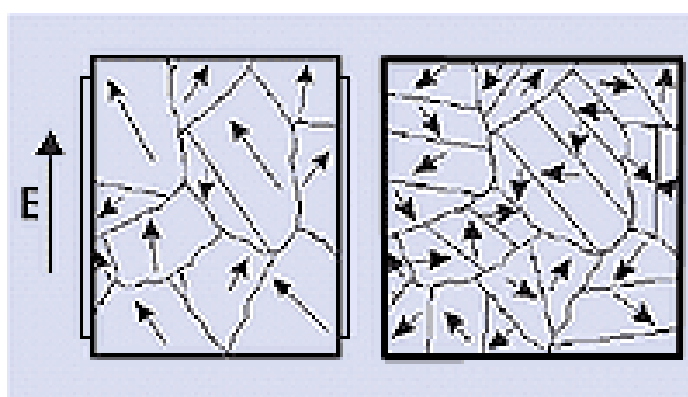
O efeito piezoelétrico em piezo cerâmica comuns (PbTiO_3 - PbZrO_3) são sintetizados a partir de óxidos de chumbo, titânio e zircônio.

Dopagens especiais destas cerâmicas piezoelétricas tornam possível ajustar individualmente os parâmetros dielétricos, conforme necessário. Estes materiais perdem sua característica ferroelétricos acima de uma temperatura característica, conhecida como a

temperatura de Curie. Assim, estarão em um estado paraelétrico, ou seja, sem dipolos presentes.

A constante dielétrica relativa tem um valor máximo próximo da temperatura de Curie. Abaixo do ponto de Curie, o material apresenta uma estrutura distorcida, resultando na formação de dipolos e fases tetragonais e romboédricas dos cristalitos, que são de interesse para a tecnologia piezo.

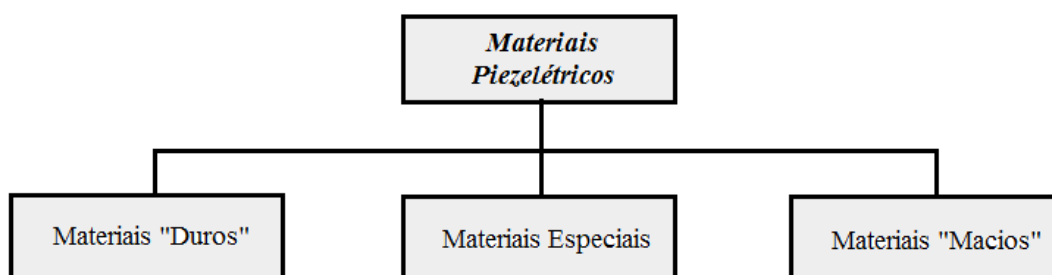
Figura 9 - Representação simbólica dos processos de reorientação elétrica em estrutura de cristalito e domínio cerâmica piezolétrica.



Fonte: *Piezo Company LTD.*

Através da curva de histerese é possível classificar os materiais piezolétricos, podendo ser denominados como materiais “Duros”, os que apresentarem uma curva de histerese com área pequena, e como materiais “Macios”, os que apresentam uma curva de histerese com área mais significativa. Os materiais “Duros” podem ser classificados como materiais de alta potência e os “Macios” como materiais de alta sensibilidade. (PEREIRA, 2010)

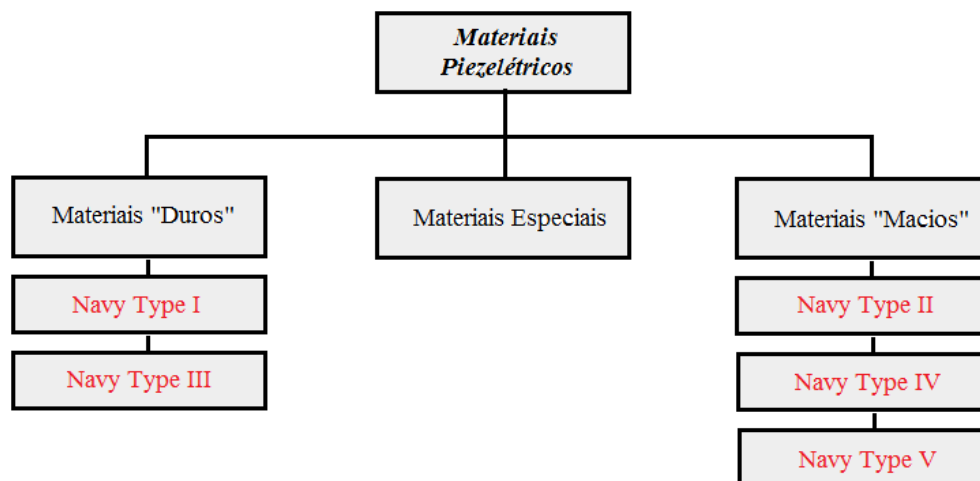
Figura 10 - Principal divisão dos materiais piezolétricos.



Fonte: Adaptado de Pereira (2010).

Na figura 11 são apresentados os subgrupos dos materiais “Duros” e “Macios”, baseando-se na norma americana DOD-STD-1376^a(SH).

Figura 11 - Subdivisão dos materiais piezelétricos “Duros” e “Macios” de acordo com a norma americana DOD-STD-1376A(SH).



Fonte: Pereira (2010).

Baseados nos estudos relacionados à microestrutura, dopantes e propriedades (elastodielétricas e piezelétricas), o Departamento de Defesa (*Department of Defense - DoD*) da Marinha Americana, padronizou através da Norma DoD-STD –MIL -SH -1376 (1971), 6 tipos de pós cerâmicos para transdutores eletroacústicos.

Baseado na norma, Pereira (2010), caracterizou os subgrupos como:

Navy Type I (“Duro”): É conhecida comercialmente como PZT4. Possui destaques nas constantes d_{33} , $\tan\delta$ e Q . Utilizadas para condições de uso contínuo em aplicações de alta e média potência, possuindo baixas perdas mecânicas e dielétricas e altas amplitudes.

Navy Type II (“Macio”): É conhecida comercialmente como PZT5A. Possui destaque nas constantes d_{ij} , g_{15} , N_k e TC . Apresenta perdas dielétricas e mecânicas que inviabilizam a excitação contínua com alta intensidade. Por possuir alta sensibilidade, é utilizada para dispositivos de transmissão de baixa potência.

Navy Type III (“Duro”): É conhecida comercialmente como PZT8. Possui destaque nas constantes $\tan\delta$, Q e conversão de potência máxima. É utilizada para aplicações de alta

potência. Similar ao Navy Type I, é capaz de converter o dobro de potência mantendo baixas as perdas mecânicas e dielétricas.

Navy Type IV (“Macio”): É conhecida comercialmente como Titanato de Bário. Possui destaque na constante TC (Temperatura de Curie). Utilizado para aplicações de média potência.

Navy Type V (“Macio”): É conhecida comercialmente como PZT5j. Possui destaque nas constantes d_{33} , K_{33} e g_{33} . Utilizado para aplicações que requerem altas energias e diferença de potencial.

Navy Type VI (“Macio”): É conhecida comercialmente como PZT5H. Possui destaque nas constantes d_{33} e K_{33} . Adequado para aplicações que requerem grandes deformações mecânicas (Δl) como posicionadores e atuadores.

A tabela 2 apresenta uma comparação das principais características dos materiais cerâmicos:

Tabela 2 - Principais características dos materiais cerâmicos.

Característica	Cerâmica Macia	Cerâmica Dura
Constantes Piezelétricas	Maior	Menor
Permissividade	Alta	Baixar
Constantes dielétricas	Maior	Menor
Perdas dielétricas	Alta	Baixar
Fatores de acoplamento eletromecânico	Maior	Menor
Resistência Elétrica	Muito alta	Baixar
Fatores de qualidade mecânica	Baixo	Alta
Campo coercitivo	Baixo	Alta
Linearidade	Pobre	Melhor
Polarização / despolarização	Fácil	Difícil

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4.2 Domínios ferroelétricos e polarização piez-elétrica.

Um cristal ferroelétrico pode ser dividido em regiões espaciais com diferentes direções de polarização, chamados de domínios ferroelétricos.

O domínio de um corpo sólido é uma região espacial fisicamente limitada onde os vetores que caracterizam o estado de um ponto do corpo sólido não tem o mesmo sentido em toda a parte. Para que o domínio ferroelétrico ocorra, a grandeza deve ter alinhamento e o mesmo valor absoluto da polarização espontânea. Dependendo do tamanho da partícula do material cerâmico, os cristalitos individuais apresentam apenas alguns domínios delimitados.

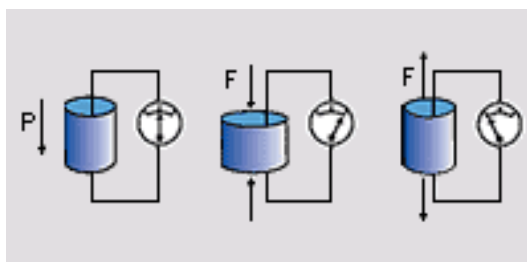
No caso de mudanças no campo elétrico ou no esforço mecânico, a mudança ocorre e a polaridade das regiões inteiras pode ser invertida. Estes processos, e o deslocamento irreversível dos domínios, são algumas das razões para o fenômeno da histerese ferroelétrico.

De um ponto de vista estatístico, não há uma distribuição uniforme de instruções espontâneas de polarização entre os domínios e o material é isotrópico, isto é, não piez-elétrico. Através da aplicação de um forte campo elétrico, a polarização espontânea é reorientada para a saturação de polarização. Isso produz uma polarização residual paralelo à direção do campo e o material se torna piez-elétrico.

A polarização direta ocorre quando deformações mecânicas surgem como resultados de uma força externa, que atua sobre o corpo piez-elétrico para induzir tensões positivas e negativas, que se manifestam em momentos de dipolo.

A formação resulta em um campo elétrico e causa um potencial elétrico nos eletrodos isolados. Este efeito piez-elétrico direto é referido como o efeito do gerador.

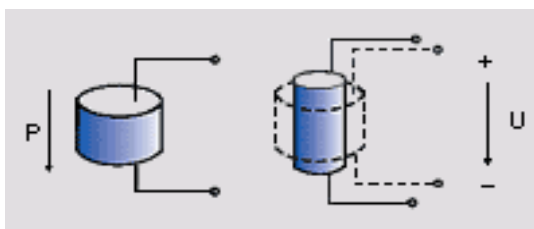
Figura 12 - Polarização Direta.



Fonte: Piceramic Company.

A aplicação de uma tensão elétrica no material piezelétrico, resulta em uma deformação. A quantidade de movimentos é uma função da polaridade da tensão aplicada e da direção do vetor de polarização. Aplicando uma tensão alternada, gera-se uma mudança cíclica na geometria, como por exemplo, o aumento ou diminuição do diâmetro do PZT. Se o corpo é preso, ou seja, se a deformação livre é limitada, uma força mecânica é gerada. Este efeito piezelétrico inverso é chamado de efeito motor.

Figura 13 - Polarização Reversa.



Fonte: Piceramic Company.

2.4.3 Constantes Piezelétricas

Devido a cerâmica piezelétrica ser anisotrópica, as constantes físicas estão relacionadas com o sentido da força mecânica ou tensão elétrica aplicadas, e as direções perpendiculares à força aplicada. Cada constante geralmente tem dois índices, que indicam as direções das duas grandezas relacionadas, tais como a tensão mecânica e a deformação

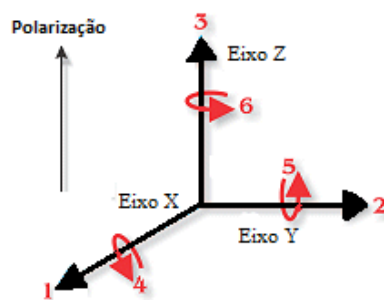
O sentido de polarização positiva normalmente é feita de forma a coincidir com o eixo-Z de um sistema retangular de X, Y e Z. (Figura 14).

As direções de X, Y ou Z são representadas pelos índices de 1, 2, e 3, respectivamente, e o cisalhamento sobre um destes eixos, são representados pelos índices 4, 5, e 6, respectivamente.

Definições das constantes utilizadas com mais frequência, e as equações para determinar e relacionar essas constantes, estão resumidas no decorrer deste tópico.

A constante de carga piezelétrica, “ d ”, a tensão piezelétrica, “ g ”, e a permissividade, “ e ”, são fatores que dependem da temperatura.

Figura 14 - A direção de polarização positiva normalmente é feita de forma a coincidir com o eixo Z.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A constante de carga piezelétrica, d (metros/Volt ou Coulombs/Newton), é a polarização gerada por unidade de tensão mecânica (T), aplicada a um material piezelétrico ou, alternativamente, é a deformação mecânica (S) exercida por ele, por unidade de campo elétrico aplicado.

O primeiro índice de “ d ” indica a direção de polarização gerada no material quando o campo elétrico, “ E ”, é zero. O segundo índice, é a direção da tensão aplicada ou a tensão induzida, respectivamente. A deformação induzida em um material piezelétrico por um campo elétrico aplicado, é o produto do valor para o campo elétrico e o valor para “ d ”, sendo este um importante indicador da adequação do material para aplicações dependentes da deformação (atuadores). (IKEDA, 1990)

Tabela 3 – Elementos da constante de carga piezelétrica.

d_{33}	Polarização induzida na direção 3 (paralela à direção em que elemento cerâmico é polarizada) por unidade de tensão mecânica aplicado na direção 3.
d_{31}	Polarização induzida na direção 3 (paralela à direção em que elemento cerâmico é polarizada) por unidade de tensão mecânica aplicado na direção 1 (perpendicular à direção na qual o elemento de cerâmica é polarizado).
d_{15}	Polarização induzida na direção 1 (perpendicular à direção na qual o elemento de cerâmica é polarizada) por unidade de tensão de cisalhamento aplicada sobre a direção 2 (direção 2 perpendicular à direção na qual o elemento de cerâmica é polarizado).

Fonte: Elaborada pelo autor.

A constante de tensão piezométrica, “ g ” (Volts x metros/Newton), é o campo elétrico gerado por um material piezométrico, por unidade de tensão mecânica aplicada, ou, alternativamente, é a deformação mecânica sofrida por um material piezométrico, por unidade de deslocamento elétrico aplicado.

O primeiro índice de “ g ”, indica a direção do campo elétrico gerado no material, ou a direção do deslocamento elétrico aplicado.

O segundo índice é a direção da tensão mecânica aplicada ou a deformação mecânica induzida, respectivamente. Devido a força do campo elétrico induzido produzido por um material piezométrico (em resposta a uma tensão mecânica aplicada) ser o produto do valor da tensão aplicada e o valor de “ g ”, ele se torna um importante fator para avaliar a adequação de um material para aplicações de detecção (sensor).

Tabela 4 – Elementos da constante de tensão piezométrica.

g_{33}	Campo elétrico induzido na direção 3 (paralela à direção em que elemento cerâmico é polarizada) por unidade de tensão mecânica aplicado na direção 3.
g_{31}	Campo elétrico induzido na direção 3 (paralela à direção em que elemento cerâmico é polarizada) por unidade de tensão mecânica aplicado na direção 1 (perpendicular à direção na qual o elemento de cerâmica é polarizado).
g_{15}	Campo elétrico induzido na direção 1 (perpendicular à direção na qual o elemento de cerâmica é polarizada) por unidade de tensão de cisalhamento aplicada sobre a direção 2 (direção 2 perpendicular à direção na qual o elemento de cerâmica é polarizado).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A permissividade ou constante dielétrica, “ ϵ ”, para um material cerâmico piezométrico, é o deslocamento dielétrico por unidade de campo elétrico.

ϵ^T é a permissividade em tensão mecânica constante. ϵ^S é a permissividade em deformação mecânica constante. O primeiro índice para ϵ indica a direção do deslocamento dielétrico e o segundo é a direção do campo elétrico.

A constante dielétrica relativa, K , é a razão entre a quantidade de carga que um elemento construído a partir de material cerâmico pode armazenar, em relação à constante dielétrica absoluta, ϵ_0 , que representa a carga que pode ser armazenada por os mesmos eletrodos quando separados por um vácuo, em igualdade de tensão ($\epsilon_0=8,85 \times 10^{-12}$ F/m).

Tabela 5 – Elementos da constante dielétrica.

ϵ_{11}^T	Permissividade para deslocamento dielétrico e campo elétrico na direção 1 (perpendicular à direção na qual o elemento de cerâmica é polarizado), sob tensão mecânica constante.
ϵ_{33}^S	Permissividade para deslocamento dielétrico e campo elétrico na direção 3 (paralela à direção em que elemento cerâmico é polarizado), sob deformação mecânica constante.

Fonte: Elaborado pelo autor

“s” é a tensão produzida por um material piezelétrico, por unidade de tensão mecânica aplicada, e, para as direções 11 e 33, é o inverso do módulo de elasticidade (módulo de Young, Y). s^D é a propensão no âmbito de um deslocamento elétrico constante, s^E é a tendência no âmbito de um campo elétrico constante. O primeiro índice indica o sentido da deformação, o segundo é a direção da tensão mecânica.

Tabela 6 – Elementos da constante de Young.

s_{11}^E	Propensão elástico para tensão mecânica na direção 1 (perpendicular à direção na qual o elemento de cerâmica é polarizado) e acompanha a deformação na direção 1, sob campo elétrico constante (curto-circuito).
s_{11}^D	Propensão elástico para tensão mecânica na direção 1 (paralela à direção em que elemento cerâmico é polarizado) e acompanha a deformação na direção 1, sob deslocamento elétrico constante (circuito aberto).

Fonte: Elaborado pelo autor

O módulo de Young, “ γ ”, é um indicador da rigidez (elasticidade) de um material cerâmico; γ é determinado a partir do valor da tensão mecânica no material dividido pelo valor da deformação resultante, no mesmo sentido.

$$\gamma = \frac{\text{Tensão}}{\text{deformação}} \quad (1)$$

O fator de acoplamento eletromecânico, “ k ”, é um indicador da eficácia com que um material piezelétrico converte energia elétrica em energia mecânica, ou, converte a energia mecânica em energia elétrica.

O primeiro índice " k " indica a direção ao longo da qual os eletrodos são aplicados, o segundo indica a direção ao longo da qual a energia mecânica é aplicada, ou desenvolvida.

Valores de " k " citados nas especificações dos fornecedores de cerâmica, tipicamente, são valores máximos teóricos. Nas frequências mais baixas de entrada, uma cerâmica piezométrica típica pode converter 30-75% da energia, dependendo da formulação do material cerâmico e das direções das forças envolvidas.

$$k = \sqrt{\frac{\text{energia mecânica armazenada}}{\text{energia elétrica aplicada}}} \quad (2)$$

ou então,

$$k = \sqrt{\frac{\text{energia elétrica armazenada}}{\text{energia mecânica aplicada}}} \quad (3)$$

Um alto " k " é geralmente desejável para a conversão eficiente de energia, mas ela não leva em conta as perdas dielétricas e perdas mecânicas. A medida precisa de eficiência, é a razão entre a energia convertida utilizável fornecida pelo elemento piezométrico para o total de energia absorvida pelo elemento.

Por essa medida, os elementos cerâmicos piezométricos em sistemas bem projetados podem apresentar eficiências superiores a 90%. (JAFFE, 1971)

Para um disco ou placa de material de superfície, cujas dimensões são grandes em relação à sua espessura, o fator de acoplamento referente a espessura piezométrica, " kt ", é uma expressão única de k_{33} , expressa o acoplamento entre um campo elétrico na direção 3 e as vibrações mecânicas na mesma direção.

Tabela 7 – Elementos do fator de acoplamento eletromecânico.

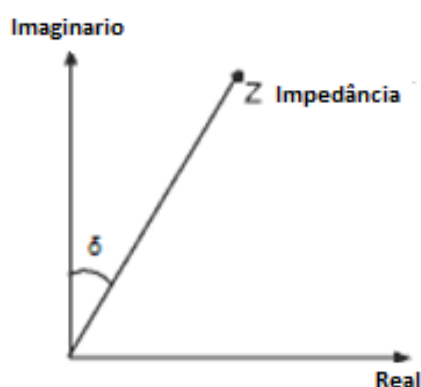
k_{33}	Fator para o campo elétrico na direção 3 (paralela à direção em que elemento cerâmico é polarizado) e as vibrações longitudinais na direção 3.
kt	Fator para o campo elétrico na direção 3 e das vibrações na direção 3 ($kt < k_{33}$).
k_{31}	Fator para o campo elétrico na direção 3 (paralela à direção em que o elemento cerâmico é polarizado) e as vibrações longitudinais na direção 1 (perpendicular à direção na qual o elemento de cerâmica é polarizado).

k_p	Fator para o campo elétrico na direção 3 (paralela à direção em que elemento cerâmico é polarizado) e as vibrações radiais na direção 1 e 2 (ambos na direção perpendicular à direção na qual o elemento de cerâmica é polarizado – “disco fino”).
-------	--

Fonte: Elaborado pelo autor

O fator de dissipação dielétrica δ para um material cerâmico é a tangente do ângulo de perda dielétrica, figura 15. É determinado pela relação de condutância eficaz e a susceptância eficaz num circuito paralelo, medido por meio de uma ponte de impedância. Os valores de $\tan \delta$ normalmente são determinados a 1 kHz. (IKEDA, 1990)

Figura 15 – Cálculo do fator de dissipação dielétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando que a constante dielétrica relativa é uma propriedade estritamente do material, a capacitância é uma quantidade dependente do tipo de material e das suas dimensões.

A capacitância é calculada pela multiplicação da constante dielétrica relativa da permissividade do espaço livre ($\epsilon_0=8,9 \times 10^{-12}$ farads/metro) e uma área de superfície do eletrodo, em seguida, dividindo-se pela espessura que separa os eletrodos.

As unidades são expressas em farads. k_3 está relacionado com a capacitância entre os eletrodos de polarização. k_1 está relacionada com a capacitância entre o segundo par de eletrodos aplicados após a remoção dos eletrodos de polarização para os fins de excitação de cisalhamento. (IKEDA, 1990)

Em frequências muito abaixo da ressonância, transdutores cerâmicos piezelétricos são fundamentalmente condensadores. Em consequência, os coeficientes de tensão mecânica

g_{ij} estão relacionados com os coeficientes de carga d_{ij} pela constante dielétrica k_i como, em um condensador, a tensão V está relacionada com a carga Q pela capacitância C . (DONALD, 2007.)

$$C = \frac{k\varepsilon_0 A}{t} \quad (4)$$

2.4.4 Limitações

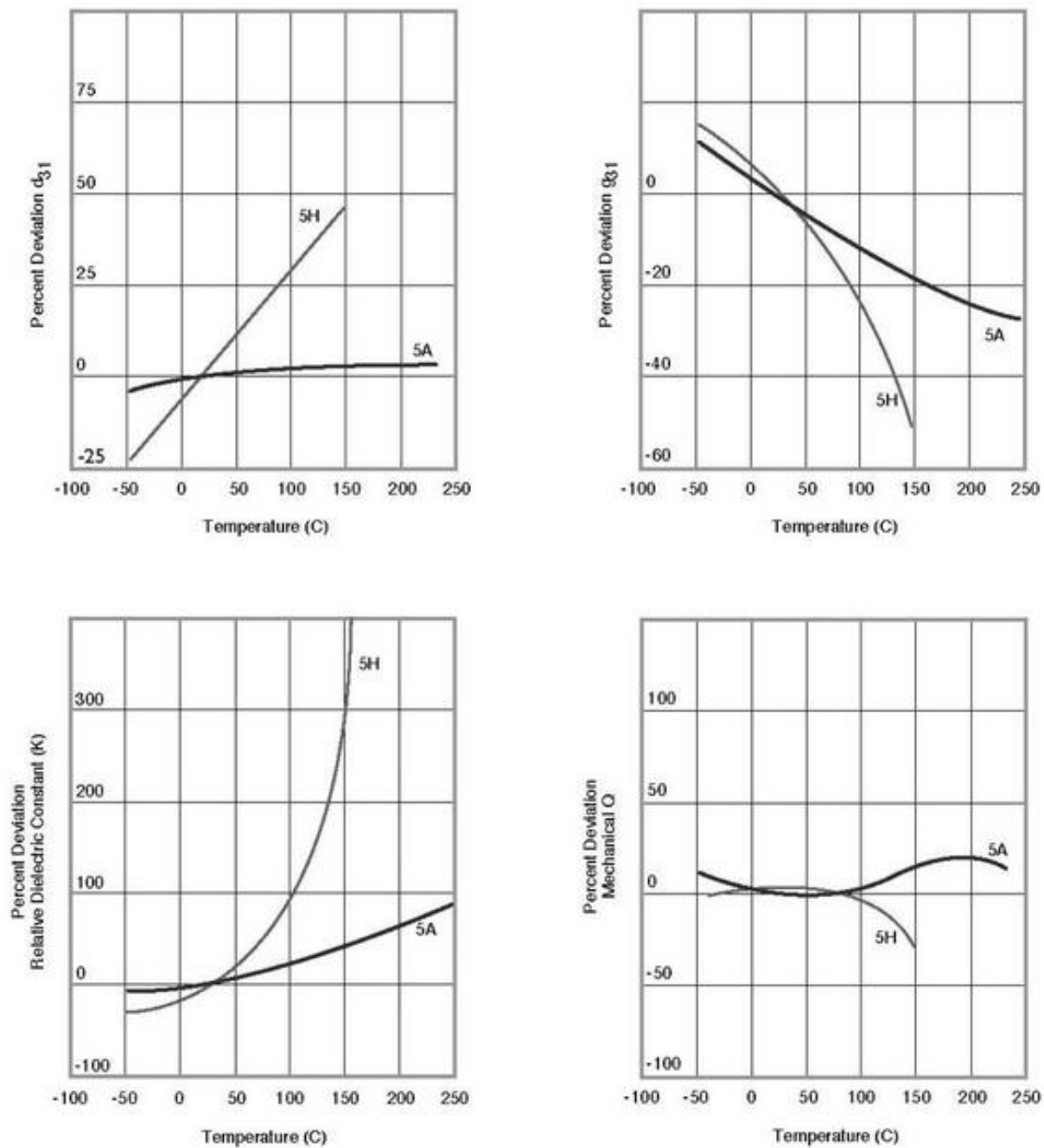
Cada material piezelétrico tem um limite operacional em particular para a temperatura, deformação e tensão mecânica. A composição química particular do material determina os limites. A operação de um material fora destes limites podem causar despolarização parcial ou total do material.

Com o aumento da temperatura de operação o desempenho de um material piezelétrico diminui até que a despolarização completa e permanente ocorra, devido a temperatura de Curie do material. O ponto de Curie é a temperatura de exposição máxima absoluta para qualquer cerâmica piezelétrica. Cada cerâmica tem o seu próprio ponto de Curie. Quando o elemento de cerâmica é aquecido acima do ponto de Curie, todas as propriedades piezelétricas são perdidas. Na prática, a temperatura de funcionamento deve ser substancialmente abaixo do ponto de Curie.

A limitação da temperatura do material diminui com a operação contínua. Em temperaturas elevadas o processo de envelhecimento acelera, diminuindo o desempenho piezelétrico e o nível de tensão máxima é reduzido.

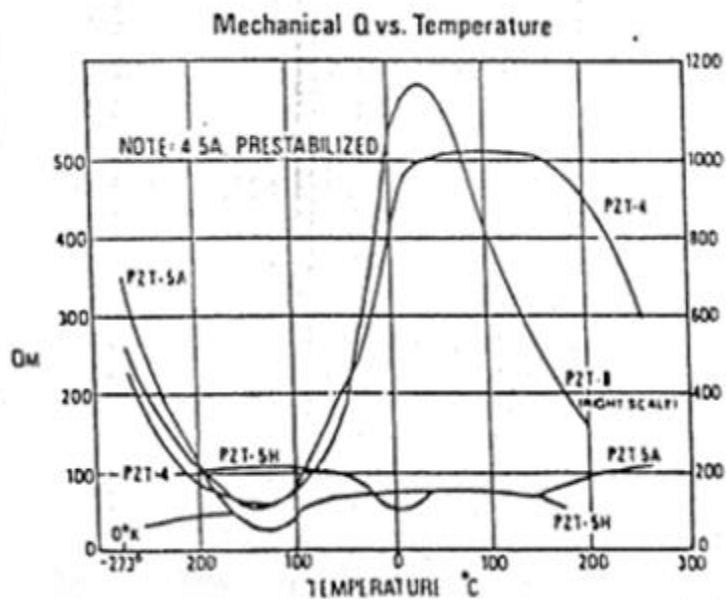
Algumas relações da dependência térmica típica das propriedades piezelétrica dos compostos PZT5A e PZT5H são mostradas nas figuras 16 e 17.

Figura 16 – Dependência térmica típica das propriedades piezétrica dos compostos PZT5A e PZT5H.



Fonte: Piezo Company LTD.

Figura 17- Fator de qualidade mecânico em função da temperatura para diversas composições de PZT.



Fonte: Piezo Company LTD.

A cerâmica piezelétrica pode ser despolarizados por um campo elétrico elevado com polaridade oposta à tensão de polarização original.

O limite para a intensidade do campo é dependente do tipo de material, da duração da aplicação e da temperatura de funcionamento. O limite operacional típico é entre 500V/mm e 1000V/mm para aplicação contínua.

A alta tensão mecânica pode despolarizar uma cerâmica piezelétrica. O limite para a tensão mecânica aplicada é dependente do tipo de material cerâmico e da duração da tensão aplicada.

Para aplicações de impacto, o material comporta-se estaticamente com durações de impulso de alguns milésimos de segundo ou mais. Quando a duração do impulso se aproxima de um micro segundo, o efeito piezelétrico torna-se linear, devido ao curto tempo de aplicação em comparação com o tempo de relaxamento dos domínios.

Os valores das constantes bem como a característica limite de operação de alguns materiais são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 - Principais materiais piezelétricos comerciais e seus respectivos valores constantes.

Material	PZT -4	PZT -8	PZT -5A	PZT -5J	PZT -5H
k_p	0.60	0.50	0.61	0.60	0.63
k_{33}	0.68	0.63	0.70	0.71	0.73
$d_{33} (10^{-12} C/N)$	300	215	400	460	550
$d_{31} (10^{-12} C/N)$	-11.50	-9.50	-170	-210	-265
$g_{33} (10^{-3} Vm/N)$	26	25	25	22	19
$g_{31} (10^{-3} Vm/N)$	-11	-11	-11	-9	-9
k_3^T C. dielétrica relativa	1250	1000	1750	2450	3100
Fator de dissipação $\tan\delta$ (Baixo Campo)	0.0040	0.0040	0.0200	0.0200	0.0200
Densidade (kg/m^3)	7600	7600	7650	7500	7500
Temp. de Curie ($^{\circ}C$)	325	330	360	260	190
Fator de qualidade Q_m	500	1000	75	70	65
$S_{11}^E (x10^{-12} m^2/N)$	12	11	19	23	21
$S_{33}^E (x10^{-12} m^2/N)$	16	14	16	16	15
N_m (Hz - m) (modo planar)	2200	2270	1250	2000	1950
N_t (Hz - m) (modo espessura)	1905	2032	1800	1950	2000

Fonte: Piezo Company LTD.

2.4.5 Equações constitutivas

Para estar de acordo com o padrão do IEEE em Piezeletricidade (STANDARDS COMMITTEE OF THE IEEE, 1987), o plano de isotropia é definido aqui como o plano-12 (ou o plano xy).

O material piezelétrico exibe uma simetria na direção-3 (ou a direção-z), que é a direção de polarização do material. As variáveis de campo são as componentes de tensão mecânica (T_{ij}), componentes de deformação (S_{ij}), componentes do campo elétrico (E_k) e os componentes de deslocamento elétricos (D_k).

A forma padrão das equações constitutivas do PZT pode ser descrita nas equações (5) e (6) a seguir. (ERTURK, 2009)

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij} E_k \quad (5)$$

$$D_i = d_{ikl} T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (6)$$

As equações (5) e (6) podem ser dadas na forma matricial, onde os sobrescritos E e T representam que as respectivas constantes são avaliados pela constante do campo elétrico e a constante de tensão, respectivamente, e o sobrescrito “T” representa a transposta.

$$\begin{Bmatrix} S \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d^t \\ d & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ E \end{Bmatrix} \quad (7)$$

A forma expandida da equação (7) é descrita pela equação (8) (ERTURK, 2009):

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Onde é utilizada a notação (notação de Voigt: 11→1, 22→2, 33→3, 23→4, 13→5, 12→6). Os componentes dos vetores de deformação e tensão são:

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ 2S_{23} \\ 2S_{13} \\ 2S_{12} \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

As equações apresentadas acima podem ser reduzidas para representar uma viga fina.

Baseia na teoria da viga de Euler-Bernoulli, ou a teoria da viga de Rayleigh, a único componente de tensão não-nula é T_1 de modo que,

$$T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = 0 \quad (10)$$

Junto com esta simplificação, se um par de eletrodos cobre a superfície perpendicular à direção 3, a equação (7) torna-se,

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & d_{31} \\ d_{31} & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

que pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} s_{11}^E & 0 \\ -d_{31} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -d_{31} \\ 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

Portanto as equações constitutivas reduzidas para uma viga fina são descritas na forma:

$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{c}_{11}^E & -\bar{e}_{31} \\ \bar{e}_{31} & \bar{\epsilon}_{33}^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_1 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

onde a matriz reduzida das constantes elásticas, piezolétrica e dielétrica é:

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} \bar{c}_{11}^E & -\bar{e}_{31} \\ \bar{e}_{31} & \bar{\epsilon}_{33}^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & 0 \\ -d_{31} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & -d_{31} \\ 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \quad (14)$$

Denota-se que a respectiva constante é reduzida de forma tridimensional para uma condição “tensão-plano”. Na Equação (14),

$$\bar{c}_{11}^E = \frac{1}{s_{11}^E}, \bar{e}_{31} = \frac{d_{31}}{s_{11}^E}, \bar{\epsilon}_{33}^S = \epsilon_{33}^T \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \quad (15)$$

onde o sobrescrito S indica que a respectiva constante é avaliada em deformação constante.

3 TEOREMA DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA

O teorema de máxima transferência de potência estabelece que para obter o máximo de energia a partir de uma fonte com uma resistência interna finita, a resistência da carga deve ser igual a resistência da fonte.

Moritz von Jacobi publicou o teorema da máxima transferência de potência por volta de 1840, que também é conhecido como "lei de Jacobi". (PHILLIPS, 2009).

O teorema resulta na máxima transferência de potência e não da máxima eficiência do sistema. Se a resistência da carga for maior do que a resistência da fonte, a eficiência é mais elevada, uma vez que uma porcentagem mais elevada da energia da fonte é transferida para a carga, mas a magnitude da energia da carga é menor, uma vez que a resistência total do circuito aumenta.

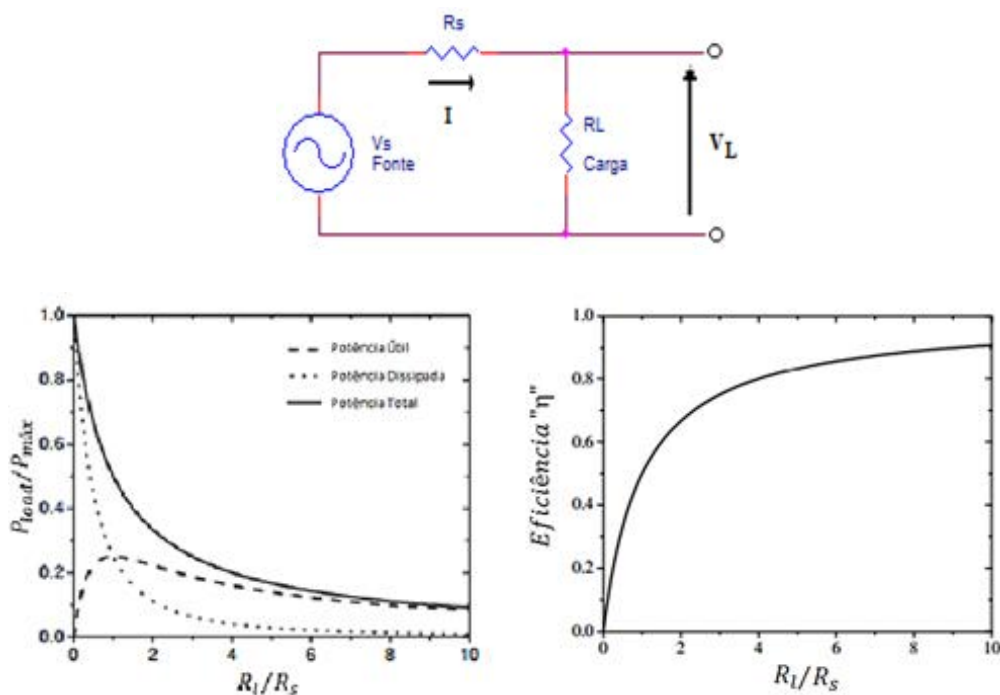
Se a resistência da carga é menor do que a resistência da fonte, então a maior parte da energia acaba sendo dissipada na fonte, e apesar da potência total dissipada ser superior (devido a uma resistência total inferior), verifica-se que a quantidade dissipada na carga é reduzida.

A dificuldade do teorema é como escolher a resistência de carga (de modo a maximizar a transferência de energia), uma vez que a resistência de fonte é dada. É um equívoco comum aplicar o teorema no cenário oposto. Ele não diz como escolher a resistência da fonte para uma dada resistência de carga. De fato, a resistência da fonte que maximiza a transferência de energia é sempre igual a zero, independentemente do valor da resistência da carga.

O teorema foi inicialmente mal compreendido (por Joule) implicando que um sistema que consiste em um motor elétrico acionado por uma bateria não pode ser mais eficaz do que 50%, dado que, quando as impedâncias forem combinados, a perda de energia na forma de calor na qual a bateria estaria sujeita, seria sempre igual à energia fornecida para o motor.

Em 1880, esta suposição se mostrou falsa, quando Edison e seu colega Francis Robbins Upton comprovaram que a máxima eficiência não era o mesmo que a máxima transferência de potência. Para alcançar a máxima eficiência, a resistência da fonte deve ser próxima de zero. Usando este novo entendimento, eles obtiveram uma eficiência de cerca de 90%, e provaram que o motor elétrico foi uma alternativa prática para o motor térmico.

Figura 18 – Circuito e gráfico da potência normalizada pela resistência normalizada.



Fonte: Adaptado de Cartwright (2008)

A condição de máxima transferência de potência não resulta em máxima eficiência. Se definirmos a eficiência η como a razão da potência dissipada pela potência da carga desenvolvida pela fonte, como analisada na figura 18, resulta-se na equação (16) onde:

$$\eta = \frac{R_l}{R_l + R_s} = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_l}} \quad (16)$$

sendo R_l a resistência na carga, R_s a resistência na fonte, η a eficiência do sistema, P_{load} a potência na saída do circuito e $P_{m\acute{a}x}$ a potência máxima na saída do circuito.

Considerando três casos particulares:

- Se $R_l = R_s$, a eficiência será $\eta = 0.5$,
- Se $R_l = \infty$ ou $R_s = 0$, então $\eta = 1$,
- Se $R_l = 0$, então $\eta = 0$.

A eficiência é de apenas 50% quando a máxima transferência de potência é alcançada, mas se aproxima de 100%, quando a resistência de carga se aproxima do infinito, embora o nível de potência total tende para zero. A eficiência também se aproxima de 100% se a resistência da fonte se aproxima de zero, e 0% se a resistência de carga se aproxima de

zero. Neste último caso, toda a energia é consumida pela fonte (a menos que ela não tenha nenhuma resistência).

Logo, a eficiência é máxima quando a resistência interna do gerador é pequena em comparação com a resistência de carga. Quando a resistência da carga é maior do que a resistência interna do gerador, obtemos a situação ideal, pois a eficiência será próxima de um e a potência dissipada no gerador será pequena.

Na figura 18 estão mostrados a potência máxima e as potências dissipadas na carga (potência útil) e na resistência interna (potência dissipada) como função da resistência de carga. Para a situação onde a resistência da carga é baixa, a fonte é forçada a gerar muita energia elétrica, sendo que boa parte dessa energia é dissipada na própria fonte. Como efeito, ocorre um sobreaquecimento da fonte, o que pode danificar a fonte, além de um consumo maior de energia. Como exemplo, considerando uma pilha, ela se descarrega mais rapidamente do que se estivesse alimentando uma carga de maior resistência.

3.1 Impedância

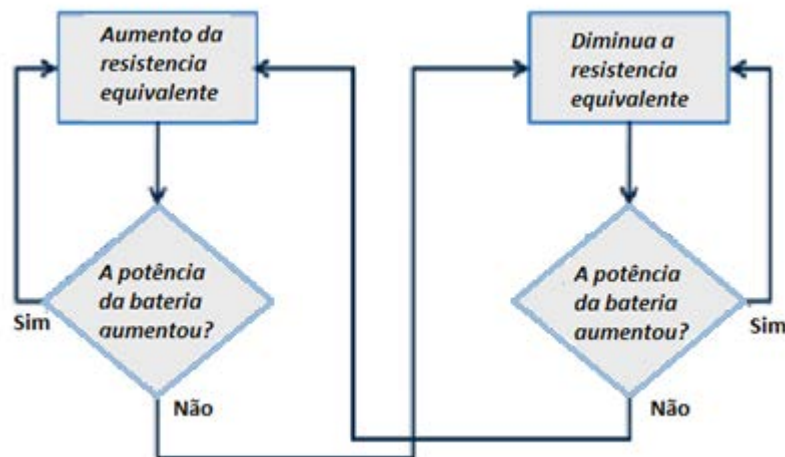
Segundo Hayt (1989), na eletrônica, o casamento de impedância é a prática de projetar a impedância de entrada de uma carga elétrica (ou a impedância de saída da fonte de sinal correspondente) para maximizar a transferência de energia ou minimizar reflexos da carga.

No caso de uma impedância complexa da fonte Z_S e impedância de carga Z_L (observada na figura 21), a máxima transferência de potência é obtida quando $Z_S = Z_L^*$ em que * indica o conjugado complexo .

O conceito da adaptação de impedância foi originalmente desenvolvido para engenharia elétrica, mas pode ser aplicada a qualquer outro campo onde uma forma de energia é transferida entre uma fonte e uma carga. Uma alternativa para a combinação de impedância é a ponte de impedância, em que a impedância da carga é escolhida para ser maior do que a impedância da fonte, maximizando a transferência de tensão.

No sistema de extração de energia utilizando material piezelétrico, é possível utilizar o diagrama ilustrado na figura 19 como técnica para ajustar a impedância ótima para a máxima transferência de energia.

Figura 19 - Diagrama para o ajuste da impedância ótima para a máxima transferência de energia.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O ajuste da impedância da fonte ou da impedância de carga, em geral, é chamado de "casamento de impedância". Duas maneiras de otimizar a impedância do sistema foram propostas por Karakash em 1950, sendo:

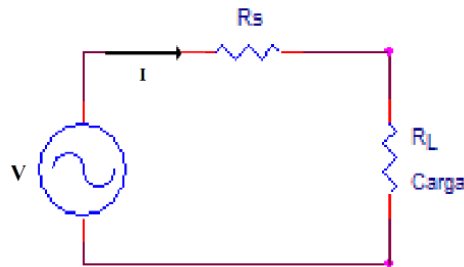
1. Os dispositivos destinados a apresentar uma carga aparente para a fonte onde $Z_{carga} = Z_{fonte}^*$ (complexo conjugado). Dada uma fonte com uma tensão e impedância de fonte fixa, o teorema da máxima potência afirma que esta é a única maneira de extrair a máxima potência da fonte.
2. Os dispositivos devem apresentar uma resistência aparente da fonte tão próxima de zero quanto possível, ou uma tensão aparente da fonte tão elevada quanto possível. Esta é a única forma de aumentar a eficiência do sistema. A utilização da ponte de impedância minimiza a distorção e a interferência eletromagnética.

Há uma variedade de dispositivos utilizados entre uma fonte de energia e uma carga que executa a adaptação da impedância. Para isso, os engenheiros utilizam combinações de transformadores, resistores, indutores e capacitores.

3.2 Cálculo da impedância para circuitos puramente resistivos.

Segundo Jackson (1959), a energia será transferida a partir da fonte, com uma tensão V e resistência de fonte R_s fixas, tendo uma carga de resistência R_L , na qual resulta em uma corrente I .

Figura 20 – Diagrama de um circuito com carga puramente resistiva.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Pela lei de Ohm, I é simplesmente a fonte de tensão dividida pela resistência total do circuito, como pode ser visualizado na figura 20, resultando na equação (17):

$$I = \frac{V}{R_s + R_L} \quad (17)$$

A potência P_L dissipada na carga é o quadrado da corrente multiplicado pela resistência:

$$P_L = I^2 R_L = \left(\frac{V}{R_s + R_L} \right)^2 R_L = \frac{V^2}{\frac{R_s^2}{R_L} + 2R_s + R_L} \quad (18)$$

O valor R_L para o qual a expressão é máxima pode ser calculada por diferenciação, mas é mais fácil de calcular o valor de R_L para que o denominador $\frac{R_s^2}{R_L} + 2R_s + R_L$ da equação (18) seja mínimo. O resultado será o mesmo em ambos os casos. Diferenciando o denominador em relação a R_L , obtem-se a equação (19):

$$\frac{d}{dR_L} \left(\frac{R_s^2}{R_L} + 2R_s + R_L \right) = -\frac{R_s^2}{R_L^2} + 1 \quad (19)$$

Para máximo ou mínimo, a primeira derivada é zero, de modo que,

$$\frac{R_S^2}{R_L^2} = 1 \quad (20)$$

ou

$$R_L = \pm R_S \quad (21)$$

Para saber se essa solução é um mínimo ou um máximo, a expressão do denominador é diferenciado novamente:

$$\frac{d^2}{dR_L^2} \left(\frac{R_S^2}{R_L} + 2R_S + R_L \right) = 2 \frac{R_S^2}{R_L^3} \quad (22)$$

O resultado é sempre positivo para valores positivos de R_S e R_L , mostrando que o denominador é um mínimo. Dessa forma, a energia é máxima quando $R_L = R_S$.

Deve-se observar que esta equação só se aplica se a resistência da fonte não puder ser ajustada, por exemplo, os atuadores piezelétricos. Para qualquer resistência de carga, uma resistência de fonte igual a zero, é o caminho para transferir a máxima potência para a carga.

3.3 Cálculo da impedância para circuitos reativos.

O teorema também se aplica quando a fonte ou a carga não são totalmente resistiva, logo, todos os componentes reativos da fonte e da carga devem ser de igual magnitude, mas de fase oposta. Isto significa que a fonte e as impedâncias da carga devem ser conjugados complexos um do outro.

Se a fonte for puramente indutiva com uma carga puramente capacitiva (com ausência de perdas resistivas), a carga iria receber 100% da energia a partir da fonte, mas iria enviá-la de volta depois de um quarto de ciclo. O circuito resultante é uma ressonância do circuito LC (Indutor-Capacitor) em que a energia continua a oscilar de um lado para o outro. Isso é chamado de potência reativa. Para a correção do fator de potência, onde uma reatância indutiva é usada para equilibrar uma capacitiva, utiliza-se a mesma ideia anterior.

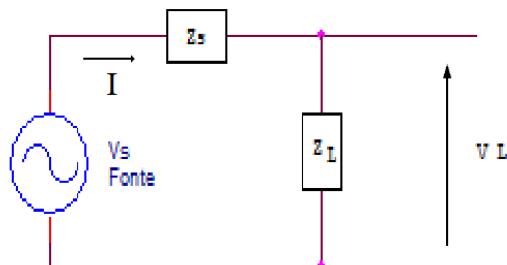
Para uma fonte reativa fixa, o teorema da máxima potência maximiza a energia real fornecida à carga por um complexo conjugado correspondente da carga para a fonte.

Para uma carga reativa fixa, a correção do fator de potência minimiza a potência aparente conduzido por linhas de transmissão, mantendo a mesma quantidade de transferência

de potência real. Isto é feito através da adição de uma reatância na carga para equilibrar sua reatância, alterando a impedância da carga reativa para uma impedância resistiva.

A formulação apresentada a seguir segue a ideia de Cartwright (2008).

Figura 21 – Diagrama de um circuito com carga reativa.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

No diagrama apresentado na figura 21, a alimentação CA (corrente alternada) está sendo transferida da fonte com o fasor tensão $|V_s|$ (tensão de pico) e impedância da fonte fixa Z_s , para uma carga com impedância Z_L , resultando em uma corrente de magnitude fasorial $|I|$.

$|I|$ é a tensão da fonte dividida pela impedância total do circuito, vista na figura 21 e dada pela equação (23) :

$$|I| = \frac{|V_s|}{|Z_s + Z_L|} \quad (23)$$

A potência média, P_L , dissipada na carga, é o quadrado da corrente multiplicado pela parte resistiva (parte real) R_L da impedância da carga:

$$P_L = I_{rms}^2 R_L = \frac{1}{2} |I|^2 R_L = \frac{1}{2} \left(\frac{|V_s|}{|Z_s + Z_L|} \right)^2 R_L = \frac{1}{2} \frac{|V_s|^2 R_L}{(R_L + R_s)^2 + (X_s + X_L)^2} \quad (24)$$

em que a resistência R_s e a reatância X_s são as partes real e imaginária do Z_s , e X_L é a parte imaginária Z_L .

Para determinar os valores de R_L e X_L (uma vez que V_s , R_s e X_s são fixos) para as quais esta expressão é máxima, primeiro deve-se encontrar, para cada valor positivo fixo R_L , o valor do termo reativo X_L , para que o denominador $(R_L + R_s)^2 + (X_s + X_L)^2$ seja mínimo.

A equação de energia é reduzida para:

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{|V_s|^2 R_L}{(R_L + R_S)^2} \quad (25)$$

e continua a encontrar o valor de R_L que maximiza esta expressão. No entanto, este problema na maximização tem a mesma forma que no caso puramente resistiva, e maximizando a condição $R_L = R_S$, pode-se encontrar da mesma maneira.

A combinação de condições $R_L = R_S$ e $X_L = -X_S$ pode ser escrito de forma resumida, como um conjugado complexo, como visto na equação (26):

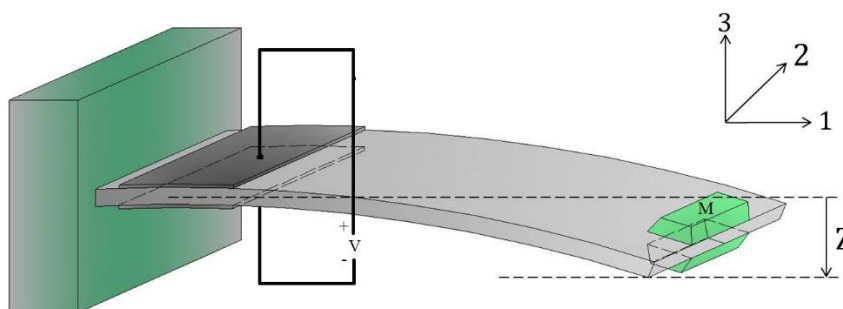
$$Z_L = Z_S^* \quad (26)$$

4 MODELAGEM DO PIEZOGERADOR

4.1 Modelagem Elétrica

A viga engastada com um atuador piezelétrico é um método popular de captação de energia, devido ao alto acoplamento eletromecânico do material PZT e à alta densidade de energia das estruturas engastadas com uma extremidade livre.

Figura 22 – Viga engastada com PZT e massa na ponta.



Fonte: Elaborado pelo autor.

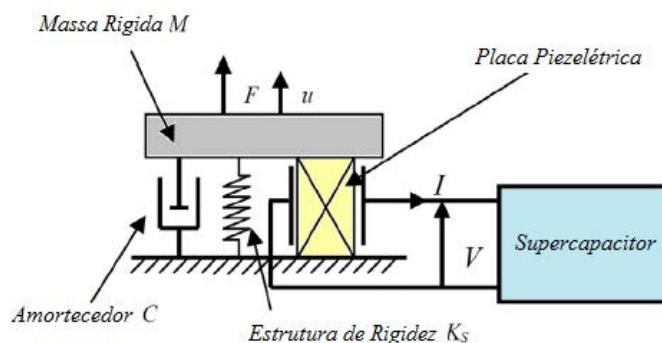
A Figura 22 mostra uma viga engastada com PZT, a qual consiste de uma longa haste, fixa a uma estrutura vibratória e uma massa na ponta na extremidade livre. O objetivo de se colocar a massa na extremidade livre da viga é para que a frequência seja menor e próxima das frequências que podem ser excitadas nas condições ambientais. A viga é composta de material acrílico e tem um sensor de material piezelétrico colado próximo do engaste. O sensor gera uma tensão elétrica quando submetido a uma tensão mecânica, causada por exemplo por uma força aplicada na extremidade livre ou pelo movimento da base.

Como a estrutura está sendo excitada, a massa da ponta se move para cima e para baixo, gerando uma tensão sobre o dispositivo PZT na direção "1" (longitudinal ao longo da viga). A deformação gerada no PZT, induz uma tensão na direção "3" ou a partir do topo para o fundo da viga. Devido a tensão ser gerada na direção "3" e a deformação ser aplicada na direção "1", atribui-se o chamado modo de operação d_{31} . Isto tem menor eficiência que o modo de operação d_{33} , mas ainda é vantajoso devido ao movimento da viga. (ZHANG et al., 1997)

A configuração mostrada na figura 22 pode ser aproximada por um sistema massa-mola-amortecedor, pois se deseja operar apenas próximo da primeira frequência natural. Vários autores têm se utilizado desta metodologia. (BADEL et al., 2006; WILLIAMS et al., 1996; ERTURK et al., 2008; BEEBY et al., 2006; ELVIN et al., 2009; ROUNDY et al., 2005).

Tratar o sistema como um massa-mola-amortecedor proporciona uma representação esquemática, como o mostrada na figura 23, que é constituído por uma massa rígida M , um amortecedor C , uma mola com rigidez K_S que representa a estrutura do sistema, um PZT modelado como uma mola, com rigidez K_p , e um gerador de força de tensão controlada V .

Figura 23 – Modelo esquemático eletromecânico.



Fonte: Adaptado de Zhang et al., (1997).

A força F é, então, aplicada na direção mostrada, causando um deslocamento u na direção indicada.

O PZT possui uma capacitância de C_p na saída. Este modelo é descrito pelas fórmulas (27) e (28), um sistema de equações lineares, com uma forma similar aos circuitos elétricos RLC (Resistor-Indutor-Capacitor). (NECHIBVUTE, 2012)

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + (K_S + K_p)u + \alpha V = F \quad (27)$$

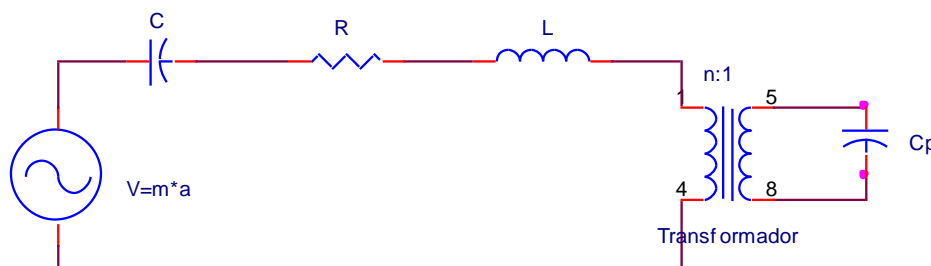
$$-\alpha u + C_p V = -I \quad (28)$$

onde I representa a corrente que flui para fora do elemento piezolétrico e α o fator de força aplicada.

Este modelo é útil para fornecer informações sobre o deslocamento, velocidade e aceleração da massa rígida. Também permite cálculos da energia instantânea armazenados no PZT devido à rigidez da viga e do deslocamento da massa, tornando este modelo eficaz para descrever os fenômenos mecânicos relativos à viga mostrada na figura 22. Entretanto, esse modelo não fornece informações sobre a impedância elétrica do sistema, ou como combinar corretamente o sistema mecânico.

Com as equações (27) e (28), é possível redesenhar o sistema massa-mola-amortecedor como um circuito RLC e um transformador que representa o acoplamento eletromagnético.

Figura 24 - Modelo elétrico para a piezoestrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 24 mostra o circuito que foi proposto por Elvin et al. (2009), utilizando o modelo mecânico da figura 23. A tensão gerada no PZT é proporcional à força exercida sobre o braço de suporte, enquanto que a capacitância em série é proporcional a $\frac{1}{k_s+k_p}$, onde k_s é a rigidez da viga e K_p a rigidez do PZT. A resistência em série é proporcional ao amortecimento C , a indutância em série é proporcional à massa M e a relação de espiras n é proporcional ao coeficiente de acoplamento α . Por C_p já ser representada como uma capacitância real, o valor permanece o mesmo.

Ao observar este modelo, a energia mecânica é descrita no lado esquerdo do transformador, e a energia elétrica está descrita no lado direito, onde o transformador representa o acoplamento eletromecânico.

Examinando o modelo elétrico na Figura 24, observam-se alguns fenômenos.

- Em primeiro lugar, a fonte de tensão é proporcional à força (massa vezes a aceleração). Isso significa o aumento da energia gerada, pois correspondem a maiores vibrações. Isso também implica que uma massa mais pesada sobre a mesma aceleração gera mais energia.
- Em segundo lugar, o dispositivo mecânico possui perdas, onde o amortecimento mecânico (correspondente ao resistor) irá causar uma perda de energia.
- A frequência de ressonância é importante para a estrutura do PZT, pois somente próximo da frequência natural será possível extrair as maiores energias. A indutância em série com a capacitância irá definir a frequência de ressonância.

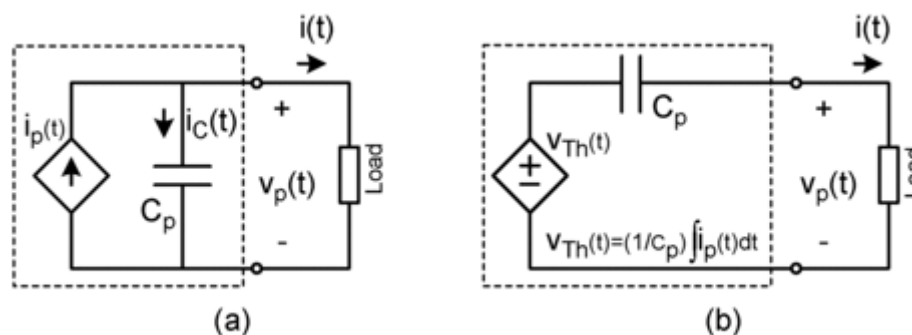
Utilizando a relação $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ ao examinar o modelo, observa-se que, o aumento da massa na estrutura diminui a frequência de ressonância.

A energia não flui só do lado mecânico para o lado elétrico, como também pode fluir de volta da energia elétrica para a mecânica. Isto significa que a carga elétrica que é ligada, irá afetar o movimento físico da estrutura. Escolhendo cuidadosamente uma carga reativa, é possível mudar a ressonância mecânica da estrutura com o PZT.

Para a análise da impedância de entrada, remove-se o transformador do sistema para a utilização do teorema de Thevenin ou Norton para criar uma impedância equivalente da fonte.

A figura 25 representa o circuito elétrico equivalente utilizando o princípio de Norton e Thevenin.

Figura 25 - (a) Norton (fonte de corrente) circuito equivalente da colhedora de energia piezelétrica. (b) Thevenin (fonte de tensão) circuito equivalente da colhedora de energia piezelétrica.



Fonte: Tabesh (2010).

4.2 Circuitos de interface

As características da carga eletrônica alimentada pelo gerador piezelétrico definem a tensão e a potência necessária para uma condição de operação normal. A tensão elétrica requerida é geralmente uma baixa tensão e corrente contínua no intervalo de 1-20 V, dependendo da aplicação.

A tensão fornecida pelo elemento piezelétrico é alternada e tem que ser convertida para contínua. Sua amplitude depende das características do elemento piezelétrico, além de suas

dimensões e vibrações mecânicas. Assim, é necessária uma interface eletrônica para assegurar o acoplamento entre a tensão da carga elétrica do terminal e do elemento piezelétrico.

Um elemento de armazenamento de energia elétrica, tal como um condensador ou uma bateria, podem ser utilizados para superar um pico de energia consumida pela carga eletrônica.

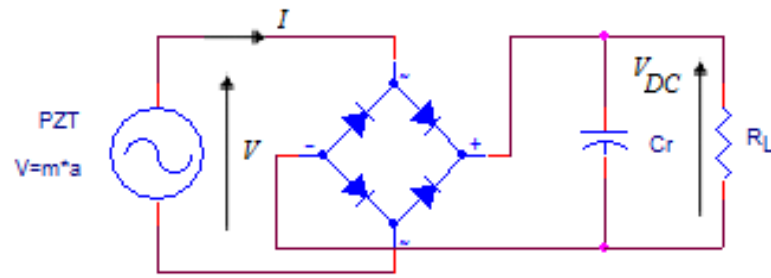
Trabalhos anteriores mostraram que a interface eletrônica pode influenciar a eficácia da captação de energia (OTTMAN et al., 2003; RICHARD et al., 1999). Além disso, uma outra forma de otimizar a energia foi investigada com a chamada "extração síncrona por comutação no indutor (SSHI)", que consiste em um processamento descontínuo com característica não linear. (LEFEUVRE et al., 2004; GUYOMAR et al., 2005).

4.3 Interface padrão

O circuito de interface padrão mostrado na figura 26, inclui uma ponte de diodo retificadora e um filtro capacitivo. Isso é praticamente o circuito mais simples para retificar, corrigir e alisar uma tensão alternada. A carga elétrica no terminal é modelada por uma resistência equivalente R_L de forma que o consumo de energia seja igual à potência média do terminal de entrada.

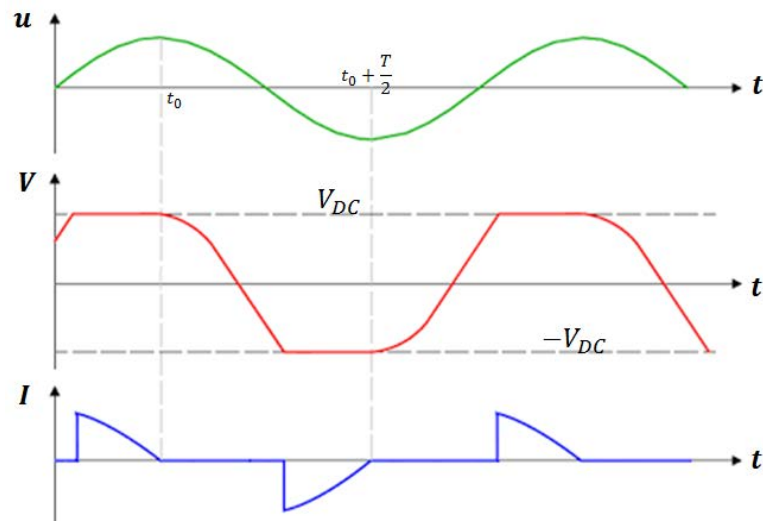
A análise do circuito é apresentada, considerando a vibração em um modo único. Assim, o deslocamento mecânico u é assumido como sendo senoidal, operando em estado estacionário. Nesta condição, a tensão de circuito aberto emitido pelo elemento piezelétrico V , é senoidal. O circuito elétrico ligado ao PZT, muda a forma de onda de V . Dessa forma, o elemento piezelétrico estará em circuito aberto apenas quando a ponte retificadora estiver bloqueando, portanto, quando o valor absoluto de V for inferior a V_{DC} . As formas de ondas do sistema são apresentadas na figura 27.

Figura 26 - Circuito padrão de interface.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Interface padrão: deslocamento, tensão e corrente.



Fonte: Adaptado de Ottman (2003).

O cálculo da potência extraída para um deslocamento mecânico u é feito considerando a corrente de saída piezelétrico, mostradas nas equações (29) e (30).

$$F = (K_s + K_p)\mu + \alpha V \quad (29)$$

$$I = \alpha u - C_p V \quad (30)$$

Funcionando em estado estacionário, a corrente média através do capacitor de filtro C_r é nula, de modo que o valor absoluto da carga elétrica de saída a partir do elemento piezelétrico, durante um período de T , é igual à média de corrente que flui através da carga de R_L . A integração da corrente leva à expressão da tensão retificada V_{DC} como uma função do deslocamento de amplitude U_M dada pela Equação (31). Em seguida, a potência média colhida P é calculada na equação (32).

$$V_{DC} = \frac{R_L \alpha}{R_L C_p \omega + \frac{\pi}{2}} \omega U_M \quad (31)$$

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R_L} = \frac{R_L \alpha^2}{(R_L C_p \omega - \frac{\pi}{2})^2} \quad (32)$$

No caso de dispositivos de captação de energia com fraco acoplamento, a energia extraída é pequena em comparação com a energia mecânica. Assim, a carga de resistência equivalente R_L não tem influência significativa sobre a amplitude do deslocamento mecânico U_M . Neste caso, a potência média extraída atinge um máximo dado por P_{max} , para uma carga de resistência equivalente ótima R_{OPT} , dadas pelas equações (33) e (34) respectivamente.

$$P_{max} = \frac{\alpha^2 \omega}{2\pi C_p} U_M^2 \quad (33)$$

$$R_{OPT} = \frac{\pi}{2C_p \omega} \quad (34)$$

No entanto, a extração de uma quantidade significativa da energia vibracional, induz um efeito de amortecimento sobre o sistema mecânico, que conduz a uma redução da amplitude de vibração. Este efeito é tomado em consideração ao equilíbrio de energia expressa na equação (29). Durante um determinado período $\frac{T}{2}$ (figura 27), a energia mecânica fornecida ao sistema é igual a soma das perdas mecânicas e a energia convertida, obtendo-se a equação (35).

$$\int_{t_0}^{t_0-T/2} F \frac{du}{dt} dt = C \int_{t_0}^{t_0-T/2} \left(\frac{du}{dt}\right)^2 dt + \frac{V_{DC}^2 T}{R_L} \quad (35)$$

A equação (35) pode ser simplificada supondo que o deslocamento de retorno permanece senoidal, e que a força F e a velocidade estão em fase.

A expressão analítica da amplitude do deslocamento de ressonância, é dada como uma função da amplitude da força externa F dada pela Equação (36) e obtido a partir da equação (35).

$$U_M = \frac{F}{C\omega + \frac{2R_L\omega\alpha^2}{(R_L C_L\omega - \frac{\pi}{2})^2}} \quad (36)$$

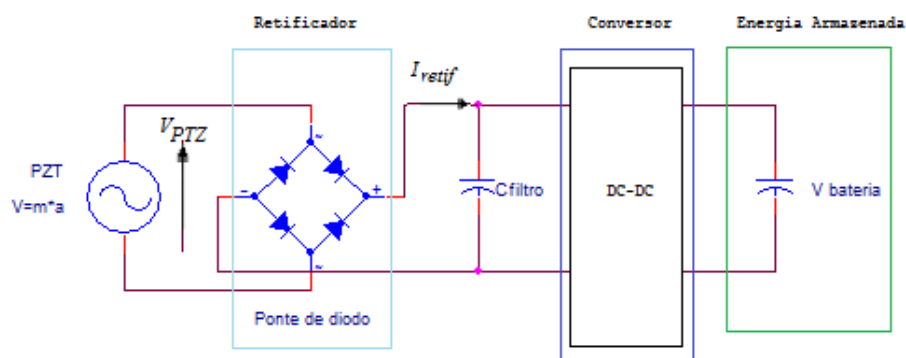
Então, ao considerar as equações (36) e (32) é possível obter uma relação entre a média de potência colhida P , a amplitude da força motriz externa F , o equivalente a carga de resistência R_L e os outros parâmetros do sistema.

Um circuito gerador de energia típico é o PMC (*Power Management Circuit*), definido por 3 diferentes fases, onde podem funcionar em conjunto.

A Figura 28 mostra o diagrama de blocos para o PMC típico projetado para esse tipo de sistema. A primeira fase é uma retificação, que é responsável por transformar a energia elétrica CA do PZT em DC. O esquema de retificação mais simples é um retificador de ponte completa, como mostrado na Figura 28.

Em alguns sistemas, os diodos podem conter perdas, tornando-se inviável ou desvantajoso. Várias configurações ativas ou passivas de MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) podem ser utilizado para implementar diodos ou pontes de diodos.

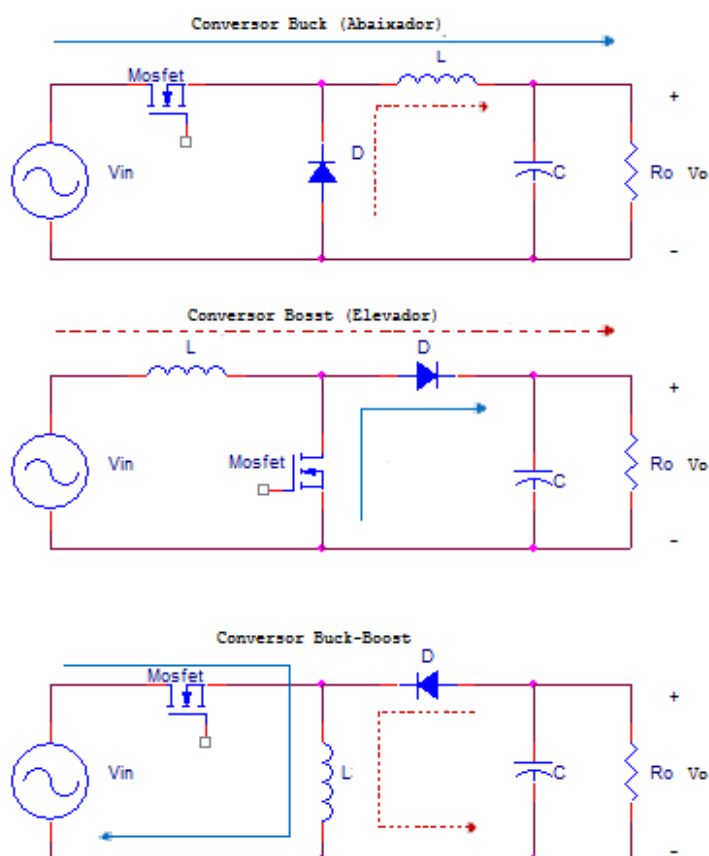
Figura 28 - Diagrama de bloqueio para PCM.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A segunda etapa para o PMC típico é a fase de regulamentação. Circuitos com conversores são implementados com uma grande variedade de estratégias, objetivos e projetos. Os três tipos mais comuns de conversor DC-DC são os conversores *Buck* (abaixador), *Boost* (elevador), e a associação de ambos *Buck-Boost* (Abaixador-Elevador), mostrados na figura 29.

Figura 29 - Diagrama de três conversores de comutação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No instante em que D é ligado, definida pela chave fechada (*Turn on*), o indutor está sendo carregado. Este procedimento é representado pela linha azul na figura 29. No momento em que a chave é aberta (*Turn Off*), a comutação é aberta e o indutor é descarregado na saída para o supercapacitor. Esta etapa do circuito é representada pelas linhas pontilhadas vermelhas.

Circuitos tradicionais reguladores de tensão adaptam a saída de acordo com a necessidade. Estes circuitos são utilizados para extração de energia por vibração e são vantajosos porque minimizam as restrições sobre o armazenamento de energia, permitindo que um condensador simples possa ser usado.

O objetivo de um circuito de captação de energia por vibração é, na maioria das vezes, carregar uma bateria. Nestes sistemas, a bateria regula a tensão de saída, permitindo que o circuito de regulação possa regular a tensão de entrada. Ao controlar a tensão de entrada, é possível criar um circuito de controle para extrair a máxima potência do sistema.

4.4 Técnicas de retificação não Lineares.

Devido à dificuldade de se implementar uma boa técnica RL, muitos pesquisadores têm proposto técnicas não-lineares para a coleta de energia utilizando PZT. Estas técnicas tendem a manipular a carga armazenada no condensador de saída C_p , através de semicondutores controlados.

Isto pode ser útil, pois quando a tensão alternada através do PZT é positiva e diminuindo (ou negativo e aumentando), a energia a partir do PZT é desperdiçada para descarregar o condensador. As técnicas de correspondência não lineares quando comparadas com as técnicas de resistência linear, tem demonstrado um processo para aumentar a extração de energia em até 400 %. (ELVIN et al., 2009)

Técnicas de extração não lineares normalmente coletam mais energia do que técnicas resistivas tradicionais. A desvantagem é que o controle é mais complicado e exige picos precisos, ou circuito de detecção de inclinação, o que consome uma quantidade grande de energia.

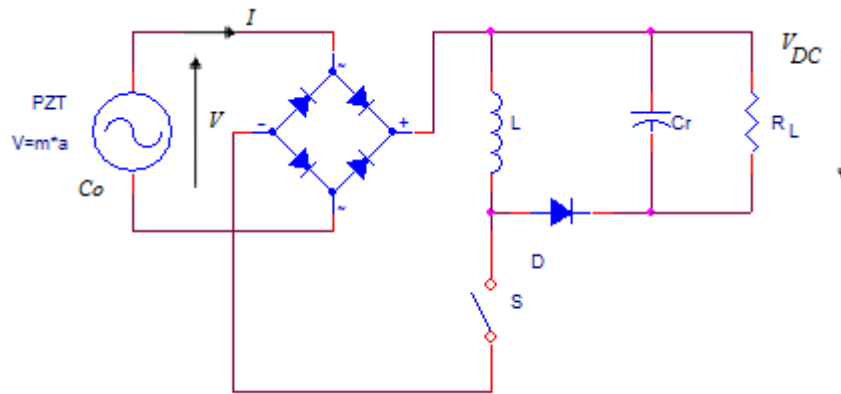
4.4.1 Extração por Carga Elétrica Síncrona (SECE)

O princípio de extração por carga síncrona, consiste em remover periodicamente a carga elétrica acumulada no condensador de bloqueio C_0 do PZT, para transferir esta energia elétrica para a carga ou para o elemento de armazenamento de energia. A primeira característica desta técnica é que as fases de extração são sincronizadas com as vibrações mecânicas.

O circuito descrito está representado na figura 30. As fases de extração de carga ocorrem, quando o comutador eletrônico S é fechado: a energia elétrica armazenada no condensador de bloqueio C_0 é, então, transferido para o indutor L .

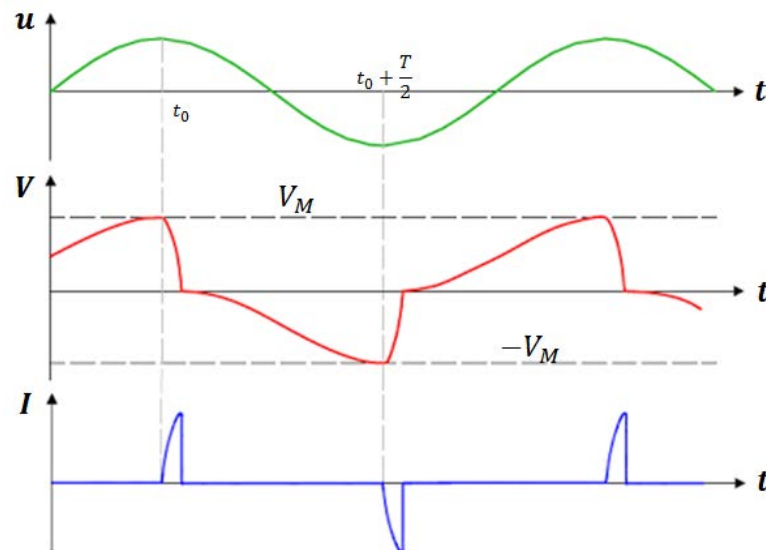
Quando a carga elétrica do PZT é totalmente transferida, S é aberto e a energia armazenada no indutor L é transferida para o condensador de filtragem C_r através do diodo D . Os instantes de extração são acionados nos limites mínimos e os máximos do deslocamento u , de forma sincronizada com a vibração mecânica. O indutor L é escolhido para ter uma duração da fase de extração de carga mais curta do que o período de vibração. As formas de onda são representados na figura 31.

Figura 30 - Interface do circuito de carga de síncrono.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 31 - Interface de extração de carga síncrono: deslocamento, tensão e corrente.



Fonte: Adaptado de Nechibvute (2012).

Na condição de circuito aberto, a velocidade mecânica está relacionada com a variação da tensão pela equação (37). Integrando esta equação em relação ao tempo entre instante t_0 e $t_0 + T/2$, obtêm-se a equação (38), que relaciona a tensão de amplitude V_H com o deslocamento de amplitude U_M .

$$\alpha \dot{u} = C_o \dot{V} \quad (37)$$

$$V_H = 2 \frac{\alpha}{C_o} U_M \quad (38)$$

A extração de carga elétrica ocorre quando a energia armazenada em C_0 for máxima. Nesses instantes, C_0 é instantaneamente transferida para a carga elétrica do terminal através do conversor, resultando no cancelamento da tensão piezoeletrica V . A expressão da

potência média fornecida pelo PZT é dada pela equação (39). A energia média extraída em função da amplitude do deslocamento é observada na equação (40).

$$P = \frac{1}{2} C_o V^2_M \frac{\omega}{\pi} \quad (39)$$

$$P = 2 \frac{\alpha^2 \omega}{\pi C_o} U^2_M \quad (40)$$

Para analisar o efeito do amortecimento mecânico induzido por esta técnica de extração de energia, considera-se o balanço de energia da estrutura entre o instante t_1 e instante t_2 . A energia fornecida ao sistema pela força externa F , durante este meio período é expresso na equação (41).

$$\int_{t_0}^{t_0-T/2} F \dot{u} dt = C \int_{t_0}^{t_0-T/2} \dot{u}^2 dt + \frac{2\alpha^2}{C_o} U^2_M \quad (41)$$

Assumindo que o deslocamento permanece senoidal, obtêm-se a expressão da amplitude de deslocamento U_M em função da amplitude da força externa F , dada pela equação (42).

$$U_M = \frac{F}{C\omega + \frac{4\alpha^2}{\pi C_o}} \quad (42)$$

A potência média extraída em função da amplitude da força externa F , é apresentada na equação (43) e deduzida a partir de equação (40) e (42).

$$P = 2 \frac{\alpha^2 \omega}{\pi C_o} \frac{F^2}{\left(C\omega + \frac{4\alpha^2}{\pi C_o}\right)} \quad (43)$$

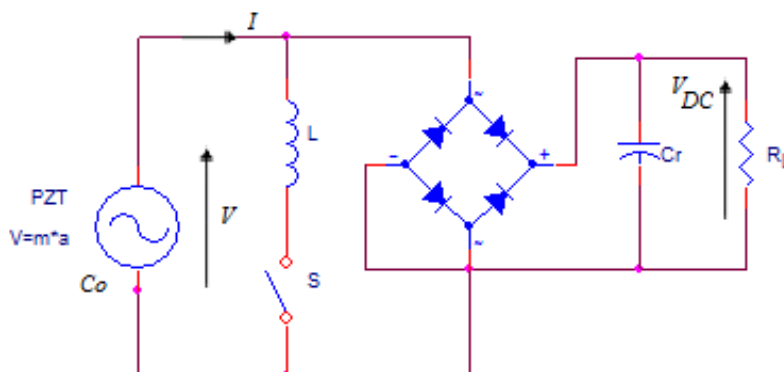
4.4.2 Extração por Comutação Sincronizada no Indutor (SSHI) em Paralelo

O SSHI em paralelo, é composto por um circuito de processamento não linear ligado em paralelo com os eletrodos do PZT e a entrada da ponte retificadora, como mostra a figura 32.

O circuito de processamento não linear é composto apenas de um indutor L em série com um comutador eletrônico S . O interruptor eletrônico é ligado, quando o deslocamento mecânico atinge um valor máximo ou mínimo. O período de oscilação elétrica escolhido, deve ser menor que o período de vibração mecânica t . O interruptor é desligado após metade de um

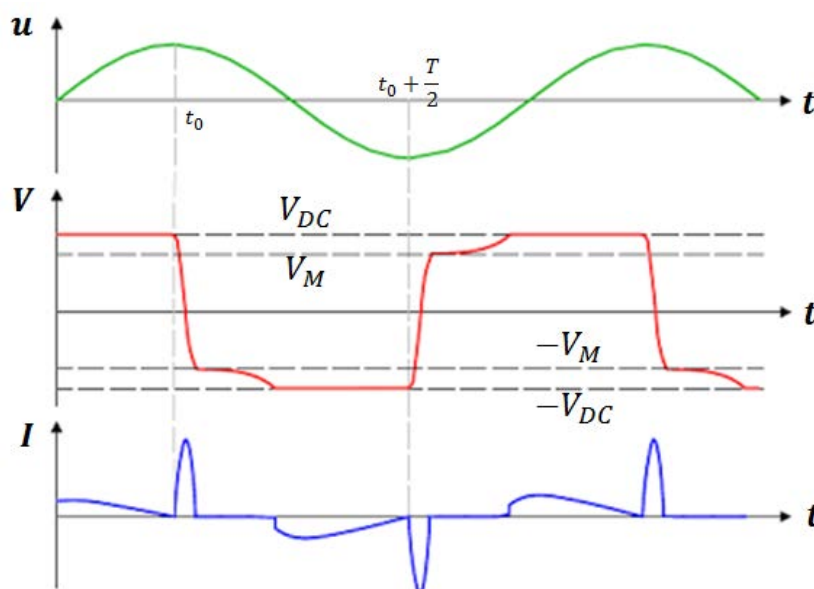
período elétrico, resultando em uma inversão quase instantânea da tensão V . O deslocamento, a tensão e a corrente podem ser analisadas na figura 33.

Figura 32 - Interface do circuito SSHI em paralelo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Interface SSHI em paralelo: formas de onda do deslocamentos, tensões e corrente.



Fonte: Adaptado de Nechibvute (2012).

Quando a chave é ligada, o valor absoluto da tensão V permanece inferior à tensão retificada V_{DC} para que a ponte retificadora fique bloqueada. No entanto, a mudança da polaridade da tensão não é perfeita, o que significa que o processo não linear induz pequenas perdas de energia. A maior parte das perdas por inversão da tensão é devido ao indutor estar em série com o interruptor. Estas perdas são modeladas pelo fator qualidade elétrica Q_i do oscilador elétrico. A relação entre Q_i e as tensões de saída do elemento piezolétrico, antes e após o processo de inversão (V_{DC} e V_m , respectivamente) é apresentada pela equação (44).

$$V_M = V_{DC} - \frac{\pi}{2Q_i} \quad (44)$$

A carga elétrica recebida pelo terminal, de carga equivalente no resistor durante um período de $T/2$ é calculada pela equação (45).

$$\int_{t_0}^{t_0-T/2} t dt + \int_{t_0}^{t_0-T/2} I_s dt = \frac{V_{DC} T}{R_L 2} \quad (45)$$

A integral corresponde à carga armazenada no condensador C_0 antes da inversão de tensão mais a carga armazenada em C_0 após a inversão, observada na equação (46), é

$$\int_{t_0}^{t_0-\frac{T}{2}} I_s dt = C_0 V_{DC} (1 + e^{\frac{-\pi}{2Q_i}}) \quad (46)$$

A integração da corrente de saída no sensor piezelétrico dada por (30) e levando em consideração o processo não linear SSHI, leva à expressão da tensão de carga V_{DC} como uma função do deslocamento de amplitude U_M dada pela equação (47).

$$V_{DC} = \frac{2R_L \alpha \omega}{R_L C_0 \left(1 + e^{\frac{-\pi}{2Q_i}}\right) \omega + \pi} U_M \quad (47)$$

A potência média extraída P é expressa na equação (48). Com uma determinada amplitude de vibração mecânica, a potência média extraída, atinge um valor máximo P_{MAX} , cuja expressão é dada pela equação (49). Para uma carga equivalente a resistência ótima R_{OPT} é determinada pela equação (50).

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R_L} = V_{DC}^2 = \frac{4R_L \alpha \omega^2}{(R_L C_0 \omega \left(1 + e^{\frac{-\pi}{2Q_i}}\right) \omega + \pi)^2} U_M^2 \quad (48)$$

$$P_{MAX} = \frac{\alpha^2 \omega U_M^2}{\pi C_0 (1 - e^{\frac{-\pi}{2Q_i}})} \quad (49)$$

$$R_{OPT} = \frac{\pi}{C_0 \omega \left(1 - e^{\frac{-\pi}{2Q_i}}\right)} \quad (50)$$

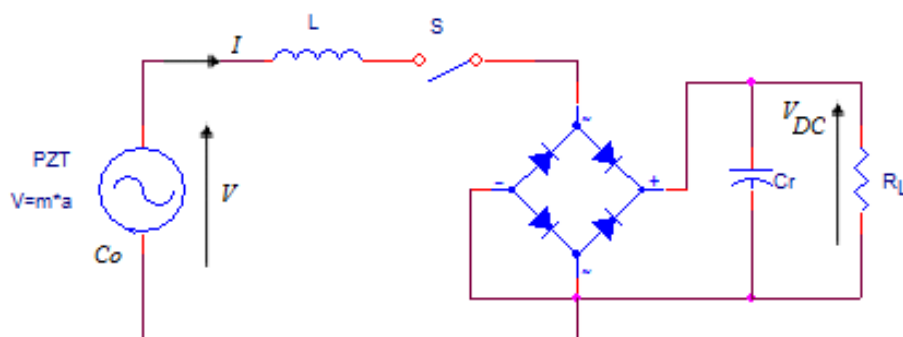
Estas expressões mostram que a energia colhida depende da eficiência de inversão de tensão, que é representada pelo fator de qualidade elétrico Q_i . Se este fator for maior do que $\pi/2$, a média da potência máxima colhidas, P_{MAX} , torna-se proporcional a este fator de qualidade.

Assim, de acordo com a equação (49), o fator de qualidade elétrico Q_i deve ser tão grande quanto possível para obter o máximo possível de energia elétrica do PZT.

4.4.3 SSHI em série

O circuito de interface SSHI em série é semelhante ao circuito SSHI em paralelo, apenas mudando a posição do indutor, que agora estará em série com a chave comutadora, como pode ser vista na figura 34.

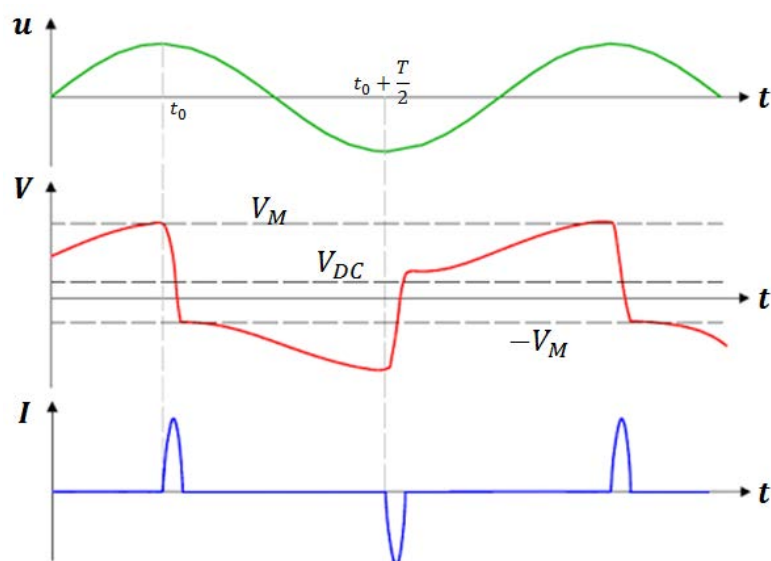
Figura 34 - Interface do circuito SSHI em série.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O semicondutor controlado é o mesmo que o descrito no caso de o circuito SSHI em paralelo. Cada vez que o interruptor estiver fechado, uma parte da energia armazenada no condensador de bloqueio C_0 será transferida para o condensador C_r através da ponte retificadora. Neste instante, ocorrem as inversões da tensão V . As tensões e formas de onda de deslocamento são apresentadas de forma teórica na figura 35.

Figura 35 - Interface SSHI em paralelo: formas de onda do deslocamentos, tensões e corrente.



Fonte: Adaptado de Nechibvute (2012).

A equação (51) dá a relação entre as tensões piezelétricas V_M e V_m antes e depois do processo de inversão, a tensão retificada V_{DC} e o fator de qualidade elétrica Q_i .

$$V_M - V_m = -(V_M - V_{DC}) - \frac{\pi}{2Q_i} \quad (51)$$

A relação entre V_M e V_m é dado na equação (52). A igualdade da energia de entrada do retificador e a energia consumida pela carga equivalente a resistência R_L durante um semi período de vibração $T/2$ leva a equação (53).

$$V_M = -V_m + \frac{2\alpha}{C_o} U_M \quad (52)$$

$$V_{DC} \int_{t_0}^{t_0-T/2} Idt = C_o V_{DC} (V_M + V_m) = \frac{\pi}{R_L \omega} V_{DC}^2 \quad (53)$$

A tensão de carga DC é expressa como uma função do deslocamento de amplitude U_M , o equivalente a resistência de carga R_L e os parâmetros do sistema dado na equação (54).

$$V_{DC} = \frac{2\alpha U_M R_L \omega (1 + e^{\frac{-\pi}{2Q_i}})}{\pi \left(1 - e^{\frac{-\pi}{2Q_i}} \right) + 2R_L C_o \omega (1 + e^{\frac{-\pi}{2Q_i}})} \quad (54)$$

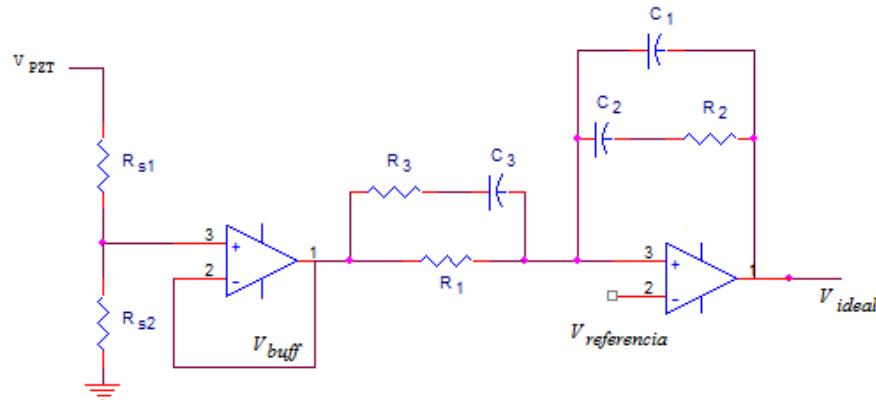
A expressão da potência média extraída é dada pela equação (55) e pode ser calculada utilizando a expressão da tensão de carga (54).

$$P = \frac{V_{DC}^2}{R} \quad (55)$$

4.5 Topologia do circuito de controle

A tensão do PZT poderá atingir tensões na ordem de 40 V, sendo uma tensão alta para o amplificador operacional (AmpOp). Esta tensão tem que ser detectada e multiplicada pela corrente ideal. Isso é feito com um divisor resistivo e dois amplificadores operacionais. (TABESH, 2010)

Figura 36 - Diagrama esquemático do circuito de detecção de tensão, e a geração da corrente ideal.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Devido aos elevados valores de tensão do PZT, é desejável a utilização de um divisor de tensão de alta impedância e de ganho para detectar uma fração da tensão do PZT, em vez de detectar diretamente a tensão do PZT. O amplificador operacional, após o ganho, é usado para implementar a função de transferência para a impedância de entrada ideal. (TURNER, 2012)

$$\frac{V_{ideal}}{V_{buff}} = - \frac{1}{R_1(C_1 + C_2)s} \frac{(1 + sR_2C_2)(1 + sC_3(R_1 + R_3))}{(1 + sR_3C_3)(1 + \frac{sC_1R_2C_2}{C_1 + C_2})} \quad (56)$$

$$\frac{V_{ideal}}{V_{PZT}} = - \frac{R_{s2}}{R_{s1} + R_{s2}} \frac{1}{R_1(C_1 + C_2)s} \frac{(1 + sR_2C_2)(1 + sC_3(R_1 + R_3))}{(1 + sR_3C_3)(1 + \frac{sC_1R_2C_2}{C_1 + C_2})} \quad (57)$$

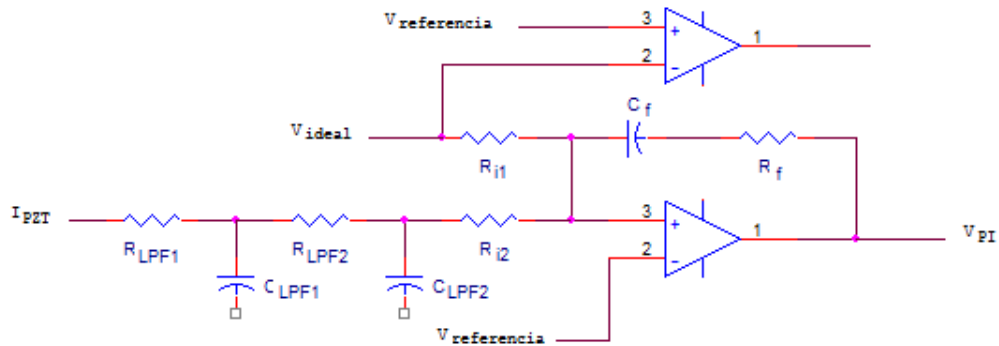
onde V_{buff} representa o divisor de tensão, $V_{referencia}$ o sinal DC utilizada como comparador V_{pzt} a tensão elétrica produzida pelo PZT e V_{ideal} a tensão senoidal ideal para que o comparador envie o sinal de disparo das chaves do circuito.

A análise do amplificador operacional mostrada na figura 36, mostra que a função de transferência do amplificador operacional, é dada por (56). Usando a escolha apropriada dos componentes, é possível definir qualquer valor para os polos, zeros e ganho. Ao considerar todo o circuito, a função de transferência para o bloco inteiro pode ser dada por (57).

Após o circuito gerar a corrente ideal, esta é subtraída da corrente real. Isto requer a detecção da corrente média para o amplificador, que é feito utilizando um resistor e um amplificador de ganho constante. O sinal de erro, é alimentado através de um regulador proporcional-integral (PI), tendo ganhos em forma de $\frac{K_i}{s} + K_p$ em que K_i é o ganho integral e K_p é o ganho proporcional. A figura 37 apresenta o circuito para detecção da corrente levando

em consideração o controlador PI, onde R_{LPP1} , R_{LPP2} , C_{LPP1} , C_{LPP2} representam as resistências e capacitâncias para o filtro passa baixo.

Figura 37 - Esquemática do circuito para detecção da corrente e o controlador PI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A corrente ideal é comparada com a tensão, a fim de determinar qual o modo que o conversor DC-DC deve operar.

A corrente real é detectada através de um resistor e um amplificador de ganho constante com ganho “A”. Para obter a corrente média, a corrente detectada é colocada através de um filtro de 2 pólos passa-baixa. O filtro deve ter um ganho de aproximadamente 1 na frequência natural do PZT (TURNER, 2012).

Os valores dos filtros devem ser escolhidos, de modo que, a impedância do filtro seja mais baixa do que a impedância da fase seguinte.

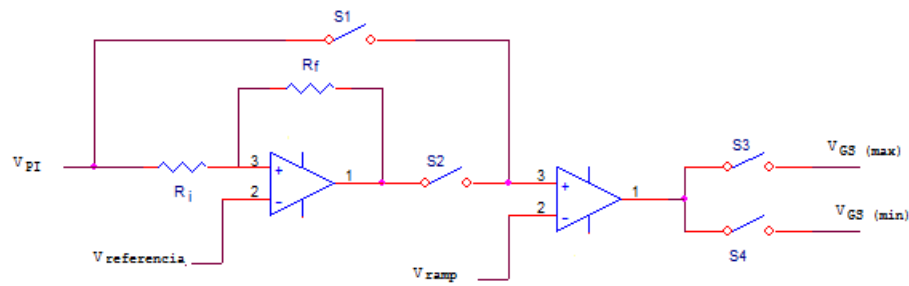
$$V_{PI} = \left(\frac{1}{sC_f} + R_f \right) \left(\frac{I_{PZT} R_s A}{\left(\frac{s}{\omega_{p1}} + 1 \right) \left(\frac{s}{\omega_{p2}} + 1 \right) R_{i2}} - \frac{V_{ideal}}{R_{i1}} \right) \quad (58)$$

A tensão de saída deste estágio é dada pela equação (58), onde I_{PZT} é a corrente no PZT, V_{ideal} é a tensão que representa a corrente ideal, e o filtro passa-baixa tem pólos representados por ω_{p1} e ω_{p2} .

A saída do controlador PI fornece uma tensão que é proporcional ao ciclo de trabalho destinado para o conversor. A informação do sinal digital e do controlador PI deve ser combinada com o gerador PWM para criar e enviar um sinal de modulação para a porta correta.

Gerar um sinal PWM de uma tensão rampa e um comparador, é o método mais fácil de geração. O esquema total para o sistema de geração de PWM pode ser visto na Figura 38.

Figura 38 - Gerador de sinal PWM.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No esquema mostrado acima, se a corrente é ideal para o conversor DC - DC, então S1 e S3 são fechadas, enquanto S2 e S4 são abertas. No instante seguinte, S1 e S3 são abertas, enquanto S2 e S4 são fechadas. O comparador de rampa, em seguida, usa a saída invertida do controlador PI e opera o interruptor inferior do conversor bidirecional DC- DC, dado pelas equações 59 e 60 onde, d é o instante de funcionamento do ciclo positivo.

$$\frac{d}{V_{PI}} = \frac{1}{V_{ramp}} \quad (59)$$

$$\frac{d}{V_{PI}} = -\left(\frac{R_f}{R_i}\right) \frac{1}{V_{ramp}} \quad (60)$$

A relação entre a entrada e a saída pode ser determinado por (59) para o modo de Buck e (60) para o modo de impulso, onde V_{in} é a saída do controlador PI, e V_{ramp} é tensão de pico a pico da rampa.

4.6 Modelagem Estrutural

4.6.1 Sistema Biestável

Estudos da captação de energia vibracionais mostram que os sistemas lineares, com suas características de excitação de acordo com o meio em que se encontram, são insuficientes para extrair e armazenar energia para aplicações autônomas. O principal desafio é que os osciladores lineares são adequados para serem excitados na frequência natural do sistema, apresentando banda de operação estreita, sendo menos eficiente do que um sistema capaz de trabalhar em uma ampla faixa de frequência. (ROUNDY et al., 2003; DUTOIT et al., 2005).

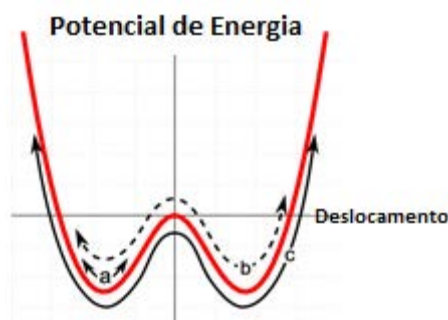
Esses fatores estimularam a exploração de métodos para ampliar a largura de banda utilizada nos sistemas de extração lineares (TANG et al., 2010).

Na busca por melhorias, soluções mais avançadas foram propostas buscando melhor aproveitamento em uma banda larga de frequência. Neste sentido, a exploração da não linearidade se tornou um foco importante. Desde então, estudos de captação de energia não lineares têm sido realizados, principalmente com foco no sistema *Duffing* (MANN et al., 2009), por impacto (GU et al., 2011), e os projetos de osciladores biestáveis. Sistemas monoestável por *Duffing*, exibem um efeito de ressonância que dependem da força de não linearidade, do dispositivo de amortecimento e da amplitude de excitação, aumentando assim a largura da banda de frequência utilizada.

Osciladores biestáveis possuem uma dupla restauração de força potencial, conforme ilustrado na figura 39 (Harne, 2013). Este prevê três regimes de funcionamento dinâmicos distintos, dependendo da amplitude de entrada mostrada na figura 40. Dispositivos biestáveis podem apresentar vibrações de baixa energia, conhecidas como *Intrawell*, apresentada na figura 39 (a).

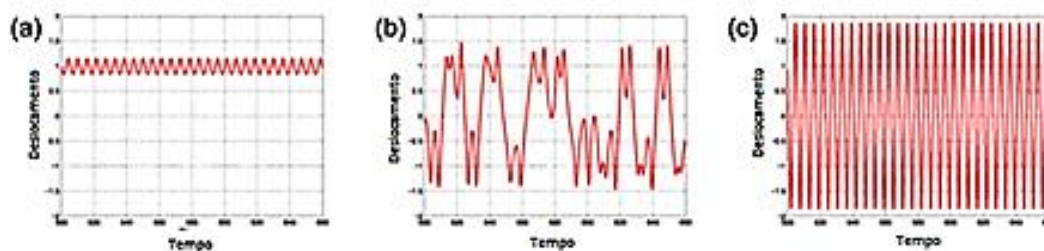
O oscilador biestável pode ser excitado de modo a expor as vibrações do caóticas, representadas pelas figuras 39 (b), 40 (b). À medida que a amplitude de excitação é aumentada, o dispositivo pode apresentar oscilações periódicas conhecidas como *Interwell* visto na figura 39 (c) e figura 40 (c).

Figura 39 - Oscilador biestável mostrando exemplos de trajetórias para (a) vibrações de baixa energia, (b) as vibrações caóticas e (c) oscilações periódicas de alta energia.



Fonte: Harne et al., (2013)

Figura 40 – Exemplo de respostas do deslocamento em função do tempo de um oscilador biestável, onde (a) representa as vibrações de baixa energia, (b) as vibrações caóticas e (c) oscilações periódicas de alta energia.



Fonte: Adaptado de Harne et al., (2013)

As vibrações com órbitas de alta energia periódicas têm sido empregadas como um meio para melhorar o desempenho na extração de energia.

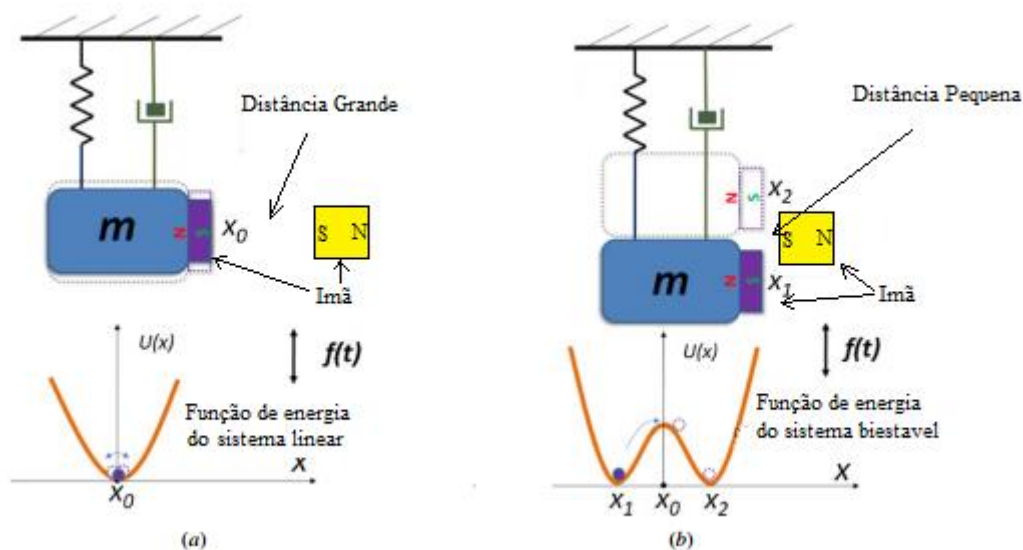
O caso linear pode ser assumido quando as distâncias entre os ímãs forem grandes. O processo não linear é assumido quando pequenas distancias são impostas entre os ímãs. O ímã fixo gera uma força dependente que se opõe à força de reação elástica da viga. Sob a ação da vibração da base, o sistema oscila.

Dessa forma, o sistema pode assumir duas dinâmicas diferentes.

Quando a força de repulsão magnética é desprezível, o comportamento do sistema pode ser assumido como sendo um oscilador linear, de modo que uma resposta de ressonância é esperada e um modelo de segunda ordem com função de energia potencial parabólico pode ser assumido.

Quando o ímã permanente é fixado perto da extremidade da viga, o comportamento pode ser descrito por um modelo não-linear, de forma que novas posições de equilíbrio irão aparecer (de acordo com a distância do ímã). Logo uma função da energia potencial biestável descreve a dinâmica do sistema. A figura 41 ilustra as duas dinâmicas do sistema.

Figura 41- Dinâmicas do sistema. (a) Sistema linear definido pela distância do ímã gera uma função de energia parabólica. (b) Pequena distância entre os ímãs causa a bi estabilidade aparecendo dois pontos de equilíbrio dados por X_1 e X_2 .



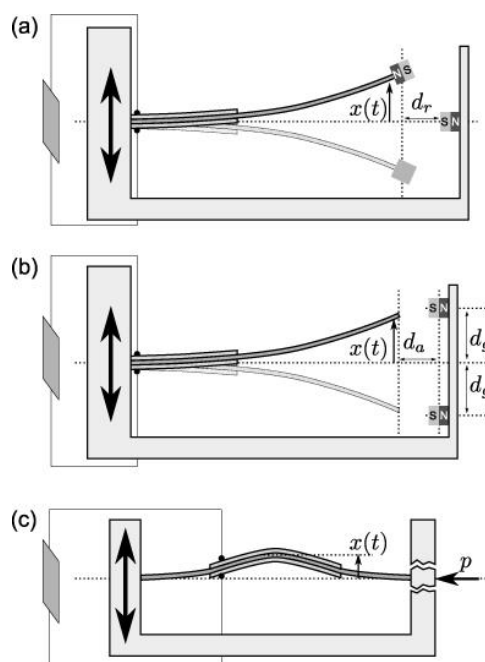
Fonte: Adaptado de Andò et al., (2010)

Uma vez que a saída elétrica de um coletor de energia é dependente da velocidade da massa, as órbitas de alta energia aumentam de forma considerável a potência por ciclo e são mais regulares na forma de onda (em comparação com as oscilações caóticas), que é preferível para os circuitos de armazenamento de energia externas (por apresentarem maior largura de banda).

Estes benefícios mostram um crescente estudo na literatura sobre captação de energia biestável. Entre muitos, três conceitos de sistemas extratores biestáveis comuns estão representados na figura 42.

A Figura 42 (a) mostra um extrator por repulsão magnética que apresenta uma força não linear, atribuída através da distância do intervalo do ímã d_r . A Figura 42 (b) mostra uma atração magnética biestável utilizando um feixe ferromagnético, direcionado para um dos dois ímãs, separados a uma distância de $2 d_g$. A figura 42 (c) mostra o exemplo de um feixe deformado com a bi estabilidade modificada por uma carga axial variável p .

Figura 42 – Exemplos de sistemas extratores biestáveis por: (a) repulsão magnética; (b) atração magnética; (c) carga axial.



Fonte: Harne et al., (2013)

4.6.2 Projetos de dispositivos biestáveis

O uso de atração magnética para induzir a bi estabilidade de uma viga em console ferromagnético foi uma das primeiras investigações empregadas no estudo de um sistema mecânico para obter respostas não lineares. A construção de um sistema semelhante à figura 42 (b) foi explorada por Erturk e Inman (2011) para a excitação de frequência única. As oscilações não lineares foram insuficientes para produzir uma tensão RMS maior do que o dispositivo linear.

Existem inúmeros estudos que investigaram extratores de energia biestáveis usando repulsão magnética para desestabilizar a posição de equilíbrio linear, como a proposta por Sneller et al. (2010). Várias destas investigações têm considerado um feixe piezelétrico na viga, com a massa de ponta magnética, tendo a mesma polaridade que um ímã de frente, que pode ser movido de uma certa distância para a extremidade da viga, como vista na figura 42 (a). Uma característica desta configuração é a comparação do sistema linear com o biestável apenas removendo o ímã que servia para repelir a massa magnética da viga.

Lin e Alphenaar (2010) mostraram que o projeto mostrado na figura 42 (a) produziu maior pico de tensão que o dispositivo linear equivalente, quando excitado por um ruído branco. O estudo consistiu de um circuito de retificação para comparar a tensão medida sobre um condensador de armazenamento. Observou-se que o dispositivo de extração biestável é 50% maior do que o dispositivo de tensão linear.

Tang et al. (2012) também estudaram o feixe piezelétrico biestável com repulsão magnética. Uma distância ideal para a repulsão magnética foi observada, podendo ser obtido um aumento considerável da energia.

Sneller (2010) utilizou repulsão magnética de um ímã oscilante ao longo do eixo de uma viga, para criar a bi estabilidade; indução do magneto oscilante através de uma bobina, que serviu como mecanismo de conversão eletromecânico. A indução de órbitas de alta energia foi mostrada para proporcionar uma melhoria na potência de saída.

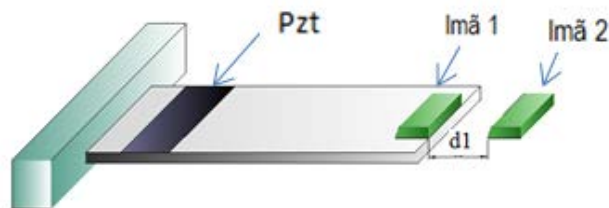
Karami et al. (2013) utilizaram uma matriz circular de vigas com piezelétricos com massas de ponta magnética, que foram ativadas por meio de um moinho de vento com eixo vertical, que tem um eixo no centro da matriz do feixe. Os ímãs foram ligados ao eixo do moinho de vento, assim, quando o moinho de vento rodava, os feixes piezelétricos fixos na viga foram excitados pela repulsão dos ímãs de ponta e os ímãs rotativo.

A velocidade angular ideal do moinho de vento foi escolhida, de forma que mais movimentava o conjunto de vigas piezelétricas. A dinâmica do sistema foi considerada altamente complexa, no que diz respeito à força de repulsão magnética por rotação do moinho de vento.

4.6.3 Sistema biestável proposto e equações do oscilador.

Neste tópico, será analisada a equação característica de um oscilador biestável, com um grau de liberdade. Este consiste de uma viga com material piezelétrico acoplado em sua extremidade fixa, enquanto que na sua extremidade oposta, livre, coloca-se uma massa magnética. A representação esquemática pode ser observado na figura 43.

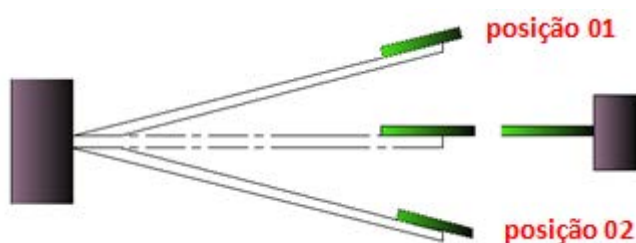
Figura 43 - Projeto do sistema biestável.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Diante da massa magnética é colocado um segundo ímã, que em função da distância poderá gerar a condição de bi estabilidade. Nesta condição se espera uma maior coleta de energia. O ímã foi posicionado de maneira a permitir diferentes distâncias, como também diferentes angulações. Por conta da repulsão ocorrida entre os ímãs, o sistema terá posições estáveis, mostradas na figura 44.

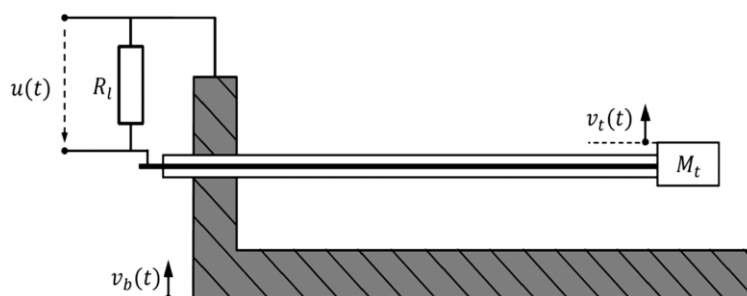
Figura 44 - Deflexões da viga. Posição estável 01 e 02.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para o sistema descrito acima, assume-se $v(t)$ como a velocidade relativa entre a ponta da extremidade livre da viga $v_t(t)$ e a da base $v_b(t)$, como mostrada na figura 45 e na equação (61):

Figura 45 - Sistema típico.



Fonte: Vocca et al (2013).

$$v(t) = v_t(t) - v_b(t) \quad (61)$$

Sabe-se que se trata de um sistema eletromecânico, logo, possui características tanto mecânicas quanto elétricas. A partir de um modelo físico extrator de energia é possível calcular as características do sistema pretendido. A equação do movimento do modelo da figura 45 pode ser descrita por (62) (VOCCA, 2012):

$$M\dot{v}_t(t) + Bv(t) + K \int v(t) dt = -\alpha u(t) \quad (62)$$

onde $u(t)$ é a tensão elétrica gerada, α é o fator de transferência entre o domínio mecânico e elétrico, M é a massa total, B o amortecimento e K a rigidez. Subtraindo-se $M\dot{v}_b(t)$ nos dois lados da equação e lembrando que,

$$M\dot{v}(t) = M\dot{v}_t(t) - M\dot{v}_b(t) \quad (63)$$

obtem-se:

$$M\dot{v}(t) + Bv(t) + K \int v(t) dt = -M\dot{v}_b(t) - \alpha u(t) \quad (64)$$

A equação do movimento da ponta da viga é dada pela equação (65):

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{dU(x)}{dx} - \gamma \frac{dx}{dt} - K_v V(t) + \sigma \varepsilon(t) \quad (65)$$

onde $U(x)$ é a energia potencial em função do deslocamento vertical x , com uma massa equivalente m . O segundo termo $(-\gamma \frac{dx}{dt})$ refere-se a dissipação de energia devido a flexão, e $(-K_v V(t))$ é a energia transferida para a carga elétrica resistiva R_L . A equação de acoplamento é dada por:

$$\frac{dV(t)}{dt} = K_c \frac{dx}{dt} - \frac{V(t)}{\tau_p} \quad (66)$$

onde K_c é o coeficiente de acoplamento. A constante do tempo da dinâmica do PZT dada por τ_p , é obtida através da capacitância C e da carga resistiva R_L , sendo $\tau_p = CR_L$. A variável K_v é a constante de acoplamento do piezelétrico e por fim, $\sigma \varepsilon(t)$ é a força de vibração do sistema. A função da energia potencial é dada por (67):

$$U(x) = \frac{1}{2} K_{eff} Dpv^2 + (ax^2 + bd1^2)^{-3/2} \quad (67)$$

onde K_{eff} , a e b representam as constantes para os parâmetros físicos da viga. Para,

$$a = Dpv^2 \left(\frac{\varepsilon_0 M^2}{2\pi x} \right)^{-3/2} \quad (68)$$

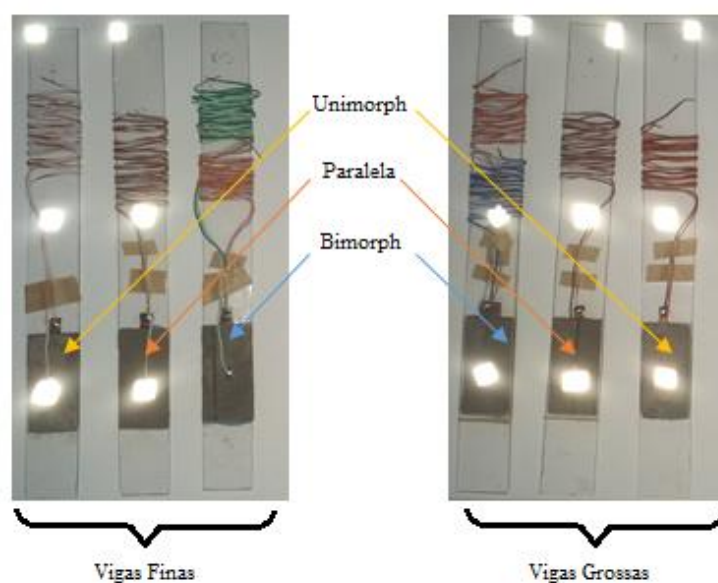
sendo ε_0 constante de permissividade, M , o momento magnético, Dpv , a distância entre o ponto de medida e o comprimento da viga, $d1$, a distância entre os ímãs responsável pelo parâmetro de ajuste do potencial linear para o par bi estável e $b = a/Dpv^2$.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente para o dispositivo de extração de energia utilizando materiais piezelétricos. O sistema consiste de vigas do tipo *cantilever* (engastada em uma das extremidades), com material piezelétrico revestindo a viga de forma parcial. Na extremidade livre da viga foi colocada uma massa magnética, que é utilizada de acordo com a necessidade do experimento. Com a utilização do *Shaker*, foi possível obter um movimento de translação vertical, criando uma aceleração na base do dispositivo.

As vigas foram separadas em duas diferentes espessuras denominadas viga “fina” e viga “grossa”, onde cada uma delas possui três diferentes topologias em relação à disposição do material piezelétrico, denominadas unimorph (simples), paralela e bimorph, conforme apresentada na figura 46. Cada viga teve uma extremidade fixada no *shaker* de forma que o PZT tivesse uma distância de 2mm da base fixa para excitação. Foram determinados 3 pontos iguais em todas as vigas para medir a velocidade através do laser.

Figura 46 – Topologia das vigas e dos materiais piezelétricos com os respectivos pontos de medida da velocidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Durante os procedimentos experimentais desconsiderou-se a presença dos magnetos colocados em frente à extremidade livre da viga para o caso linear. Posteriormente, os magnetos

foram adicionados ao sistema, possibilitando a variação da distância através do trilho, para considerar-se o caso de não linearidade.

As tabelas 9, 10 e 11, apresentam as propriedades do material e propriedades geométricas correspondente ao material piezelétrico, à viga e à massa magnética.

Tabela 9 – Propriedades do PZT.

Parâmetros Geométricos	PZT-5H
Comprimento (<i>mm</i>)	40
Largura (<i>mm</i>)	20
Espessura (<i>mm</i>)	0,05
Propriedades do Material	
Densidade de massa (<i>kg/m³</i>)	7500
Módulo de Young (<i>GPa</i>)	60,6
Constante Piezelétrica (<i>C/m²</i>)	-16,6
Permissividade (<i>F/m</i>)	3400x ϵ_0
Permissividade no vácuo (<i>F/m</i>)	8,85x10 ⁻¹²

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 10 – Propriedades da viga.

Parâmetros Geométricos	Viga Fina	Viga Grossa
Comprimento (<i>mm</i>)	170	170
Largura (<i>mm</i>)	20	20
Espessura (<i>mm</i>)	1	2
Densidade de massa (<i>kg/m³</i>)	1180	
Módulo de Young (<i>GPa</i>)	6	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 11 – Propriedades da massa magnética.

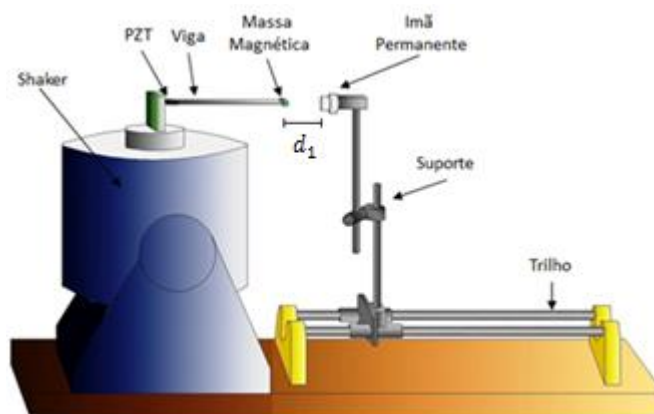
Parâmetros Geométricos	Imã 1	Imã 2	Imã 3
Comprimento (<i>mm</i>)	-	-	12
Largura (<i>mm</i>)	-	-	6
Espessura (<i>mm</i>)	10	14	3
Diâmetro (<i>mm</i>)	22	14	-
Massa (<i>g</i>)	6	5	-
Propriedades do Material			
Constante de permeabilidade (<i>N/A⁻²</i>)	4 π .10 ⁻⁷		
Força magnética (<i>T</i>)	4200	4200	4000

Fonte: Elaborada pelo autor.

As figuras 47 e 48 mostram o modelo esquemático e o projeto real para os ensaios, respectivamente. O projeto experimental consiste de uma viga fixa em uma de suas extremidades na parte superior do excitador eletromagnético (*shaker*) que cria uma aceleração

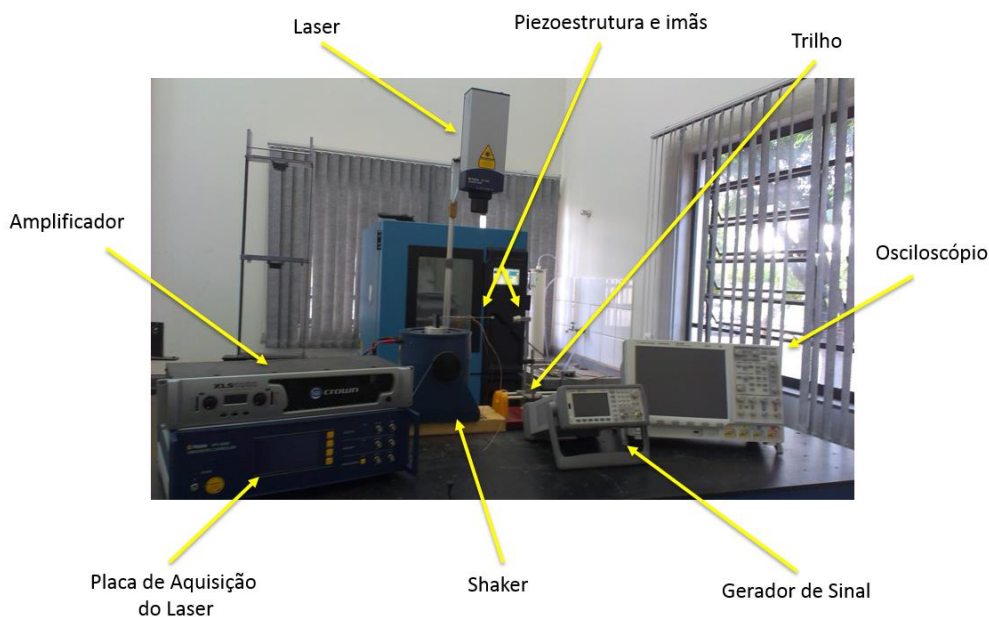
vertical na base. Próximo ao *shaker* foi adicionado um trilho com guias deslizantes lineares que possibilitam a variação da distância do ímã neodímio para estudo do caso não linear. Na extremidade livre da viga, foi analisado a situação sem massa e a adição de uma massa magnética utilizando ímãs neodímios. Em cada viga, foram determinados três pontos para a análise da velocidade e deslocamento da viga. Estas variáveis foram medidas com o vibrômetro a laser e com o osciloscópio, para medir a velocidade relativa e fazer a integração deste sinal, respectivamente.

Figura 47 – Modelo esquemático do dispositivo para coleta de energia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 48 – Projeto real para ensaios experimentais e instrumentos utilizados.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram adicionadas duas massa magnética (ímã neodímio) na extremidade livre da viga, possuindo formato retangular com dimensões $(12 \times 6 \times 3)mm$. Cada ímã foi adicionado em uma face na extremidade da viga a fim de criar um efeito de atração possibilitando a imobilização dessas massas. O peso total da massa livre adicionada é de 3g. Para criar o efeito não linear, foram adicionados dois imas em frente à massa magnética da viga, que possuem dimensões e força magnética mostrada na tabela 11.

Em relação aos instrumentos utilizados nos testes, foi usado um gerador de funções da marca Agilent modelo 33500B series Waveform Generator, associado a um amplificador de potência modelo Crown XLS 1000 para prover o sinal de excitação para o *shaker* criar a aceleração na base da viga. O excitador eletromagnético utilizado é da marca Veb Robotron modelo Messelektronik. O vibrômetro a laser da marca Polytec modelo OVF 5000 foi utilizado para medir a velocidade da extremidade livre da viga. A medição e o processamento digital de todos os sinais medidos foi realizado por meio de um osciloscópio digital de 4 canais de modelo DS07034B do fabricante Agilent Technologies. Na figura 48, é possível observar todos os instrumentos utilizados.

Para análises dos resultados foram realizados quatro ensaios, intitulados como: Caso Linear, Caso Não Linear, Conversores não lineares e Sistemas Autônomos. O caso linear consiste em identificar propriedades básicas do sistema como a linearidade, frequência natural e potência levando em consideração o sistema com e sem adição da massa. Nos ensaios não lineares foram introduzido os magnetos frontais, analisando o caso de bi estabilidade e não linearidade para a viga com massa magnética na extremidade livre. Dessa forma buscou-se identificar as propriedades dos conversores, largura de banda e a introdução de não linearidade no sistema.

A fim de diminuir as incertezas e obter uma maior confiabilidade dos resultados, foram utilizadas as mesmas condições iniciais de contorno em todo o experimento além de todo experimento ter sido repetido 3 vezes. Com a utilização de equipamentos de boa precisão e exatidão foi possível obter uma boa reprodutibilidade do experimento, possibilitando dividi-lo em etapas. As faixas de operação (*range* ou *span*) e a resolução dos instrumentos também foram observadas a fim de não se cometer erros. Todo o experimento foi realizado a uma temperatura de 20°C e com a utilização de um torquimetro, foi possível obter o mesmo aperto nos parafusos na fixação da extremidade das vigas ao *shaker*. Por se tratar de um experimento realizado em baixas frequências, desprezou-se o movimento de torção sofrido pela viga.

5.1 Caso Linear

Os ensaios experimentais para o caso linear foram realizados seguindo o procedimento de montagem da figura 47 excluindo-se o ímã permanente sobre o trilho, ou então afastando o ímã da extremidade livre da viga, a uma distância considerável, de tal forma que não haja influência magnética no sistema.

O estudo desse caso tem por objetivo a identificação de propriedades lineares, como a frequência natural, tensão e corrente elétrica produzida pelo material piezolétrico para diferentes topologias. Desta forma, o estudo destas propriedades em condições de operação linear torna-se vital, para a comparação com o caso não linear.

No experimento, aplicou-se um sinal de excitação senoidal de amplitude determinada ao conjunto. Devido à deformação da viga, o material piezolétrico gera em seus terminais uma tensão e corrente alternada. Com as técnicas de retificação apresentadas no capítulo 4, foi possível converter os sinais gerados pelo PZT de alternados para contínuos, possibilitando armazenar a energia em capacitores.

Através da técnica de varredura de frequência, determinou-se experimentalmente a frequência natural de cada uma das vigas com suas respectivas topologias. No processo de *stepped sin* (varredura) foi utilizado um intervalo de frequências $\Delta f = 0.01Hz$ (incrementos de frequência) e as informações colhidas foram feitas em regime permanente.

A seguir, serão apresentados os resultados experimentais obtidos para as diferentes topologias das vigas e dos PZTs, relacionando a tensão de pico produzida em seus terminais com suas respectivas frequências. Para as vigas finas foi utilizado uma amplificação na excitação da base de 2Vpp (pico-pico) e para as vigas grossas 4Vpp, além de todo o experimento ter sido reproduzido 3 vezes, afim de se obter uma média representativa.

As figuras 49 e 50 apresentam as tensões de pico correspondente a cada frequência para as diferentes topologias do PZT utilizando a viga fina com e sem adição de massa. Observa-se, que para a viga fina sem massa, a topologia do PZT que teve a melhor tensão de pico em volts foi o PZT paralelo com uma tensão de 7,56 volts com a frequência natural do sistema de 14,16Hz.

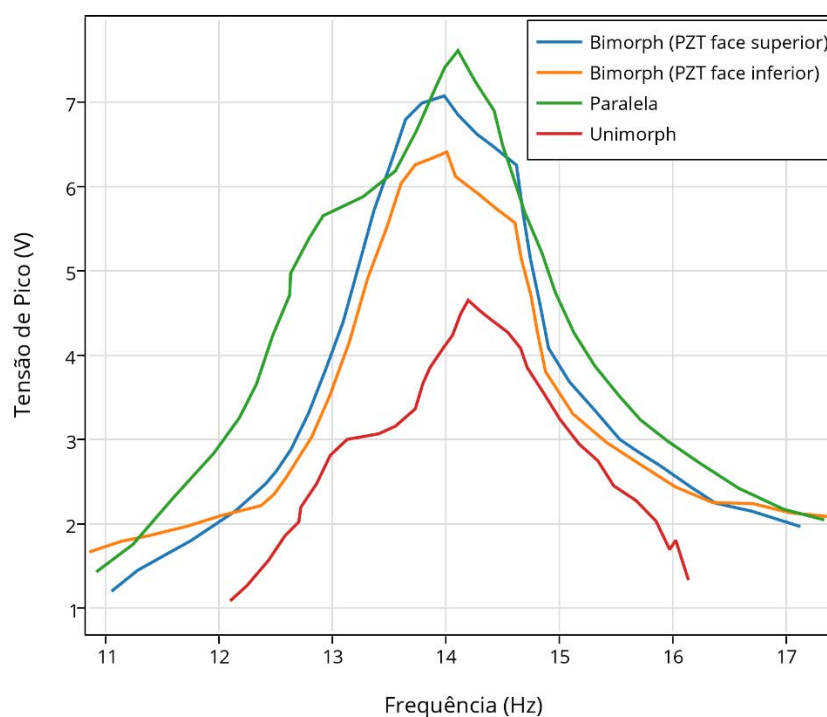
Para a estrutura bimorph, cabe ressaltar que a topologia é constituída por 2 PZT, sendo que cada um é posicionado em uma face da viga, dessa forma, cada um apresenta sua tensão e corrente própria. Os terminais de saída de cada PZT são conectados em pontes retificadoras e

em sequência ligadas em paralelo, de tal forma que o circuito irá utilizar a maior tensão média comparando-se a tensão fornecida por cada PZT, e suas correntes geradas serão somadas. Cada piezeletrodo foi nomeado como PZT superior e PZT inferior. O PZT superior obteve tensão de 7.05V e o inferior 6,34V para uma frequência de 14,03Hz.

A estrutura unimorph obteve o resultado menos significativo dentre as três topologias, obtendo uma tensão de 4,65V para uma frequência de 14,22Hz.

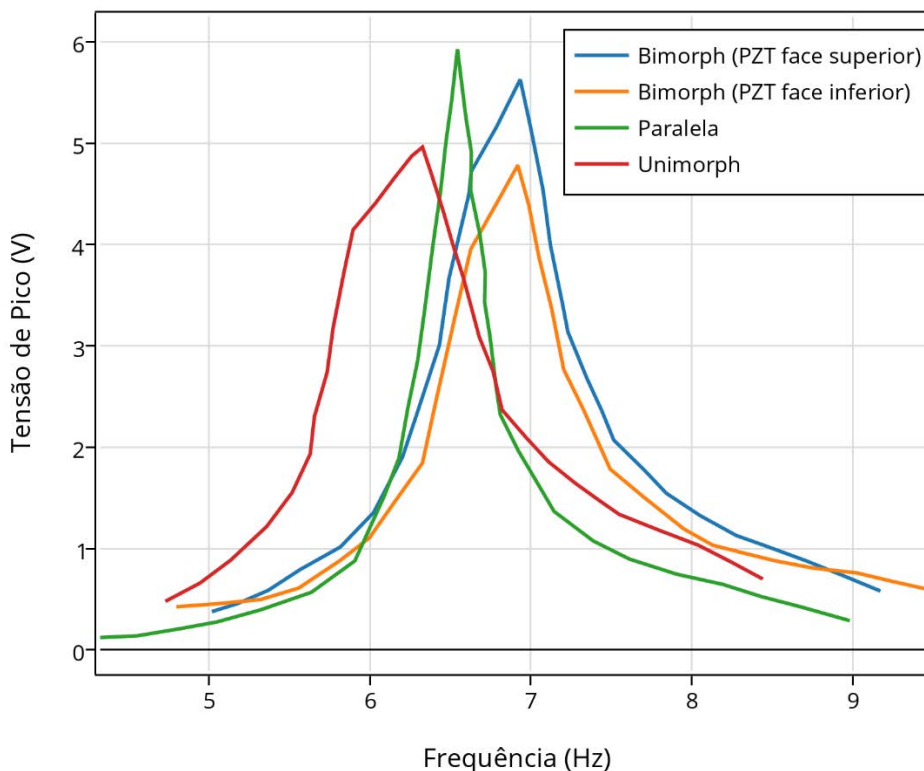
Para a viga fina com massa os resultados referentes à melhor topologia piezelétrica foram as mesmas da viga fina sem massa. Para o PZT paralelo obteve-se 5,91V para 6,57Hz, porém nota-se que a largura de banda da frequência foi menor, comparada com o sistema sem massa. Para a situação bimorph a tensão para o PZT superior e inferior foram respectivamente, 5,61V e 4,78V para uma frequência de 6,95Hz. O PZT unimorph apresentou tensão de 4,97V para uma frequência de 6,34Hz. A adição da massa na extremidade causa um acentuado decréscimo na frequência natural da viga, que é um dos objetivos para que o coletor de energia possa aproveitar as vibrações ambientais, geralmente em baixas frequências.

Figura 49 – Frequências naturais e tensão de pico para diferentes topologias de PZT para a viga fina sem massa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50 – Frequências naturais e tensão de pico para diferentes topologias de PZT para a viga fina com massa.



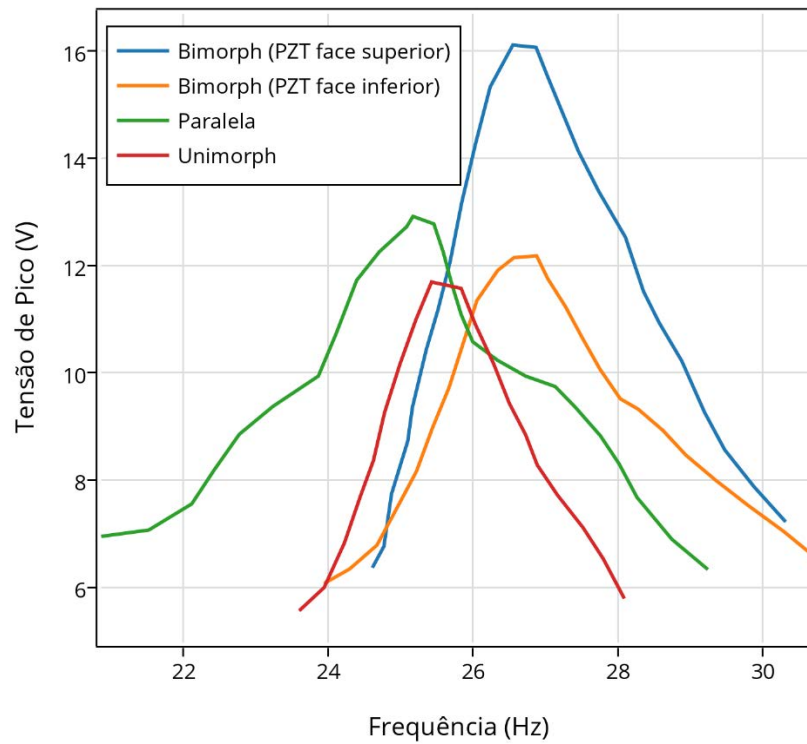
Fonte: Elaborada pelo autor.

O procedimento experimental e análise para a viga grossa com e sem massa, foram parecidos com os descritos anteriormente, apenas variando a amplitude do sinal de excitação da base para 4 Vpp. As figuras 51 e 52 mostram os resultados obtidos para a viga grossa.

Para a viga grossa sem massa, a topologia bimorph apresentou o melhor resultado dentre as três analisadas, 16,08V para o PZT superior e 12,13V para o PZT inferior com uma frequência de 26,53Hz. A configuração em paralelo obteve 12,9V para 25,16Hz e a configuração unimorph forneceu 11,69V para 25,44Hz.

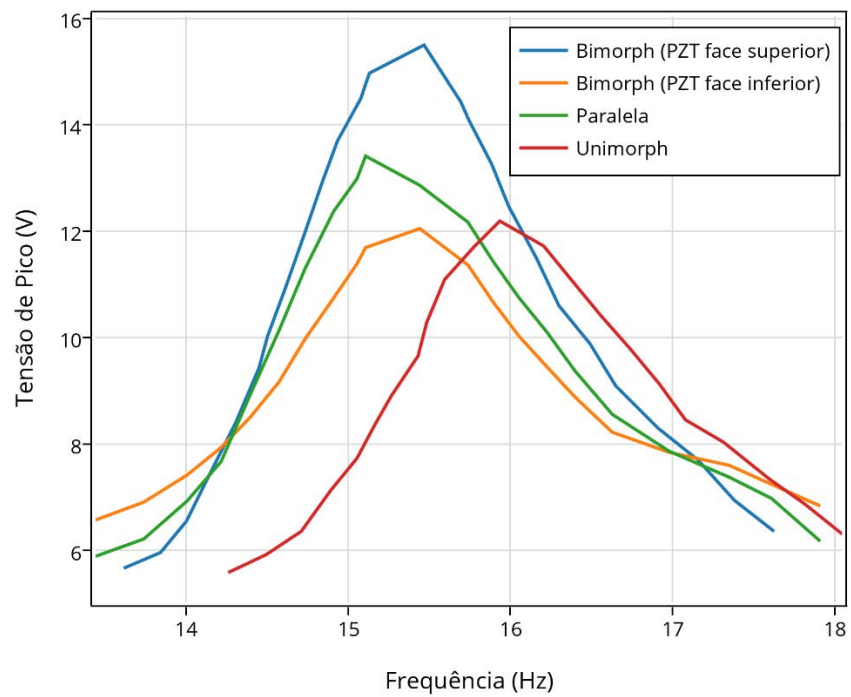
Com a adição da massa na extremidade livre obteve-se 13,37V para uma frequência de 15,01Hz para a configuração paralela, 12,18V com 15,93HZ para a unimorph. A bimorph obteve o melhor resultado com 15,54V e 11,99V para o PZT superior e inferior respectivamente, com uma frequência de 15,48Hz.

Figura 51 – Frequências naturais e tensão de pico para diferentes topologias de PZT para a viga grossa sem massa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 52 – Frequências naturais e tensão de pico para diferentes topologias de PZT para a viga grossa com massa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Todos os resultados das tensões obtidas anteriormente foram referentes às frequências naturais de cada sistema analisado. A adição da massa na extremidade livre da viga diminuiu consideravelmente a frequência natural do sistema, o que é favorável para o experimento em questão por se querer reproduzir baixas frequências. Considerando que as vibrações encontradas na natureza, como por exemplo o vento e a batida do coração, apresentam baixas frequências (2-6Hz), e que o trabalho proposto busca utilizar esses meios para extração de energia, foi adotado o sistema com baixa frequência de trabalho e que apresentou boas respostas de tensão. No entanto, a adição da massa reflete diretamente na diminuição da corrente média gerada pelo material piezoelétrico, pois a frequência do sistema diminuiu.

Desta forma, para as análises seguintes referente ao caso não linear e da potência extraída para diferentes conversores, foi utilizado a viga fina com massa e PZT em paralelo.

Para validar qualitativamente o caso linear, plotou-se a velocidade na extremidade livre da viga em relação ao deslocamento sofrido pela mesma. Para a análise utilizou-se a viga fina com massa e PZT em paralelo. Com a resposta foi possível analisar a linearidade através da trajetória circular apresentada na figura 53.

Figura 53 – Análise qualitativa para o caso linear considerando a viga fina com massa e PZT em paralelo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

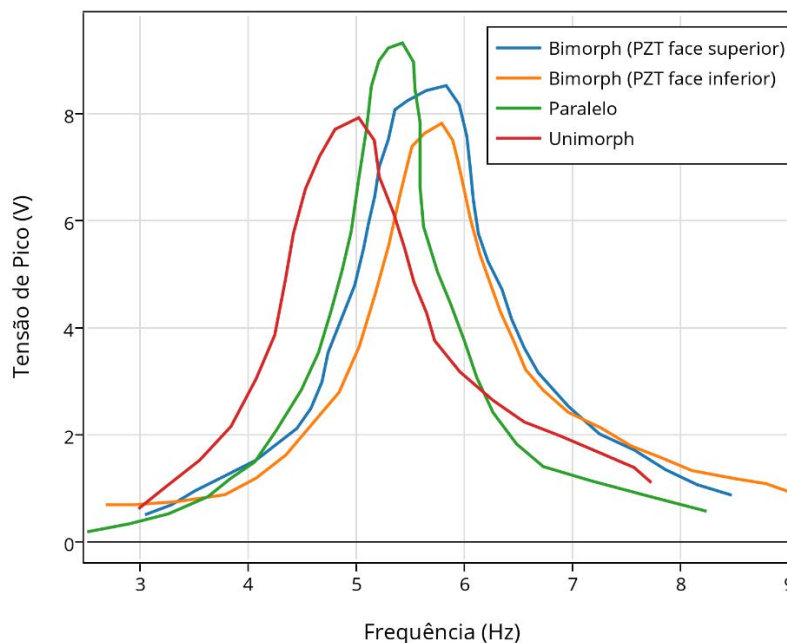
5.2 Caso Não Linear

Os ensaios não lineares tem como objetivo analisar de forma experimental o comportamento dinâmico do sistema proposto anteriormente, de forma a observar e estudar a presença de efeitos não lineares e seus benefícios para a geração e extração de energia.

Para o experimento proposto, utilizou-se o modelo esquemático presente na figura 47. O sistema apresentado transita entre as condições de mono estabilidade e bi estabilidade, que foram descritas na seção 4.6. O que determina essa transição é a distância entre a massa magnética posicionada na extremidade livre da viga e o ímã frontal posicionado no trilho, aliada a intensidade da força de excitação do sistema. A variação desta distância amplifica ou diminui a força magnética, causando alteração na frequência do sistema e na intensidade dos efeitos não lineares. Para os resultados apresentados a seguir, foram consideram o efeito repulsivo entre os ímãs.

A figura 54 mostra a tensão gerada pela frequência de cada topologia piezelétrica descrita anteriormente, introduzindo-se a não linearidade neste sistema. Nota-se que todas as diferentes configurações de PZT, obtiveram um aumento na tensão, na largura de banda e apresentaram uma pequena variação na frequência natural. O PZT em paralelo apresentou 9,29V com uma frequência de 5,46Hz, o bimorph 8,49V e 7,79V para o PZT superior e inferior respectivamente e a configuração unimorph obteve 7,88V para uma frequência de 5,03Hz.

Figura 54 – Frequências naturais para diferentes topologias de PZT para a viga fina com massa utilizando o sistema de biestabilidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O experimento realizado para a transição entre as condições de monoestabilidade e biestabilidade pode ser vista na figura 55. A influência magnética pode interferir nos resultados obtidos de forma positiva ou negativa, pois ela varia a impedância do material. Essa alteração na impedância é causada pela variação na permeabilidade magnética do material, que depende da magnetização do mesmo. Dessa forma, pode ocorrer acréscimo ou decréscimo na tensão e corrente gerada pelo material piezelétrico.

Figura 55 – Transição entre as condições de monoestabilidade e biestabilidade do sistema para $d1=0,035m$ (distância entre magnetos) e amplitude de $2,5V_{pp}$.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para validar qualitativamente o caso não linear, plotou-se a velocidade na extremidade livre da viga em relação ao deslocamento sofrido pela mesma. Para a análise utilizou-se a viga fina com massa e PZT em paralelo. Nota-se que o sistema é periódico e que apesar de se introduzir características não lineares ao sistema, a resposta ainda continua linear. Para que aconteça a transição do monoestável para o biestável, é necessário uma velocidade que supere a energia para transição do estado, como pode ser vista na figura 56.

Figura 56 – Análise qualitativa para o caso não linear, viga fina com massa e PZT em paralelo considerando o sistema biestável e $d1=0,035\text{m}$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para se fazer uma análise comparativa, foi proposto a utilização do ímã de forma a se alterar o sentido das linhas de campo como mostrado na figura 57.

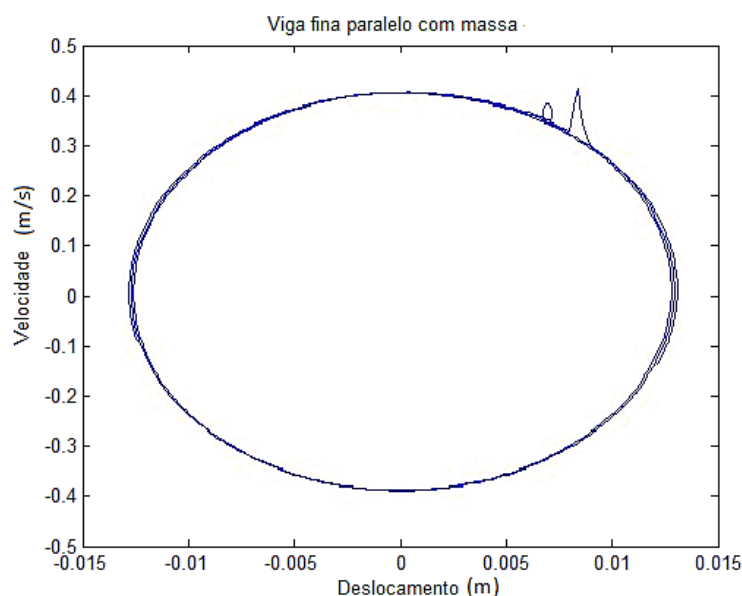
Figura 57 – Alteração da posição do ímã para análise da não linearidade. Amplitude de $3V_{pp}$ e $d1=0,025\text{m}$ (distância entre magnetos).



Fonte: Elaborada pelo autor.

A resposta para a situação acima é vista na figura 58. Nota-se que no canto superior direito da imagem, é possível observar a presença de uma pequena circunferência. Como este efeito permaneceu durante vários ciclos, pode-se qualificar este efeito como a introdução de não linearidade no sistema. Isso pode derivar do efeito repulsivo do ímã, que criou uma força axial na viga, fletindo sutilmente e introduzindo uma harmônica dentro do sistema.

Figura 58 – Análise qualitativa para o caso não linear alterando a disposição do ímã. Amplitude de 3Vpp e $d1=0,025\text{m}$.

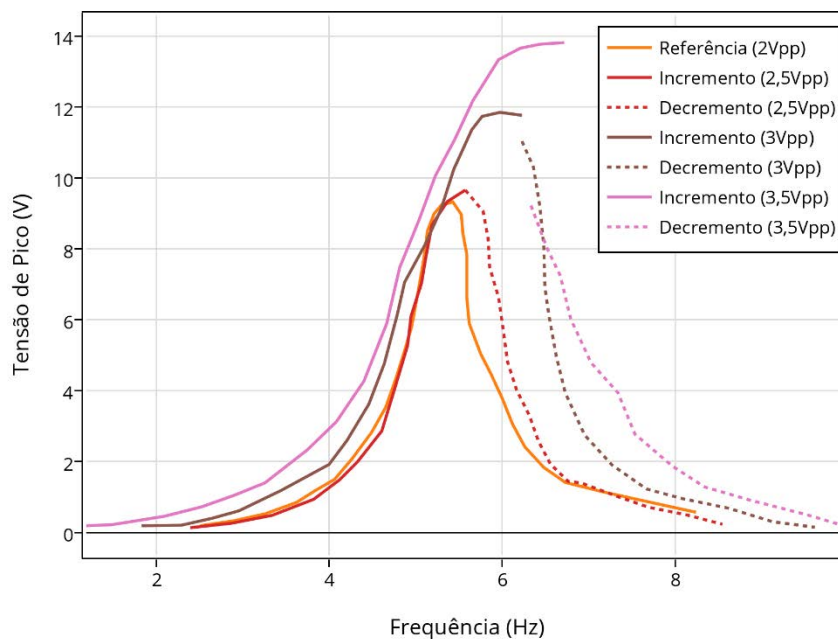


Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo McConell e Varoto (2008) uma exigência fundamental para a realização de ensaios de vibração não lineares é a utilização de sinais de excitação apropriados para que se possam identificar as características não lineares do sistema.

Afim de aprofundar mais o estudo da não linearidade no sistema, foi aplicado uma excitação senoidal de varredura, de forma que essa função senoidal evolui no tempo com incrementos sucessivos na frequência do sinal e depois realiza o procedimento inverso, decrescendo essa frequência. Observou-se a resposta do sistema utilizando quatro amplitudes diferentes, como pode ser visto na figura 59.

Figura 59 – Análise da não linearidade através do incremento e decremento da frequência para diferentes amplitudes e $d1=0,035m$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Verificou-se um aumento na faixa de frequência quando se considera a não linearidade. O aumento da amplitude no sistema causa uma variação brusca na tensão de pico para uma mesma frequência analisada no incremento e decréscimo da frequência, mostrando que o efeito não linear é proporcional à amplitude imposta ao sistema.

A distância entre os magnetos da extremidade livre da viga exerce grande influência no movimento do sistema, pois altera a intensidade da força magnética, alterando assim a frequência natural do sistema.

Comparando-se as respostas das curvas obtidas, é claro o aumento da largura de banda através do aumento da amplitude. A curva marrom e rosa, com amplitudes de 3Vpp e 3,5Vpp respectivamente, apresentam fatores típicos de não linearidade. Para estas curvas, o sistema apresenta tensões de pico semelhantes para uma largura de banda de frequência próxima da natural. Porém, notou-se que para a situação de incremento, a tensão varia consideravelmente se comparada com a situação de decremento da frequência. Para a curva marrom, apresentou tensão de 11,68V para 6,22Hz na condição de incremento, e 10,93V para 6,25Hz para a condição de decremento. A curva rosa apresentou 13,69V para 6,48Hz no incremento da frequência, e 9,11 para 6,33Hz no decremento.

A frequência tende a crescer quando a amplitude do sinal de excitação (V_{pp}) aumenta, como pode ser visto na figura 59. Isso ocorre pelo aumento da introdução de não linearidade no sistema.

5.3 Conversores Não Lineares

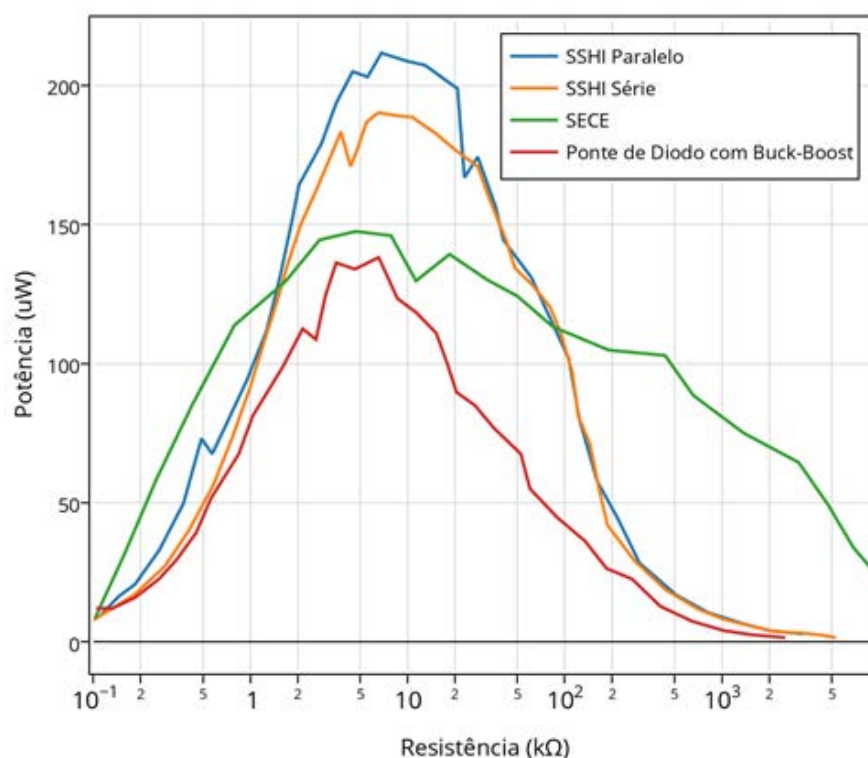
A utilização de conversores não lineares tem por objetivo potencializar a extração de energia através de diferentes técnicas. Dentre as principais características dos conversores, buscou-se aproveitar o melhor ciclo da corrente e tensão elétrica gerada pelo material piezelétrico através do acionamento dos semicondutores controláveis, acionando-os quando o deslocamento na extremidade livre da viga for máximo, como apresentado no capítulo 4.

Para analisar a potência extraída do sistema, levou-se em consideração a medida na saída dos conversores utilizados, ligando-os a cargas com diferentes resistências, determinadas através de associações de resistências e potenciômetros.

Cabe ressaltar que a carga introduzida para análise é puramente resistiva, o que não ocorre em sistemas microeletrônicos. Uma vez que o objetivo final é otimizar o extrator de energia e analisar a sua capacidade de alimentar componentes eletrônicos, deve-se lembrar que esses sistemas possuem componentes com características de defasar a corrente em relação à tensão, podendo mudar a potência final de forma satisfatória ou não. Isso ocorre pela utilização de componentes como indutores e capacitores.

Como é possível analisar o consumo individual da carga a ser acoplada independentemente dos componentes internos, a utilização de resistores para a análise da dissipação de energia se torna válida para uma estimativa prévia da potência gerada pelo PZT com as diferentes topologias de conversores utilizadas. A figura 60 apresenta os resultados obtidos, utilizando a viga fina com massa na extremidade livre, considerando o caso linear.

Figura 60 – Potência na carga em função da resistência para diferentes topologias de conversores.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A configuração que apresentou melhor resultado na potência extraída na carga foi o SSHI em paralelo seguido do SSHI em série, SECE e ponte de diodo com o conversor buck-boost, respectivamente. Entretanto, o conversor SECE apresentou a melhor banda de impedância, variando a potência de forma suave em comparação com os demais conversores utilizados. Isso é um fator a ser considerado, pois a impedância dos sistemas microeletrônicos a serem acoplados podem variar de acordo com a programação e operação.

Em relação ao conversor buck-boost, todos os conversores utilizados obtiveram ganhos satisfatórios. A tabela 12 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 12 – Comparação da potência, resistência, corrente e ganho para as diferentes topologias de conversores.

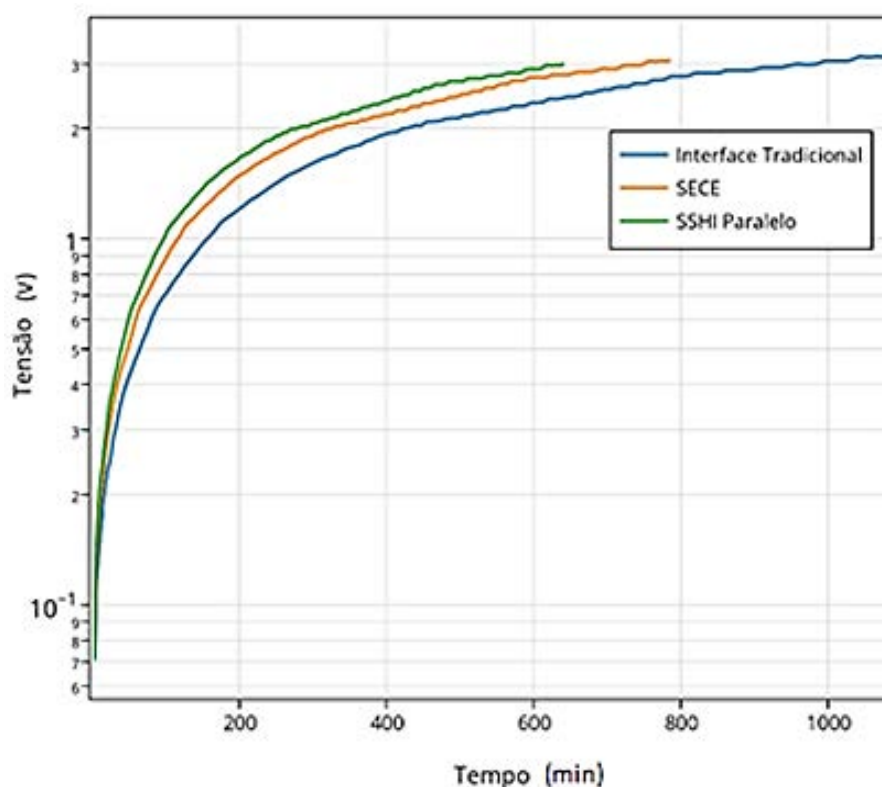
	Potência (μW)	Resistência Ótima ($\text{k}\Omega$)	Corrente (μA)	Ganho (%)
SSHI Paralelo	211,18	6,95	174,99	53,10
SSHI Série	189,64	6,72	167,99	37,50
SECE	146,99	5,05	170,99	6,60
Ponte Diodo BB	137,88	6,62	144,32	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com os resultados analisados anteriormente, considerou-se três configurações a serem utilizadas para analisar o tempo de carregamento que o sistema extrator de energia necessitou para alcançar uma tensão de 3V no supercapacitor. Adotou-se a ponte de diodo com conversor buck-boost como a interface tradicional utilizada, e o SECE e SSHI em paralelo, que apresentaram os resultados mais significativos.

Para armazenar a energia utilizou-se um supercapacitor de 1,5F (Farad) e 5V, a viga fina com massa na extremidade livre considerando o caso não linear e um sinal de excitação na base e amplitude iguais para os três conversores analisados. A figura 61 apresenta os resultados obtidos.

Figura 61 – Tempo de carregamento do supercapacitor considerando o conversor de interface tradicional, SECE e SSHI em paralelo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O conversor SSHI em paralelo carregou o supercapacitor até a tensão de 3V em 643 minutos, apresentando o melhor tempo de carregamento, seguido pelo SECE com 784 minutos e a interface tradicional com 1002 minutos. Logo, é possível afirmar que a corrente na saída do conversor é determinante no tempo de carregamento do supercapacitor.

5.4 Sistemas Autônomos

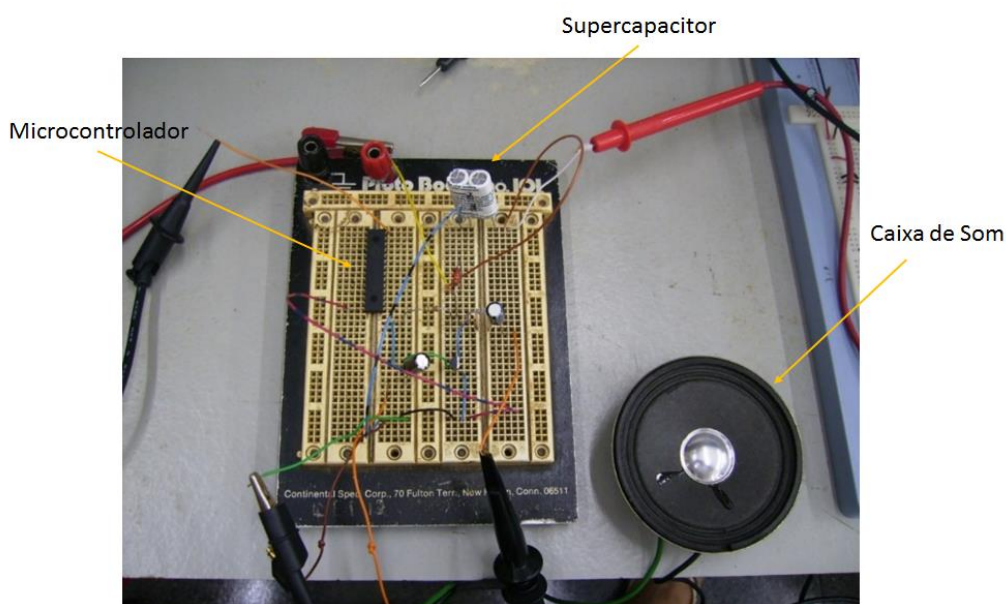
A fim de analisar a capacidade de um sistema extrator de energia alimentar uma carga microeletrônica, foram propostos dois diferentes circuitos eletrônicos para avaliar a energia acumulada no supercapacitor com carga e sistema extrator em pleno funcionamento.

Para avaliar os resultados, foram utilizados no experimento a viga fina com PZT em paralelo considerando o caso linear, o conversor SSHI em paralelo e o supercapacitor de 1,5F/5V.

O primeiro circuito eletrônico consiste de um monitorador de vibrações utilizando uma caixa de som como microfone sensível. O sistema é de baixo custo e utiliza resistências, capacitores, transistor, micro controlador e uma caixa de som de 60 ohms. Sua faixa de alimentação varia de 1,3V a 3V, e possui demanda de corrente na ordem de μA .

O sistema tem a capacidade de monitorar vibrações através da caixa de som que funciona como um microfone sensível. O micro controlador foi programado para iniciar a gravação sempre que o sinal monitorado atingir uma amplitude superior a 3Vpp (pico-pico) e de trabalhar em *sleep mode* quando sua utilização não for requisitada. A figura 62 mostra o circuito descrito, alimentado pelo supercapacitor.

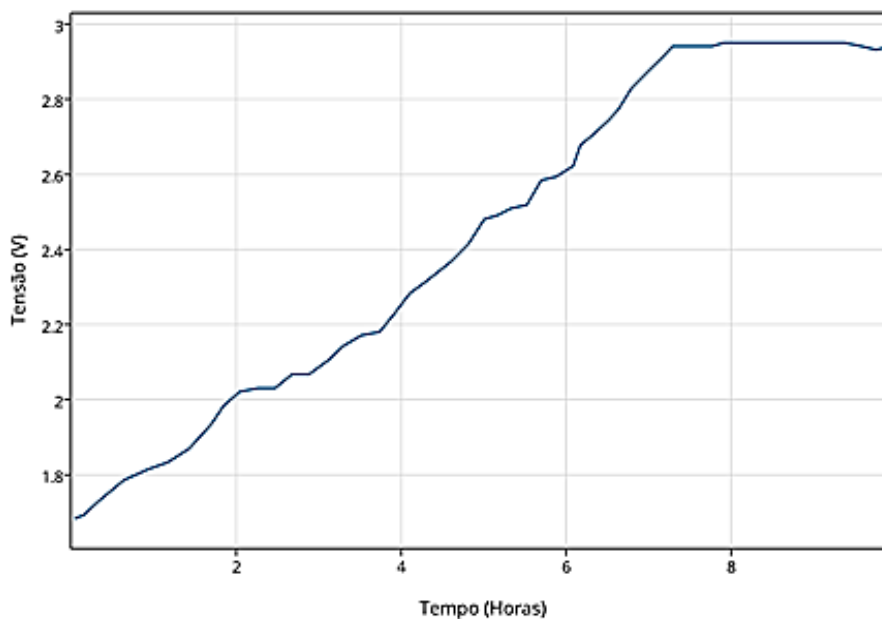
Figura 62 –Monitorador de vibrações alimentado por um supercapacitor de 1,5F e 5V.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como o sistema necessita de tensão mínima de 1,3V para operar, adotou-se essa tensão no supercapacitor como inicial. A figura 63 mostra o resultado para o sistema proposto.

Figura 63 – Tensão no supercapacitor, alimentando o circuito monitorador de vibrações.



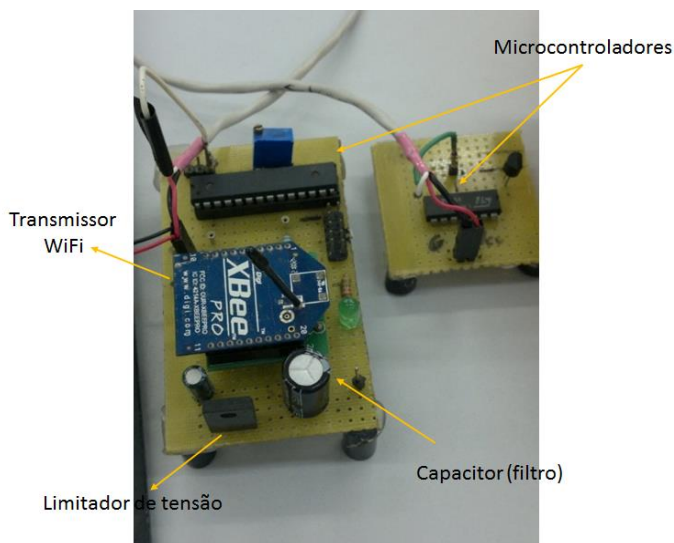
Fonte: Elaborada pelo autor.

Mesmo com o sistema todo em pleno funcionamento, o extrator de energia foi capaz de continuar carregando o supercapacitor. Na saída do supercapacitor foi utilizado um limitador de tensão de 3V, para que o sistema de monitoramento não fosse danificado.

Para aumentar os desafios referentes à alimentação de cargas acopladas aos sistemas extratores, foi proposto um segundo sistema para medir a temperatura ambiente e transmitir os dados via WiFi. Esse dispositivo é considerado um sistema autônomo e necessita de grande potência para funcionamento.

A transmissão dos dados é feita por um dispositivo de baixo custo e que necessita de baixa potência se comparado com outros disponíveis no mercado, conhecido como Xbee. A energia consumida depende da distância para transmissão dos dados, assim, adotou-se uma distância de 5 metros entre o emissor e o receptor. A figura 64 mostra o dispositivo proposto para monitorar a temperatura, utilizando o transmissor Xbee.

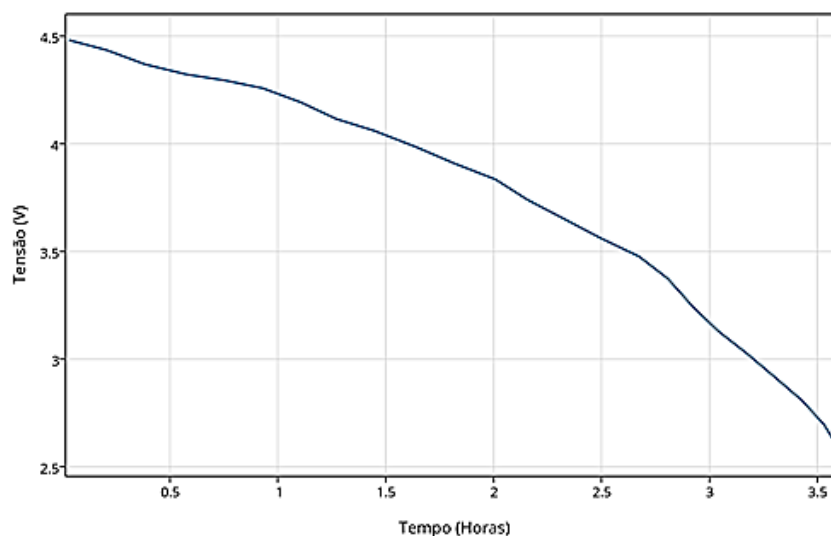
Figura 64 – Projeto sistema autônomo para análise de temperatura, com transmissão de dados via Xbee.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para reduzir ao máximo o consumo de energia do sistema, programou-se os microcontroladores para trabalhar em *sleep mode*, e todas as portas lógicas não utilizadas foram desabilitadas. Como condição inicial para análise, utilizou-se o supercapacitor carregado a 4,5V, e as medidas de temperatura foram realizadas em intervalos de 2 minutos. O sistema extrator e os sinais de excitação foram os mesmos proposto para o modelo de monitoramento de vibrações. A figura 65 mostra a tensão em relação ao tempo.

Figura 65 – Tensão no supercapacitor alimentando um sistema autônomo para análise de temperatura, com transmissão de dados via Xbee.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados mostram que o supercapacitor conseguiu alimentar a carga durante 3,5 horas, até chegar a uma tensão de 2,6V que não possibilitava mais alimentar a carga. Com os dados obtidos, observa-se que os sistemas autônomos ainda são um desafio para a utilização com sistemas extratores de energia através de vibrações mecânicas presentes no meio ambiente. Sistemas não lineares e a combinação de diversos dispositivos que trabalhem simultaneamente podem oferecer soluções viáveis para o acréscimo da potência que pode ser utilizada nos sistemas autônomos.

6 CONCLUSÃO E ETAPAS FUTURAS

O conhecimento do ambiente a ser implantado o sistema de extração, bem como o estudo do material utilizado são fundamentais para o projeto, bom funcionamento e tempo de vida útil do sistema.

O casamento de impedância é fundamental para o acoplamento eletromecânico, permitindo que o sistema trabalhe com a máxima transferência de potência e evitando sobrecargas no material piezolétrico causada pelo fluxo bidirecional de potência. A busca pela combinação ótima da impedância do sistema elétrico com o mecânico proporciona melhorias na polarização e corrente gerada pelo PZT, além de uma discreta melhora na largura de banda da frequência do sistema.

Nota-se que as vigas grossas possuem os melhores resultados. Entretanto, elas possuem frequências mais elevadas. A fim de se reproduzir e chegar o mais próximo da frequência obtida no meio ambiente e levando-se em consideração volume e viabilidade, a estrutura de viga fina em paralelo com conversor SSHI em paralelo foi a melhor opção. No caso da utilização de cargas que variem a impedância em função do tempo, a utilização do conversor SECE é a melhor opção.

A utilização do sistema biestável com o intuito de introduzir não linearidades se mostrou satisfatória, uma vez que todos os resultados (tensão, corrente e largura de banda), foram superiores ao sistema convencional linear. Neste mesmo caso, observou-se que a introdução da não linearidade no sistema está diretamente relacionado com a amplitude do sinal aplicado na base de excitação.

A utilização de circuitos eletrônicos como carga a serem alimentadas pelos extratores de energia já é uma realidade, desde que a carga consuma baixa energia. A alta potência utilizada por sistemas autônomos inviabiliza sua utilização como fonte única de alimentação, porém, com os avanços dos estudos nesse setor, eles são uma realidade próxima.

6.1 Sugestões para Etapas Futuras

Para etapas futuras propõe-se:

- I. Estudo e desenvolvimento de circuitos de extração e conversores DC-DC mais complexos, que proporcionem melhor casamento de impedância e que necessitem de baixa energia para funcionamento.
- II. Estudo minucioso da impedância da carga e da fonte para a geração de energia, além das variáveis associadas na bi estabilidade para introdução da não linearidade.
- III. Integrar o sistema de colheita de energia com o sistema de detecção de falha em estruturas (SHM), de tal forma que o piezelétrico seja alimentado pela energia que ele próprio gerou.

REFERÊNCIAS

ANDÒ, B. et al. Nonlinear mechanism in MEMS devices for energy harvesting applications. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, Bristol, v. 20, n. 12, p. 125020, 2010.

ANTAKI, J. F. et al. A gait-powered autologous battery charging system for artificial organs. **ASAIO Journal**, Philadelphia, v. 41, n. 3, p. M588-M595, 1995.

APC INTERNATIONAL. **Piezo Theory**. Disponível em: <<http://www.apcinternational.com>>. Acesso em: 27 set. 2013.

ARAKAWA, Y.; SUZUKI, Y.; KASAGI, N. Micro seismic power generator using electret polymer film. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON MICRO AND NANOTECHNOLOGY FOR POWER GENERATION AND ENERGY CONVERSION APPLICATIONS, 4, 2004, Kyoto. **Proceedings of the PowerMEMS**. Kyoto: [S:n.], p. 187 - 190, 2004. Disponível em: <http://cap.ee.ic.ac.uk/~pdm97/powermems/2004/pdfs/187_Arakawa.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2014.

BADEL, A. et al. Efficiency enhancement of a piezoelectric energy harvesting device in pulsed operation by synchronous charge inversion. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 16, n. 10, p. 889-901, 2005.

BADEL, Adrien et al. Single crystals and nonlinear process for outstanding vibration-powered electrical generators. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, New York, v. 53, n. 4, p. 673-684, 2006.

BARTON, D. A. W.; BURROW, S. .; CLARE, L. R. Energy harvesting from vibrations with a nonlinear oscillator. **Transactions of the ASME-L-Journal of Vibration and Acoustics**, New York, v. 132, n. 2, p. 021009, 2010.

BASSET, P. et al. A batch-fabricated and electret-free silicon electrostatic vibration energy harvester. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, Bristol, v. 19, n. 11, p. 115025, 2009.

BEEBY, S. P. ; TUDOR, M. J. ; WHITE, N. M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 17, n. 12, p. R175, 2006.

BEEBY, S. P. et al. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, Bristol, v. 17, n. 7, p. 1257, 2007.

BRENNAN, M. J; KOVACIC, I. **The duffing equation: nonlinear oscillators and their behaviour**. New York: John Wiley & Sons, 2011. 386 p.

CAMARA, O. F. H. **Análise de uma piezoestrutura (PZT) multifrequência para geração, extração e armazenamento de energia**. 2012. 101 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos Solos) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012. Disponível em: <

http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bis/33004099082P2/2012/camara_fho_me_ilha.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2014..

CARTWRIGHT, K. V. Non-calculus derivation of the maximum power transfer theorem. **Technology Interface**, Las Croces, v. 8, n. 2, p. 1-19, 2008. Disponível em: < http://technologyinterface.nmsu.edu/Spring08/30_Cartwright/index.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2014.

CHING, N. N. H et al. **PCB integrated micro-generator for wireless systems**. 2000. Disponível em: <http://www.ee.usyd.edu.au/people/philip.leong/UserFiles/File/papers/gen_issm00.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2014.

CHULSUNG, P.; CHOU, P. H. Ambimax: Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes. In: ON SENSOR AND AD HOC COMMUNICATIONS AND NETWORKS, 6, 2006, ON ANNUAL IEEE COMMUNICATIONS SOCIETY, 3, 2006, Reston. **Proceedings of the...** Reston: IEEE, 2006. p. 168-177.

CRAWLEY, E. F.; ANDERSON, E. H. Detailed models of piezoceramic actuation of beams. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 1, n. 1, p. 4-25, 1990.

CRAWLEY, Edward F.; DE LUIS, Javier. Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures. **AIAA journal**, Reston, v. 25, n. 10, p. 1373-1385, 1987.

CULSHAW, B.; DE VRIES, M. Smart structures and materials. **Optical Engineering**, Bellingham, v. 36, n. 2, p. 616-616, 1996.

DAI, X. et al. Energy harvesting from mechanical vibrations using multiple magnetostrictive/piezoelectric composite transducers. **Sensors and Actuators A: Physical**, Lausanne, v. 166, n. 1, p. 94-101, 2011.

DESPESE, G. et al. **High damping electrostatic system for vibration energy scavenging**. 2005. p. 283-286. Disponível em: < http://delivery.acm.org/10.1145/1110000/1107617/p283-despepe.pdf?ip=200.145.242.45&id=1107617&acc=ACTIVE%20SERVICE&key=344E943C9DC262BB.90E7F8DECCCB60F6.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&CFID=358539107&CFTOKEN=37379946&__acm__=1403003506_9a17b3067256165d287ce3d91c79effb>. Acesso em: 14 abr. 2014.

DE MARQUI, C. et al. Modeling and analysis of piezoelectric energy harvesting from aeroelastic vibrations using the doublet-lattice method. **Journal of Vibration and Acoustics**, New York, v. 133, n. 1, p. 011003, 2011.

DE MARQUI, C.; ERTURK, A.; INMAN, D. J. Piezoaeroelastic modeling and analysis of a generator wing with continuous and segmented electrodes. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 21, n. 10, p. 983-993, 2010.

DE MARQUI, C.; ERTURK, A. Electroaeroelastic analysis of airfoil-based wind energy harvesting using piezoelectric transduction and electromagnetic induction. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 24, n. 7, p. 846-854, 2013.

- DONALD, J.; LEO, D. J. Power analysis for smart material systems. In: _____.
Engineering analysis of smart material systems. Hoboken: John Wiley, 2007. .p. 511-544.
- DUTOIT, N. E.; WARDLE, B. L. Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters. **AIAA journal**, Reston, v. 45, n. 5, p. 1126-1137, 2007.
- DUTOIT, N. E.; WARDLE, B. L.; KIM, S. G. Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters. **Integrated Ferroelectrics**, Philadelphia, v. 71, n. 1, p. 121-160, 2005.
- ELVIN, N. G.; ELVIN, A. A. A general equivalent circuit model for piezoelectric generators. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 20, n. 1, p. 3-9, 2009.
- ERTURK, A.; HOFFMANN, J.; INMAN, D. J. A piezomagnetoelastic structure for broadband vibration energy harvesting. **Applied Physics Letters**, College Park, v. 94, n. 25, p. 254102-254102-3, 2009.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. A distributed parameter electromechanical model for cantilevered piezoelectric energy harvesters. **Journal of Vibration and Acoustics**, New York, v. 130, n. 4, 2008.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 18, n. 2, p. 025009, 2009.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with electromechanical coupling. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 330, n. 10, p. 2339-2353, 2011.
- ERTURK, A. **Electromechanical modeling of piezoelectric energy harvesters**. 2009. Thesis (Doctor). Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2009.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. Assumed-modes formulation of piezoelectric energy harvesters: Euler-Bernoulli, Rayleigh and Timoshenko models with axial deformations. In: BIENNIAL CONFERENCE ON ENGINEERING SYSTEMS DESIGN AND ANALYSIS, 10, 2010, [S.L.]. **Proceedings of the...** [S.L.]: American Society of Mechanical Engineers, 2010. p. 405-414.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. **Piezoelectric energy harvesting**. New York: John Wiley & Sons, 2011. 412 p.
- FANG, H. B. et al. Fabrication and performance of MEMS-based piezoelectric power generator for vibration energy harvesting. **Microelectronics Journal**, London, v. 37, n. 11, p. 1280-1284, 2006.
- FERRARI, M. et al. Improved energy harvesting from wideband vibrations by nonlinear piezoelectric converters. **Sensors and Actuators A: Physical**, Lausanne, v. 162, n. 2, p. 425-431, 2010.

FERRARI, M. et al. Modeling, fabrication and performance measurements of a piezoelectric energy converter for power harvesting in autonomous microsystems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, New York, v. 55, n. 6, p. 2096-2101, 2006.

GANDHI, M. V. **Smart materials and structures**. London: Springer, 1992. 310 p.

GASPAROTTO, G. **Síntese e caracterização da cerâmica PZT dopada com estrôncio e com nióbio e estrôncio**. 2002. Tese (Doutorado) - Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2002.

GLYNNE-JONES, P. et al. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. **Sensors and Actuators A: Physical**, Lausanne, v. 110, n. 1, p. 344-349, 2004.

GOLDFARB, M.; JONES, L. D. On the efficiency of electric power generation with piezoelectric. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, New York, v. 121, p. 566-571, 1999.

GUYOMAR, D. et al. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing. **Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on**, New York, v. 52, n. 4, p. 584-595, 2005.

HAGOOD, N. W.; CHUNG, W. H.; VON FLOTOW, A. Modelling of piezoelectric actuator dynamics for active structural control. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 1, n. 3, p. 327-354, 1990.

HARNE, R. L.; WANG, K. W. A review of the recent research on vibration energy harvesting via bistable systems. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 22, n. 2, p. 023001, 2013.

HAYT, W. H.; BUCK, J. A. **Engineering electromagnetics**. New York: McGraw-Hill, 2006. 472 p.

HONGSEOK, Y.; SHIM, M.; KIM, D. Dynamic duty-cycle scheduling schemes for energy-harvesting wireless sensor networks. **IEEE Communications Letters**, New York, v. 16, n. 2, p. 202-204, 2012.

IKEDA, T.; IKEDA, T. **Fundamentals of piezoelectricity**. Oxford: Oxford University Press, 1990. 250 p.

JACKSON, H. W. **Preston A. Introduction to electric circuits**. New York: Prentice-Hall, 1986. 563 p.

JAFFE, B. **Piezoelectric ceramics**. New York: Academic Press, 1971. 389 p.

JEON, Y. B. et al. MEMS power generator with transverse mode thin film PZT. **Sensors and Actuators A: Physical**, Lausanne, v. 122, n. 1, p. 16-22, 2005.

JUNG, S. M.; YUN, K. S. Energy-harvesting device with mechanical frequency-up conversion mechanism for increased power efficiency and wideband operation. **Applied Physics Letters**, College Park, v. 96, n. 11, p. 111906-111906-3, 2010.

KARAKASH, J. J. **Transmission lines and filter networks**. New York: Macmillan, 1950.

KARAMI, M. A.; INMAN, D. J. Equivalent damping and frequency change for linear and nonlinear hybrid vibrational energy harvesting systems. **Journal of Sound and Vibration**, v. 330, n. 23, p. 5583-5597, 2011.

KARAMI, M.; INMAN, D. J. Analytical modeling and experimental verification of the vibrations of the zigzag microstructure for energy harvesting. **Journal of Vibration and Acoustics**, New York, v. 133, n. 1, 2011.

KATZIR, S. The discovery of the piezoelectric effect. In: _____. **The beginnings of piezoelectricity**. New York: Springer Netherlands, 2006. p. 15-64.

KO, W. H. **Piezoelectric energy converter for electronic implants**. U.S. Patent n. 3,456,134, 15 jul. 1969.

KOK, S. L. et al. Bandwidth widening strategies for piezoelectric based energy harvesting from ambient vibration sources. In: ON CONFERENCE COMPUTER APPLICATIONS AND INDUSTRIAL ELECTRONICS (ICCAIE), 2011 IEEE INTERNATIONAL, 2011. p. 492-496. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=06162185>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

KOK, S. L.; WHITE, N. M.; HARRIS, N. R. Fabrication and characterization of free-standing thick-film piezoelectric cantilevers for energy harvesting. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 20, n. 12, p. 124010, 2009.

KONG, N. A. et al. Resistive impedance matching circuit for piezoelectric energy harvesting. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 21, n. 13, p. 1293-1302, 2010.

LALLART, Mickaël; ANTON, Steven R.; INMAN, Daniel J. Frequency self-tuning scheme for broadband vibration energy harvesting. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 21, n. 9, p. 897-906, 2010.

LEFEUVRE, E. et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems. **Sensors and Actuators A: Physical**, Lausanne, v. 126, n. 2, p. 405-416, 2006.

LEFEUVRE, Elie et al. Buck-boost converter for sensorless power optimization of piezoelectric energy harvester. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 22, n. 5, p. 2018-2025, 2007.

LEFEUVRE, E. et al. High-performance piezoelectric vibration energy reclamation. **Smart Structures and Materials**. International Society for Optics and Photonics, 2004. p. 379-387.

LEFEUVRE, E. et al. Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 16, n. 10, p. 865-876, 2005.

LESIEUTRE, G. A.; OTTMAN, G. K.; HOFMANN, H. F. Damping as a result of piezoelectric energy harvesting. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 269, n. 3, p. 991-1001, 2004.

LI, W. J. A micromachined vibration-induced power generator for low power sensors of robotic systems. In: WORLD AUTOMATION CONGRESS INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROBOTICS WITH APPLICATIONS, 8, 2000, Maui. **World Congress...**Maui: Isora, 2000. Disponível em: <http://www.ee.usyd.edu.au/people/philip.leong/UserFiles/File/papers/gen_wac00.pdf>. Acesso em: 12 maio 2014.

LIN, J. T.; ALPHENAAR, B. Enhancement of energy harvested from a random vibration source by magnetic coupling of a piezoelectric cantilever. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 21, n. 13, p. 1337-1341, 2010.

LOPES JR, V.; STEFFEN JR, V.; INMAN, D. J. Optimal placement of piezoelectric sensor/actuators for smart structures vibration control. **Dynamical systems and control (stability and control)**, New York, v. 22, n. pt. 2, p. 221-236, 2004.

LUZ, A. B. et al. **Pegmatitos do nordeste: diagnóstico sobre o aproveitamento racional e integrado-série rochas e minerais industriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2003. 79 p.(Série, 9)

MANN, B. P.; SIMS, N. D. Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 319, n. 1, p. 515-530, 2009.

MATEU, L.; MOLL, F. Optimum piezoelectric bending beam structures for energy harvesting using shoe inserts. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 16, n. 10, p. 835-845, 2005.

MCCONNELL, K. G.; VAROTO, P. S. **Vibration testing: theory and practice**. New York: Wiley, 2008. 672 p.

MIAO, P. et al. MEMS inertial power generators for biomedical applications. **Microsystem Technologies**, Heidelberg, v. 12, n. 10-11, p. 1079-1083, 2006.

MIZUNO, M.; CHETWYND, D. G. Investigation of a resonance microgenerator. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, Bristol, v. 13, n. 2, p. 209, 2003.

NATAL, G. S. **Nanoposicionamento de precisão por controle adaptativo binário de atuadores piezoelétricos**. 2008. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NECHIBVUTE, A. et al. Piezoelectric energy harvesting using synchronized switching techniques. **International Journal of Engineering and Technology**, Vandalur, v. 2, n. 6, p. 936-946, 2012. Disponível em: <http://iet-journals.org/archive/2012/june_vol_2_no_6/3515471327649632.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2014.

NG, T. H.; LIAO, W. H. Sensitivity analysis and energy harvesting for a self-powered piezoelectric sensor. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 16, n. 10, p. 785-797, 2005.

NIYATO, D. et al. Wireless sensor networks with energy harvesting technologies: a game-theoretic approach to optimal energy management. **IEEE Wireless Communications**, New York, v. 14, n. 4, p. 90-96, 2007.

OTTMAN, G. K. et al. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 17, n. 5, p. 669-676, 2002.

OTTMAN, G. K.; HOFMANN, H. F.; LESIEUTRE, G. A. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode. **IEEE Transactions on Power Electronics**, New York, v. 18, n. 2, p. 696-703, 2003.

PEREIRA, A. H. A. **Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades**. 2010. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br>> Acesso em: 15 set. 2013.

PHILLIP, S. T. **Dynamo-electric machinery: a manual for students of electrotechnics**. American technical book Company, 1901. Disponível em: <<https://ia600200.us.archive.org/8/items/dynamoelectricma00thomrich/dynamoelectricma00thomrich.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2014.

PIEZO COMPANY. Disponível em: <<http://www.piezo.com/tech2intropiezotrans.html>>. Acesso em: 27 set. 2013.

REILLY, E.; WRIGHT, P. Thin film piezoelectric energy scavenging systems for an on-chip power supply. In: PROCEEDING OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER MEMS, 4, 2006, Berkeley, 2006. **Proceedings of the...** Berkeley: [S.n.], 2006. 4 p. Disponível em: <<http://cap.ee.ic.ac.uk/~pdm97/powermems/2006/pdfs/161-164%20P29%20Reilly.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2014.

RICHARD, C. et al. Semi-passive damping using continuous switching of a piezoelectric device. In: SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS, 1999, Newport Beach. **Proceedings of the...** Newport Beach: International Society for Optics and Photonics, 1999. p. 104-111.

ROSANA, G.; AMARAL, J. **Processos industriais que utilizam corrente contínua, piezoeletricidade**. 2007. 15 f. Pesqueira: Uned, 2007. (Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco - Curso Técnico em Eletrotécnica Disciplina: Eletrônica Básica)

ROUNDY, S. et al. Improving power output for vibration-based energy scavengers. **IEEE Pervasive Computing**, New York, v. 4, n. 1, p. 28-36, 2005.

ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. **Smart Materials and Structures**, New York, v. 13, n. 5, p. 1131, 2004.

ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K.; RABAEY, J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. **Computer Communications**, Amsterdam, v. 26, n. 11, p. 1131-1144, 2003.

ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K.; RABAEY, J. M. **Energy scavenging for wireless sensor networks: with special focus on vibrations**. Norwell: Springer, 2004. 212 p.

SMITS, Jan G.; CHOI, Wai-shing. The constituent equations of piezoelectric heterogeneous bimorphs. **IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 38, n. 3, p. 256-270, 1991.

SMITS, Jan G.; DALKE, Susan I.; COONEY, Thomas K. The constituent equations of piezoelectric bimorphs. **Sensors and Actuators A: Physical**, Lausanne, v. 28, n. 1, p. 41-61, 1991.

SNELLER, A. J.; OWENS, B. A.; MANN, B. P. Experimental investigations of a bistable energy harvester. **Structural Dynamics and Renewable Energy**, New York, v. 1, p. 211-217, 2011.

SODANO, H. et al. Electric power generation using piezoelectric devices. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADAPTIVE STRUCTURES AND TECHNOLOGIES, 13, 2002, Nanjing. **Proceedings of the...** Nanjing: [S.n.], 2002. p. 7-9.

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

SODANO, H. A.; PARK, G.; INMAN, D. J. Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting. **Strain**, London, v. 40, n. 2, p. 49-58, 2004.

STANDARDS COMMITTEE OF THE IEEE ULTRASONICS, **Ferroelectrics, and Frequency Control Society IEEE Standard on Piezoelectricity**. New York: IEEE, 1987

STANTON, S. C.; MANN, B. P.; OWENS, B. A. M. Melnikov theoretic methods for characterizing the dynamics of the bistable piezoelectric inertial generator in complex spectral environments. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, Amsterdam, v. 241, n. 6, p. 711-720, 2012.

STANTON, S. C.; MCGEHEE, C. C.; MANN, B. P. Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting: Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, Amsterdam, v. 239, n. 10, p. 640-653, 2010.

STANTON, S. C.; OWENS, B. A. M.; MANN, B. P. Harmonic balance analysis of the bistable piezoelectric inertial generator. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 331, n. 15, p. 3617-3627, 2012.

STARNER, T. Human-powered wearable computing. **IBM systems Journal**, New York, v. 35, n. 3.4, p. 618-629, 1996.

STOJCEV, M. K.; KOSANOVIC, M. R.; GOLUBOVIC, L. R. Power management and energy harvesting techniques for wireless sensor nodes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TELECOMMUNICATION IN MODERN SATELLITE, CABLE, AND BROADCASTING SERVICES, TELSIS'09, 9, 2009, Nis. **Proceedings of the...** Nis: IEEE, 2009. p. 65-72. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5339410>>. Acesso em: 12 mar. 2014.

SUSLICK, K. S. The chemical effects of ultrasound. **Scientific American**, New York, v. 260, n. 2, p. 80-86, 1989.

TABESH, A.; FRÉCHETTE, L. G. A low-power stand-alone adaptive circuit for harvesting energy from a piezoelectric micropower generator. **IEEE Transaction on Industrial Electronics**, New York, v. 57, n. 3, p. 840-849, 2010.

TACCA, M.; MONTI, P.; FUMAGALLI, A. Cooperative and reliable ARQ protocols for energy harvesting wireless sensor nodes. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, Piscataway, v. 6, n. 7, p. 2519-2529, 2007.

TANAKA, H. et al. Electric power generation using piezoelectric resonator for power-free sensor node. In: PROCEEDINGS OF THE CUSTOM INTEGRATED CIRCUITS CONFERENCE, 2005. **Proceedings of the...** [S.l.]: IEEE, 2005. p. 97-100. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1568617>>. Acesso em: 12 jan. 2014.

TANG, L.; YANG, Y.; SOH, C. K. Toward broadband vibration-based energy harvesting. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 21, n. 18, p. 1867-1897, 2010.

TANG, L.; YANG, Y.; SOH, C. K. Improving functionality of vibration energy harvesters using magnets. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 23, n. 13, p. 1433-1449, 2012.

TASHIRO, R. et al. Development of an electrostatic generator for a cardiac pacemaker that harnesses the ventricular wall motion. **Journal of Artificial Organs**, Kudan-Kita, v. 5, n. 4, p. 0239-0245, 2002.

TIMOSHENKO, S. P. On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, Oxfordshire, v. 41, n. 245, p. 744-746, 1921.

TORAH, R. et al. Self-powered autonomous wireless sensor node using vibration energy harvesting. **Measurement Science and Technology**, Bristol, v. 19, n. 12, p. 125202, 2008.

TORRES, E. O.; RINCÓN-MORA, G. A. Electrostatic energy-harvesting and battery-charging CMOS system prototype. **IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers**, New York, v. 56, n. 9, p. 1938-1948, 2009.

TURNER, J. A. **A new approach to wide bandwidth energy harvesting for piezoelectric cantilever based harvesters**. 2012. Thesis (Doctor) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2012.

UMEDA, M.; NAKAMURA, K.; UEHA, S. Analysis of the transformation of mechanical impact energy to electric energy using piezoelectric vibrator. **Japanese Journal of Applied Physics**, Tokyo, v. 35, n. 5, p. 3267-3273, 1996.

UMEDA, M.; NAKAMURA, K.; UEHA, S. Energy storage characteristics of a piezo-generator using impact induced vibration. **Japanese Journal of Applied Physics**, Tokyo, v. 36, n. 1, p. 3146-3151, 1997.

VOCCA, H. et al. Kinetic energy harvesting with bistable oscillators. **Applied Energy**, Oxford, v. 97, p. 771-776, 2012.

WILLIAMS, C. B. et al. Development of an electromagnetic micro-generator. In: IEE PROCEEDINGS CIRCUITS, DEVICES AND SYSTEMS, 2001. **Proceedings of the...** [S.l.:S.n.], 2001. p. 337-342. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=980773>>. Acesso em: 12 mar. 2014.

WILLIAMS, C. B.; YATES, R. B. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. **Sensors and Actuators A: Physical**, Lausanne, v. 52, n. 1, p. 8-11, 1996.

ZHANG, Q. M. et al. Change of the weak-field properties of Pb (ZrTi) O₃ piezoceramics with compressive uniaxial stresses and its links to the effect of dopants on the stability of the polarizations in the materials. **Journal of Materials Research**, New York, v. 12, n. 1, p. 226-234, 1997.

ZHOU, S. et al. Enhanced broadband piezoelectric energy harvesting using rotatable magnets. **Applied Physics Letters**, College Park, v. 102, n. 17, p. 173901-173901-4, 2013.