

Paulo Afonso Ferreira Junior

**Caracterização de transdutores piezelétricos
de baixo custo para aplicações de Colheita
de Energia**

Brasil

Dezembro de 2020

Paulo Afonso Ferreira Junior

**Caracterização de transdutores piezelétricos de baixo
custo para aplicações de Colheita de Energia**

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Faculdade de Engenharia de Bauru

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Souza Campos

Coorientador: Prof. Dr. José Alfredo Covolan Ulson

Brasil

Dezembro de 2020

Junior, Paulo Afonso Ferreira.

Caracterização de transdutores piezelétricos de baixo custo para aplicações de Colheita de Energia / Paulo Afonso Ferreira Junior, 2020
86 f. : il.

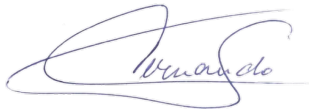
Orientador: Fernando de Souza Campos

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2020.

1. Colheita de Energia. 2. Transdutores Piezelétricos. 3. Cantilever. 4. Conversor CA-CC. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PAULO AFONSO FERREIRA JUNIOR, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 dias do mês de dezembro do ano de 2020, às 10:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PAULO AFONSO FERREIRA JUNIOR, intitulada **CARACTERIZAÇÃO DE TRANSDUTORES PIEZELÉTRICOS DE BAIXO CUSTO PARA APLICAÇÕES DE COLHEITA DE ENERGIA**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. FERNANDO DE SOUZA CAMPOS (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. FABRÍCIO GUIMARÃES BAPTISTA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Professor Doutor DIB KARAM JUNIOR (Participação Virtual) do(a) EACH / UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado _ _ _ _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. FERNANDO DE SOUZA CAMPOS

*Dedico à minha família, minha esposa Raquel Izzo Martignoni Ferreira e meus filhos
Bernardo e Arthur*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado forças e ter me ajudado até aqui.

Agradeço a meu orientador, professor Fernando Campos de Souza e ao meu coorientador José Alfredo Covolan Ulson, pela ajuda e atenção desde o começo da jornada.

Agradeço a todo o pessoal da Escola Técnica Waldyr Duron Junior, em especial aos professores do departamento de Elétrica, na pessoa dos coordenadores Thiago Xavier e Reinaldo Melício, pelo incentivo e colaboração ao trabalho.

Agradeço a meus amigos, Jairo Giacomini, e Marcelo Takami, pelas conversas, dicas e pelos momentos de descontração total.

Agradeço a toda minha família, em especial a minha mãe Darci, meu pai Paulo e minha irmã Társis, pelo apoio e carinho durante todo tempo.

Agradeço também a minha esposa Raquel e meus filhos Bernardo e Arthur, pelo amor, carinho e pela compreensão nos momentos complicados que passamos juntos.

Agradeço a Faculdade de Engenharia de Bauru, com todos os seus Professores, Técnicos e demais funcionários que me permitiram a chegar a essa importante etapa.

“Procure ser um homem de valor, em vez de ser um homem de sucesso.”
(Albert Einstein)

RESUMO

O campo de engenharia de coleta ou captação de energia, constitui uma área promissora para fornecer energia elétrica para aplicações elétricas de baixa potência obtidas de outras fontes de energia disponíveis no ambiente como: térmica, eletromagnética, vibracional e acústica, usando transdutores. As fontes vibracionais se destacam como a principal alternativa a ser utilizada na geração de energia elétrica para sensores e dispositivos microeletrônicos, devido à maior eficiência de conversão de energia e ao uso de uma estrutura simples. O cantilever é o principal sistema implementado nos estudos de obtenção de energia elétrica a partir de vibrações usando transdutores piezelétricos. A maioria dos transdutores piezelétricos na literatura ainda não estão disponíveis comercialmente e/ou é de difícil acesso para compra e uso. Este trabalho propõe a caracterização de transdutores piezelétricos de baixo custo, configurados como sensores, para aplicações de coleta de energia utilizando três tamanhos diferentes de diafragmas piezelétricos circulares, 10 mm, 20 mm e 25 mm de diâmetro. Para os três sensores piezelétricos diferentes, verificou-se que a máxima transferência de potência ocorre para uma carga resistiva de $150\text{ k}\Omega$. A potência máxima gerada na carga para os três sensores foi de $9,81\text{ }\mu\text{W}$, $2,79\text{ }\mu\text{W}$ e $132\text{ }\mu\text{W}$, tensões máximas geradas de $3,08\text{ V}$, $1,6\text{ V}$ e $9,3\text{ V}$, com aceleração de $1g$ e operando nas suas respectivas frequências de vibração, $32,1\text{ Hz}$, $17,7\text{ Hz}$ e 23 Hz , para o transdutor de 10, 20 e 25 mm. O conversor CA-CC é composto por um retificador seguido por uma topologia de impulso CC-CC. O controle do *loop* de corrente de entrada permite configurar a referência como uma forma de onda retificada senoidal, emulando uma carga resistiva ao transdutor piezelétrico. Dessa maneira, pode-se emular uma carga resistiva ideal para o casamento de impedância e, conseqüentemente a máxima transferência de potência para a carga. Para validação, foram realizadas simulações utilizando o modelo elétrico piezelétrico e o conversor CA-CC com controle de *loop* de corrente de entrada. De acordo com as simulações, o nível de tensão interno é ajustado em 10 V , a impedância série em $150\text{ k}\Omega$ e o valor de referência da corrente de entrada fixado em $5\text{ V}/150\text{ k}\Omega$. Definindo a queda de tensão nos diodos de $0,7\text{ V}$, a potência de saída simulada é de $113,5\text{ }\mu\text{W}$ ou 86% da máxima transferência de potência com carga resistiva ideal. A queda de tensão nos diodos do retificador é a principal causa de perda de energia. Reduzindo para $0,1\text{ V}$ a tensão de queda nos diodos, a potência de saída simulada aumenta para $120\text{ }\mu\text{W}$ ou 90,9% da máxima transferência de potência com carga resistiva ideal.

Palavras-chave: Colheita de Energia, Transdutores Piezelétricos, Cantilever, Conversor CA-CC, Máxima Transferência de Potência.

ABSTRACT

The field of Energy Harvesting is a promising area for supplying electrical energy for low power electrical applications, obtained from other energy sources available in the environment, such as thermal, electromagnetic, vibrational and acoustic using transducers. As vibrational sources, they are highlighted as the main alternative to be used in the generation of electrical energy for sensors and microelectronic devices, due to the higher energy conversion rate and the use of a simple structure. The cantilever is the main system implemented in studies on the use of electrical energy from vibrations using piezoelectric transducers. Most piezoelectric transducers in the literature are not yet commercially available and / or difficult to access for purchase and use. This work describes the characterization of low-cost piezoelectric transducers, configured as sensors, for energy harvesting applications that use three different diameter sizes of piezoelectric circular diaphragms like 10 mm, 20 mm and 25 mm. For three different piezoelectric transducers, it was found that the maximum power transfer occurs for a resistive load of 150 k Ω . The maximum power generated in the load for three transducers was 9,81 μW , 2,79 μW and 132 μW , maximum generated voltages of 3,08 V, 1,6 V e 9,3 V, with acceleration of 1g and operating at their vibration frequencies, 32,1 Hz, 17,7 Hz and 23 Hz, for 10, 20 and 25 mm piezoelectric transducers. The AC-DC converter consists of a rectifier followed by a DC-DC pulse topology. The control of the loop of the input current allows configuring a reference as a rectified sinusoidal waveform, emulating a load resistant to the piezoelectric transducer. In this way, it is possible to emulate a resistant load ideal for the impedance matching and, consequently, the maximum transfer of power to the load. For validation, simulations were performed using the piezoelectric electric model and the AC-DC converter with loop control of the input current. According to the simulations, the internal voltage level is set at 10V, an impedance series at 150 k Ω and the setpoint input current set at 5 V/150 k Ω . Setting the voltage drop on the diodes at 0,7 V, the simulated output power is 113,5 μW or 86% of the maximum power transfer with ideal resistive load. The voltage drop in the rectifier diodes is the main cause of energy loss. By reducing the drop voltage on the diodes to 0,1 V, the simulated output power increases to 120 μW or 90,9% of the maximum power transfer with optimal resistive load.

Keywords: Energy Harvesting, Piezoelectric Transducers, Cantilever, AC-DC Converter, Maximum Power Transfer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Publicações sobre <i>Energy Harvesting</i> de 1990 a 2015	22
Figura 1.2 – Sistema de <i>Energy Harvesting</i> piezelétrico	23
Figura 1.3 – Componentes típicos em um sistema de <i>Energy Harvesting</i> com vibrações mecânicas	23
Figura 2.1 – Ilustração da forma reduzida da direção do tensor	26
Figura 2.2 – Rotação dos dipolos na presença do campo elétrico	26
Figura 2.3 – Espectro da impedância de um sistema <i>EH</i> típico	30
Figura 2.4 – Representação do deslocamento iônico na célula de perovskita $BaTiO_3$	32
Figura 3.1 – Estrutura básica Cantilever	33
Figura 3.2 – Diafragma piezelétrico e seus parâmetros	34
Figura 3.3 – Vibração do diafragma piezelétrico	34
Figura 3.4 – Estrutura do diafragma piezelétrico	35
Figura 3.5 – PEH utilizando força magnética	36
Figura 3.6 – Vista do corte transversal do dispositivo utilizando nanotubos piezelétricos	37
Figura 3.7 – Dispositivo de EH utilizando nanofios piezelétricos alinhados	37
Figura 3.8 – Nanofitas piezelétricas flexíveis em um substrato de PDMS	38
Figura 3.9 – Nanogerador utilizando nanofibras piezelétricas	38
Figura 3.10–Dispositivo formado por nanopartículas piezelétricas	39
Figura 3.11–Dispositivo <i>Energy Harvester</i> transparente e flexível utilizando filmes finos piezelétricos.	39
Figura 3.12–Primeiro MEMS piezelétrico <i>Energy Harvester</i> produzido e caracterizado	40
Figura 3.13–MEMS piezelétrico produzido em metal flexível	41
Figura 3.14–Sistema EH eólico - moinho de vento	42
Figura 3.15–Sistema EH submerso na água	43
Figura 3.16–Sapatos com dispositivo EH piezelétrico	44
Figura 3.17–Dispositivo EH piezelétrico implantável de joelho	45
Figura 3.18–Dispositivo de filme PVDF flexível na veia aorta ascendente do coração	45
Figura 3.19–Sistema de captação de energia em aves	46
Figura 3.20–Sistema de captação de energia nos pneus dos veículos	47
Figura 4.1 – Estrutura cantilever	48
Figura 4.2 – Estrutura cantilever modelo massa-mola-amortecedor	49
Figura 4.3 – Comportamento do sistema em ressonância	51
Figura 5.1 – Circuito adaptativo de baixo consumo	54
Figura 5.2 – Retificador de onda completa em ponte	56

Figura 5.3 – Dispositivo não linear e formas de onda típicas de tensão, deslocamento e velocidade sem carga.	56
Figura 5.4 – Circuito SSHI-MR	57
Figura 5.5 – Circuito SSHI Híbrido	57
Figura 5.6 – Circuito SSHI em paralelo	59
Figura 5.7 – Circuito SSHI em série	59
Figura 5.8 – Circuito SECE	60
Figura 5.9 – Circuito DSSH	61
Figura 5.10–Conversor CA-CC <i>Boost</i>	62
Figura 5.11–Principais formas de onda da corrente de entrada e das referências superior e inferior do sinais de controle por histerese	62
Figura 5.12–Circuito de geração de sinal de referência	63
Figura 6.1 – Fluxograma do sistema utilizado nos experimentos	64
Figura 6.2 – Sistema utilizado nos experimentos	65
Figura 6.3 – Barras utilizadas nos experimentos	65
Figura 6.4 – Transdutores piezelétricos de 10, 20 e 25mm de diâmetro útil	66
Figura 6.5 – Frequência de ressonância para o transdutor de 10 mm simulada no <i>ANSYS</i>	66
Figura 6.6 – Frequência de ressonância para o transdutor de 20mm simulada no <i>ANSYS</i>	67
Figura 6.7 – Frequência de ressonância para o transdutor de 25 mm simulada no <i>ANSYS</i>	67
Figura 6.8 – Simulação do circuito proposto	68
Figura 6.9 – Correntes de entrada e de referência para $V_D = 0,7 V$	69
Figura 7.1 – Frequência de ressonância para os 3 transdutores	70
Figura 7.2 – Tensão de Pico gerada nos 3 transdutores piezelétricos	71
Figura 7.3 – Potência Elétrica gerada nos 3 transdutores	71
Figura 7.4 – Densidade de área dos 3 transdutores	72
Figura 7.5 – Potência gerada por unidade de área	73
Figura 7.6 – Área relativa dos 3 transdutores	73
Figura 7.7 – Densidade volumétrica dos 3 transdutores	74
Figura 7.8 – Potência gerada por unidade de volume	74
Figura 7.9 – Volume relativo dos 3 transdutores	75
Figura 7.10–Correntes de entrada e de referência para $V_D = 0,1 V$	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Aceleração e frequência das fontes de vibração no ambiente.	22
Tabela 6.1 – Condições da estrutura Cantilever para simulações e experimentos práticos	65
Tabela 6.2 – Frequências de ressonância obtidas utilizando as simulações no <i>Ansys</i> .	68
Tabela 7.1 – Frequências de ressonância obtidas através de simulações no <i>Ansys</i> e experimentalmente com as barras	70
Tabela 7.2 – Comparação de dispositivos ressonantes	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	PIEZELETRICIDADE NOS MATERIAIS	25
2.1	Efeito Piezelétrico	25
2.2	Coefficientes Piezelétricos	25
2.2.1	Coefficiente Elástico	25
2.2.2	Coefficiente Dielétrico	26
2.2.3	Coefficiente Piezelétrico	27
2.2.4	Fator de acoplamento Eletromecânico	28
2.2.5	Fator de qualidade mecânica	29
2.2.6	Coefficientes complexos	29
2.3	Cerâmica Piezelétrica	31
3	TIPOS DE <i>ENERGY HARVESTERS</i>	33
3.1	Cantilever	33
3.2	Diafragma	34
3.3	Magnético	35
3.4	Flexíveis	36
3.4.1	Nanotubos	36
3.4.2	Nanotrilhos e Nanofios	37
3.4.3	Nanofibras	38
3.4.4	Nanopartículas	38
3.4.5	Filmes finos	39
3.5	MEMS	40
3.6	Aplicações	41
4	CANTILEVER BEAM	48
4.1	Estrutura	48
4.2	Equações características	49
5	CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAL	53
5.1	Casamento de impedâncias	53
5.2	Chaveamento Sincronizado (<i>Synchronous Switching</i>)	55
5.2.1	Retificador de onda completa em ponte	55
5.2.2	SSHI - <i>Synchronous Switch Harvesting on Inductor</i>	56
5.2.2.1	SSHI em paralelo	58

5.2.2.2	SSHI em série	59
5.2.3	SECE	60
5.3	Circuito Proposto	61
6	MATERIAIS E MÉTODOS	64
6.1	Simulação Barras	66
6.2	Simulação Circuito	68
7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
8	CONCLUSÃO	77
8.1	Trabalhos Publicados durante o Mestrado	77
	REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, um alto grau de integração da eletrônica de baixa potência tem sido utilizado em diversas aplicações como rede de sensores sem fio, equipamentos eletrônicos portáteis, eletrônica embutida em roupas e dispositivos biomédicos como próteses e marcapassos. Uma forma de aumentar a vida útil desses dispositivos eletrônicos sem a troca de bateria é utilizar transdutores que geram energia elétrica a partir de outras fontes de energia presentes no meio ambiente como energia térmica, eletromagnética e mecânica vibracional e acústica.

Esta técnica é conhecida como *Energy Harvesting* (EH) ou captação de energia e pode ser definida como a transformação direta da energia do ambiente, seja ela mecânica, solar, térmica, provinda do vento, de fluxo de algum fluido, ou outro, à energia elétrica usando um material ou um mecanismo de transdução. (SAFAEI; SODANO; ANTON, 2019)

Uma das principais formas de gerar energia elétrica utilizando esta técnica é a captação de energia com material piezelétrico, que usa uma conversão de energia provinda de vibrações e deformações mecânicas para a elétrica.

Esta fonte tem se mostrado promissora na geração de energia elétrica em dispositivos eletrônicos como nos sensores, dispositivos microeletrônicos de baixa potência devido à maior eficiência na conversão de energia e na utilização de estruturas simples. (KANG et al., 2016)

Segundo Maiwa (2016), combinados com uma eletrônica adequada, os dispositivos EH podem ser usados na criação de um sistema de fornecimento de energia auto-suficiente, substituindo e/ou suplementando as baterias de dispositivos e sensores em ambientes remotos de baixa potência, minimizando despesas financeiras com diversas substituições das baterias.

Na última década, o campo da EH tornou-se cada vez mais importante, mais e mais estudos têm sido realizados sobre este tema, conforme ilustrado no número de publicações na Figura 1.1.

Os diversos tipos de energias disponíveis no ambiente que podem ser utilizadas em EH, incluem energia solar, energia térmica, energia eólica, gradientes de salinidade e energia cinética. Em aplicações em ambientes abertos, a energia solar apresenta grande potencial, porém, não é fácil capturar uma quantidade adequada de energia para aplicações em ambientes cobertos e fechados, e de acordo com Roundy (2005), a alternativa mais viável é a captação de energia através de vibrações mecânicas.

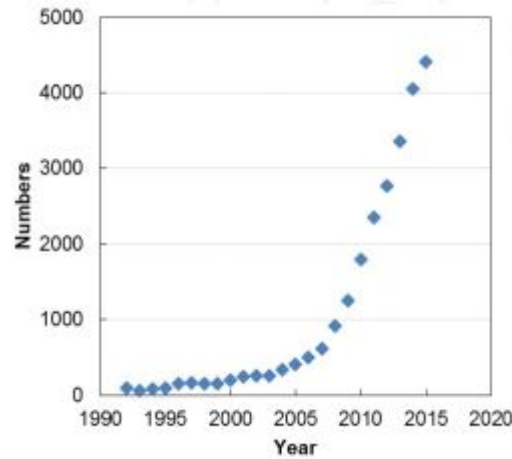


Figura 1.1 – Publicações sobre *Energy Harvesting* de 1990 a 2015 (MAIWA, 2016)

Como já mencionado, essa energia elétrica proveniente das vibrações mecânicas do ambiente, são comumente utilizados em módulos de redes de sensores, já que a maioria dos sensores trabalham sem fios, permanecem conectados apenas as fontes de energia, ou seja, as baterias, que dependendo da aplicação podem ser substituídas ou apenas carregadas pelo dispositivo de EH, reduzindo assim a dependência das baterias, aumentando a vida útil da mesma, mantendo e até mesmo aumentando a funcionalidade do sensor, reduzindo perdas e gastando pouco para isso. (Pozo et al., 2019)

Lembrando que para utilização de um sistema EH utilizando vibrações mecânicas, as frequências a serem captadas no meio ambientes estão praticamente todas abaixo de 200 Hz, frequências presentes em utensílios, objetos e ferramentas utilizadas no dia a dia, conforme mostrado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Aceleração e frequência das fontes de vibração no ambiente.

Origem das vibrações	Aceleração (m/s^2)	Frequência (Hz)
Batedeira	6,4	121
Secadora de Roupas	3,5	121
Forno Elétrico pequeno	2,25	121
Exaustão de ar em Edifícios	0,2 - 1,5	60
Janela de frente para uma rua movimentada	0,7	100
Máquina de Lavar Roupas	0,7	109
Geladeira	0,1	241

Adaptado de Maiwa (2016)

Segundo Kheng e Kumar (2010), um sistema básico de EH é composto por três elementos: o elemento de captação de energia, um sistema de gerenciamento de baixa potência e um sistema de armazenamento também de baixa potência, conforme proposto também por Kwon e Rincon-Mora (2009) e apresentado na Figura 1.2.

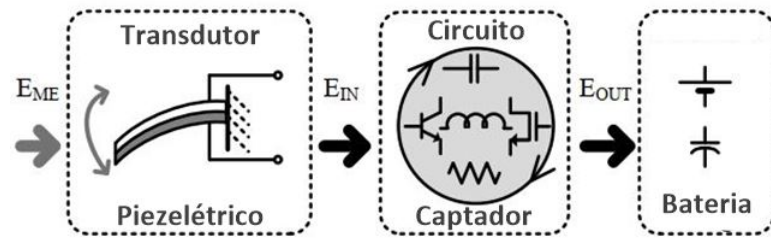


Figura 1.2 – Sistema de *Energy Harvesting* piezelétrico
Adaptado de Kwon e Rincon-Mora (2009)

O processo de EH começa com a captação da energia do ambiente pelo elemento de captação, transdutor piezelétrico, o sistema de gerenciamento compatibiliza o nível de tensão para que possa ser utilizado, isso da maneira mais eficiente possível, e por fim, eventualmente, o sistema de armazenamento recebe e armazena a energia excedente da captação. Apresenta-se na Figura 1.3 os componentes típicos de um sistema de EH a partir de vibrações presentes no ambiente.



Figura 1.3 – Componentes típicos em um sistema de *Energy Harvesting* com vibrações mecânicas

Adaptado de Maiwa (2016)

Neste sentido, o presente trabalho tem como principal objetivo a caracterização de sensores piezelétricos de baixo custo para aplicações de Colheita de Energia, utilizando a estrutura cantilever e propondo um circuito de condicionamento de alta eficiência, um conversor CA-CC que funciona com alto fator de potência e controle de corrente por histerese.

Esta dissertação está estruturada conforme descrito a seguir. No Capítulo 1 são apresentados os conceitos relacionados a sistemas *Energy Harvesting* (EH). No Capítulo 2 é apresentado o efeito piezelétrico e os principais materiais com essa característica e os respectivos coeficientes. Os principais métodos de EH e algumas aplicações são apresentados no Capítulo 3.

No Capítulo 4 é apresentado especificamente o sistema EH utilizado no trabalho que é a estrutura cantilever. Os circuitos e métodos existentes de condicionamento de sinal e o circuito proposto no trabalho são mostrados no Capítulo 5. No Capítulo 6 são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados das simulações realizadas no software

ANSYS, os experimentos práticos realizados em bancada e os cálculos realizados com o auxílio do software *MATLAB*, comparando-os. Por fim, as principais conclusões desta dissertação são apresentadas no Capítulo 8.

2 PIEZELETRICIDADE NOS MATERIAIS

Esta seção apresenta os diversos materiais e suas características piezelétricas que serão utilizadas em aplicações de EH.

2.1 Efeito Piezelétrico

Efeito piezelétrico ou piezeletricidade é a propriedade que alguns materiais possuem que ao serem comprimidos, pressionados, acabam gerando uma diferença de potencial em seus terminais, e o inverso também ocorre, se esse mesmo material for submetido a uma diferença de potencial em seus terminais, este por sua vez se deforma.

Este fenômeno foi observado em 1880 por Jacques Curie e Pierre Curie, sendo denominado de efeito piezelétrico direto e reverso ou indireto, respectivamente. Neste trabalho trataremos exclusivamente do efeito direto com aplicações em *Energy Harvesting*.

2.2 Coeficientes Piezelétricos

Para aprofundar no estudo com piezeletricidade, que de maneira simples é oriunda do acoplamento entre o processo mecânico, vibração do material, e o processo elétrico, na geração de energia elétrica, se faz necessário o conhecimento sobre os coeficientes tanto mecânicos quanto elétricos deste processo, que são apresentados nesta seção.

2.2.1 Coeficiente Elástico

Segundo a Lei de Hooke, a constante de rigidez elástica c e a constante de conformidade elástica s do material são apresentadas abaixo:

$$T_i = c_{ij}S_j \quad (2.1)$$

$$S_i = s_{ij}T_i \quad (2.2)$$

Sendo que T é a tensão aplicada e S é a deformação do material. As unidades de c e s são respectivamente (N/m^2) e (m^2/N) . Os subscritos i, j de cada constante indicam a direção desse elemento considerando a natureza anisotrópica do material. Simplificando os subscritos de acordo com Nye (1985), e como os elementos do tensor são contratados para números que vão de 1 a 6, onde 1, 2, 3 designam as direções do estresse normal e 4, 5, 6

representam as direções de tensão de cisalhamento conforme apresentado na Figura 2.1, a regra de substituição é mostrada na matriz abaixo:

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_6 & T_5 \\ T_6 & T_2 & T_4 \\ T_5 & T_4 & T_3 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 & S_6/2 & S_5/2 \\ S_6//2 & S_2 & S_4/2 \\ S_5/2 & S_4/2 & T_3 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

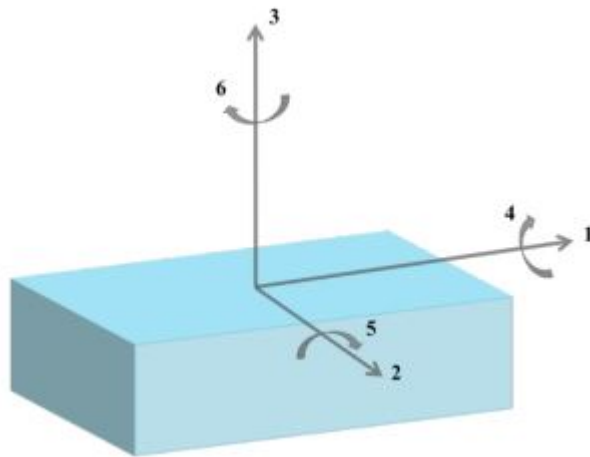


Figura 2.1 – Ilustração da forma reduzida da direção do tensor (WEI, 2017)

2.2.2 Coeficiente Dielétrico

Além de materiais piezelétricos, os isolantes também apresentam propriedades dielétricas, que tem como objetivo mensurar a resposta dos dipolos dentro do material piezelétrico devido à presença do campo elétrico, proporcionando assim a capacidade de um material para armazenar a eletricidade em um campo elétrico.

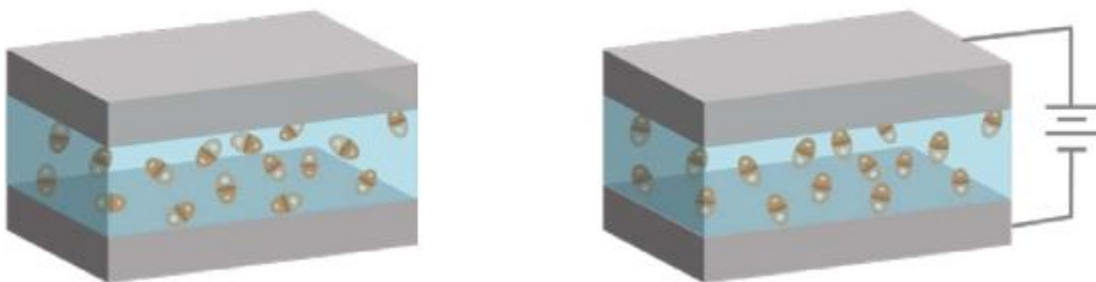


Figura 2.2 – Rotação dos dipolos na presença do campo elétrico (WEI, 2017)

Um bom exemplo para ilustrar a propriedade dielétrica, é um capacitor de placas paralelas com um material isolante entre elas, e conforme Figura 2.2, diante de um campo elétrico os dipolos se alinham. A equação que define a constante dielétrica é: '

$$D_m = \varepsilon_{mn} E_n \quad (2.4)$$

$$E_n = \beta_{nm} D_m \quad (2.5)$$

Sendo que m e n são as direções desse elemento; $D_m (C/m^2)$ é o deslocamento elétrico; $\varepsilon_{mn} (F/m)$ é a constante dielétrica; $E (V/m)$ é o campo elétrico.

Outro parâmetro comumente usado que a constante dielétrica é a permissividade, também conhecida como constante dielétrica relativa ε_r , definido como:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (2.6)$$

Sendo que ε_0 é a constante dielétrica no vácuo ($8,85 \cdot 10^{-12} F/m$).

2.2.3 Coeficiente Piezelétrico

Segundo Moulson e Herbert (2003), os coeficientes piezelétricos são usados para representar a capacidade de um material piezelétrico de produzir energia elétrica ao aplicar força, ou medir a deformação na presença de um campo elétrico. Os coeficientes piezelétricos podem ser descritos em termos de deslocamento elétrico D , campo elétrico E , deformação S e estresse ou pressão no material T .

$$D_m = d_{mij} T_{ij} \quad (2.7)$$

$$D_m = e_{mij} S_{ij} \quad (2.8)$$

$$E_{ij} = -g_{ijm} T_m \quad (2.9)$$

$$E_{ij} = -h_{ijm} S_m \quad (2.10)$$

As unidades dos 4 coeficientes piezelétricos d , e , g e h são respectivamente (C/N) , (C/m^2) , (m^2/C) e (N/C) . Os subscritos dos coeficientes representam tanto a direção do campo elétrico quanto a direção do campo mecânico, ou seja, indica que o piezelétrico com polarização elétrica na direção m é carregado com um estresse na direção ij . As equações acima descrevem o efeito piezelétrico direto. Para o efeito piezelétrico indireto, as variáveis

mecânicas T e S são descritas em termos de variáveis eletricamente independentes D e E conforme mostrado abaixo:

$$S_{ij} = d_{ijm} E_m \quad (2.11)$$

$$T_{ij} = -e_{ijm} E_m \quad (2.12)$$

Estes 4 tipos de coeficientes são obtidos através de condições extremas, e são usados dependendo das circunstâncias específicas. Os mais utilizados são o d_{33} ou d_{31} . A constante d_{33} descreve a polarização elétrica gerada na direção 3 e a pressão também é aplicado na direção 3, tal coeficiente pode ser chamado de coeficiente longitudinal. Em algumas outras aplicações, onde a polarização elétrica do material piezoeletrico é perpendicular à direção da força aplicada, é utilizado o coeficiente d_{31} , que é chamado de coeficiente transversal. Medindo a corrente como uma função do estresse aplicado ao material, d_{33} e d_{31} são mais acessíveis aos pesquisadores. Em particular, eles são usados para comparar as respostas dos diferentes materiais piezoeletricos em termos de estresse unitário aplicado.

De acordo com [Turner et al. \(1994\)](#), por exemplo, o d_{33} de $P_bZ_rT_iO_3$, titanato zirconato de chumbo, PZT, é cerca de 417 (pC/N), enquanto para um material livre de chumbo $Na_{0.5}Bi_{4.5}Ti_4O_{15}$, o valor é apenas 18 (pC/N). Para a aplicação Energy Harvesting, maiores coeficientes piezoeletricos são desejados. O coeficiente de tensão piezoeletrico g é normalmente usado em aplicações de geradores ou sensores.

Segundo [Ryu et al. \(2001\)](#), o g_{31} do PZT é utilizado como uma fonte de tensão ou fonte de sinal elétrico na aplicação de um composto eletromagnético, em que a tensão de saída do elemento piezoeletrico é o foco.

2.2.4 Fator de acoplamento Eletromecânico

Assim como os materiais piezoeletricos transformam energia mecânica em energia elétrica, ou elétrica em mecânica, os parâmetros usados para descrever a eficiência nesse processo são os fatores de acoplamento eletromecânico. Tais fatores são definidos como “coeficientes adimensionais que caracterizam a eficiência da transformação da energia armazenada em trabalho elétrico de um material piezoeletrico particular sob uma configuração de estresse e campo elétrico específicos”, segundo [Rosen, Hiremath e Newnham \(1992\)](#). Esses coeficientes são também conhecidos como fatores de acoplamento de material quase estático, que podem ser expressos como:

$$k_{ij}^2 = \frac{W_c}{W_t} \quad (2.13)$$

onde W_c é o trabalho convertido e W_t é o trabalho total que o material piezoeletrico produz; i representa a direção dos eletrodos aplicados e j é a direção da energia mecânica aplicada

ou produzida. Lembrando que K_{ij} depende exclusivamente das propriedades do material piezelétrico. Com o intuito de comparar interfaces diferentes que são usadas para armazenar energia gerada por qualquer material piezelétrico, este fator de acoplamento eficaz pode ser usado:

$$k_{eff}^2 = \frac{\omega_{oc}^2 - \omega_{sc}^2}{\omega_{oc}^2} \quad (2.14)$$

onde ω_{oc} é a frequência de ressonância angular da estrutura em circuito aberto, e ω_{sc} é a frequência de ressonância angular da estrutura em curto-circuito. Segundo Renaud et al. 2007 e Guyomar et al. 2005, o fator de acoplamento eficaz k_{eff}^2 está na faixa de 0,01 a 0,1 para interfaces reais de acoplamento com um material piezelétrico.

2.2.5 Fator de qualidade mecânica

De acordo com Wei (2017), para a maioria das aplicações de materiais piezelétricos seja com *Energy Harvesting* ou sensores, a frequência de trabalho não é exatamente o mesmo que frequência de ressonância, onde o desempenho ideal do sistema pode ocorrer. O fator de qualidade mecânica é um parâmetro que mostra o quanto o sistema é amortecido quando está vibrando dentro da largura de banda de frequência relativa à sua frequência de ressonância. O fator de qualidade mecânica representa a razão entre energia armazenada e energia dissipada do sistema de vibração em cada ciclo, conforme mostrado abaixo:

$$Q = 2\pi \frac{E_{armazenada}}{E_{dissipada/ciclo}} \quad (2.15)$$

Segundo Sherrit e Mukherjee (2007) tal fator de qualidade mecânica Q , pode ser medido através do espectro de resposta do circuito ressonante. Um espectro típico de impedância de um sistema de *Energy Harvesting* é mostrado na Figura 2.3. O fator Q pode então ser calculado como a razão entre a frequência de ressonância f_b e a largura de banda de frequências de $-3dB$, $f_{b2} - f_{b1}$. Sendo assim expresso por:

$$Q_b = \frac{f_b}{f_{b2} - f_{b1}} \quad (2.16)$$

2.2.6 Coeficientes complexos

Segundo Alemany et al. (1994) os coeficientes complexos foram encontrados para modelar os sistemas piezelétricos com maior precisão considerando a mudança de fase em uma resposta do tipo alternada, CA, de materiais piezelétricos. Portanto para um sistema linear geral submetido a uma entrada $x = Xe^{i\omega t}$, a resposta y pode ser expressa em termos da entrada:

$$y = tXe^{i\omega t} \quad (2.17)$$

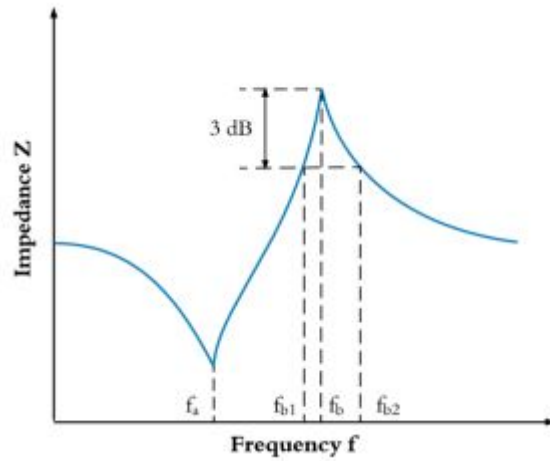


Figura 2.3 – Espectro da impedância de um sistema EH típico
(WEI, 2017)

Onde o t é o termo que relaciona a entrada com a saída. Quando t é real, y e x são ditos como sendo em fase. Por outro lado, quando t é complexo e $t = t_r + it_i$, y e x estão defasados por um ângulo de fase ϕ , que pode ser expresso como mostra a equação 2.18, onde $|t| = \sqrt{(t_r^2 + t_i^2)}$ e a fase $\phi = \text{arctg} \left(\frac{t_i}{t_r} \right)$:

$$y = |t| X e^{i\omega t + \phi} \quad (2.18)$$

Segundo McSkimin e Andreatch (1967), da mesma forma, na relação tensão-deformação, é possível descrever a propagação e a dissipação de ondas acústicas em um material, a rigidez elástica complexa apresentada na equação 2.19.

$$c = c_r + ic_i \quad (2.19)$$

Conseqüentemente, o fator de qualidade mecânica Q pode ser derivado em termos da rigidez complexa:

$$Q = \frac{c_i}{c_r} \quad (2.20)$$

É comum usar permissividade complexa para modelar o material, de modo que os dados relatados abordem tanto a constante dielétrica quanto a dissipação dielétrica. A permissividade complexa é escrita como:

$$k = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} \left(1 + i \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_r} \right) = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} (1 + itg\delta) = k_r + ik_r \quad (2.21)$$

Onde $tg\delta$ é a dissipação mas também pode ser traduzido como a razão da corrente de fuga para a corrente de carga, em termos de condutividade X e permissividade complexa para um dielétrico linear, sob um campo elétrico $E = Ee^{i\omega t}$:

$$tg(\delta) = \frac{\varepsilon_i + (V/\omega)}{\varepsilon_r} \quad (2.22)$$

De acordo com Wang, Zhang e Cross (1993), considerando o componente de perda do coeficiente piezométrico para vários materiais, o deslocamento elétrico em função do estresse CA pode ser descrito pela equação 2.23.

$$D_m = (d_{mpq,r} + id_{mpq,i}) T_{pq} e^{i\omega t} = |d_{mpq}| T_{pq} e^{i(\omega t + \theta_d)} \quad (2.23)$$

E para o efeito indireto, a tensão se comporta conforme equação 2.25

$$S_{pq} = (d_{mpq,r} + id_{mpq,i}) E_m e^{i\omega t} = |d_{mpq}| E_m e^{i(\omega t + \theta_d)} \quad (2.24)$$

Assim, o fator de acoplamento eletromecânico k_{ij}^2 em termos de elétrica, elástica e coeficiente piezométrico poderia ser reescrito de forma complexa, o que indica que há uma fase diferente entre a energia total de entrada e a energia convertida do sistema piezométrico. Este ângulo de fase total é derivado como:

$$\theta_k = 2\theta_e - \theta_{c^D} - \theta_{\epsilon^S} \quad (2.25)$$

Sendo que os subscritos e , c^D , ϵ^S são respectivamente o coeficiente piezométrico, a complacência elástica medida em deslocamento elétrico constante D e a permissividade sob constante tensão S .

2.3 Cerâmica Piezométrica

Cerâmicas piezométricas são chamadas de cristalinas, e para que o efeito piezométrico ocorra, a presença de uma simetria cristalográfica não centrossimétrica é necessária. Em 32 classes cristalinas, 21 deles não têm um centro de simetria, e 20 deles mostram piezeletricidade. A assimetria da estrutura do cristal resulta em uma diferença de cargas positivas e negativas. A deformação do material pode causar o deslocamento iônico, que constrói a polaridade da estrutura e aciona a carga de superfície para equilibrar essa diferença. O titanato de bário, uma cerâmica piezométrica típica, produz uma polarização piezométrica através deste mecanismo.

Conforme Popovici, Okuyama e Akedo (2011) uma unidade de célula do cristal de $BaTiO_3$ é mostrada na Figura 2.4. Levando em consideração o tamanho real dos átomos, toda a rede é uma estrutura assimétrica. Os átomos no canto treliçado (Ba^{2+}) são consideravelmente maiores do que o átomo central (Ti^{4+}), descentralizando-o dentro do octaédrico O^{2-} , permitindo que a rede atinja uma ligação estável.

Este desvio, segundo Wei (2017), pode ser reforçado com a presença de campo elétrico. Este deslocamento iônico resulta em um dipolo elétrico como origem da piezeletricidade, e a seta representa a direção da polaridade.

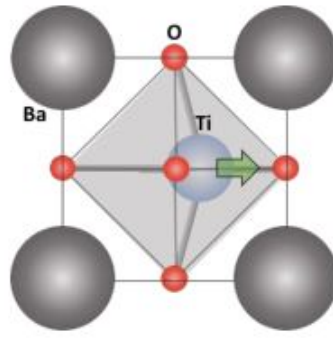


Figura 2.4 – Representação do deslocamento iônico na célula de perovskita $BaTiO_3$ (POPOVICI; OKUYAMA; AKEDO, 2011)

A polarização do cristal com aplicação de uma tensão assumindo a condição linear, pode ser expressa como

$$P_i = d_{ijk}\sigma_{jk} \quad (2.26)$$

onde d_{ijk} é o coeficiente piezelétrico e σ_{jk} é o coeficiente de Poisson. Considerando e preenchendo os subscritos com todos os 27 componentes, a forma explícita de polarização em suas diferentes direções é expressa como

$$P_1 = d_{111}\sigma_{11} + d_{112}\sigma_{12} + d_{113}\sigma_{13} + d_{122}\sigma_{22} + d_{123}\sigma_{23} + d_{133}\sigma_{33} \quad (2.27)$$

$$P_2 = d_{211}\sigma_{11} + d_{212}\sigma_{12} + d_{213}\sigma_{13} + d_{222}\sigma_{22} + d_{223}\sigma_{23} + d_{233}\sigma_{33} \quad (2.28)$$

$$P_3 = d_{311}\sigma_{11} + d_{312}\sigma_{12} + d_{313}\sigma_{13} + d_{322}\sigma_{22} + d_{323}\sigma_{23} + d_{333}\sigma_{33} \quad (2.29)$$

O material piezelétrico com estrutura descentralizada antes de aplicar um campo elétrico é conhecido como material ferroelétrico, onde o dipolo espontâneo existe e pode ser reorientado. Devido à presença do dipolo espontâneo, estes materiais ferroelétricos têm polarização que é compensada por cargas livres na superfície do material. Os materiais ferroelétricos são materiais piezelétricos popularmente estudados tanto no meio acadêmico quanto na indústria.

3 TIPOS DE *ENERGY HARVESTERS*

Várias estruturas e materiais foram e têm sido desenvolvidos afim de melhorar cada vez mais a eficiência na captação de energia em inúmeras aplicações de *Energy Harvesting*. Nesta seção são apresentados alguns tipos de estruturas capazes de transformar energia do ambiente através de vibrações mecânicas e energia cinética em energia elétrica e suas aplicações.

3.1 Cantilever

O Cantilever, é uma das mais eficazes e promissoras estruturas capazes de obter grande quantidade de energia dos transdutores piezelétricos, e isso só é possível devido a grande tensão aplicada sobre os transdutores quando submetidos às vibrações mecânicas do ambiente, de acordo com [Kang et al. \(2016\)](#).

A Figura 3.1 apresenta a estrutura básica de um cantilever, formada por uma barra flexível, uma cerâmica piezelétrica e por uma massa de prova. Conforme a estrutura cantilever se movimenta devido a vibração do ambiente, o transdutor piezelétrico se deforma, gerando energia pelo modo 31, conforme mencionado no Capítulo 2.

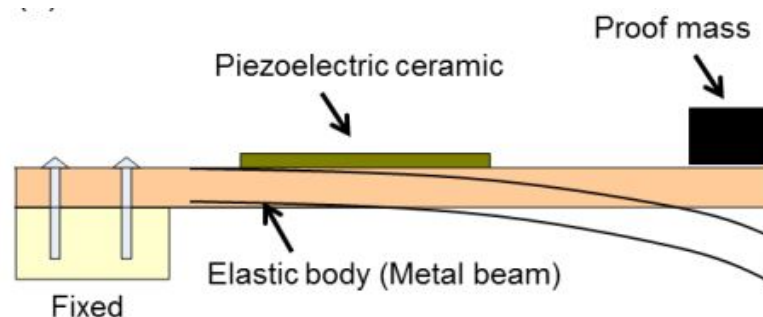


Figura 3.1 – Estrutura básica Cantilever
Adaptado de [Kang et al. \(2016\)](#)

Vale ressaltar que é preciso levar em consideração as propriedades dos componentes mencionados, barra, material piezelétrico e massa, pois o comportamento da estrutura Cantilever, depende por exemplo da largura, comprimento, altura, peso e outras propriedades dos componentes. Mais informações da estrutura Cantilever utilizada nos experimentos deste trabalho são detalhadas no Capítulo 4 a seguir.

3.2 Diafragma

Diafragma, disco ou placas são os mais conhecidos e utilizados dispositivos piezelétricos. De estrutura simples, formado basicamente de um disco piezelétrico e duas tampas de metal presas ao o disco de ambos os lados.

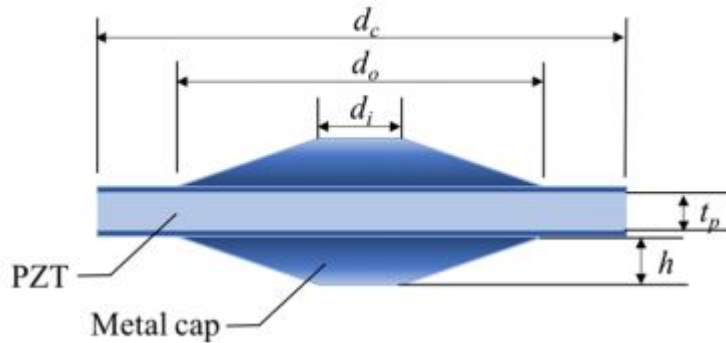


Figura 3.2 – Diafragma piezelétrico e seus parâmetros
Adaptado de [Zhao, Yu e Ling \(2010\)](#)

Devido à estrutura em forma de cúpula de metal, conforme mostrada na Figura 3.2, o disco piezelétrico é comprimido e esticado pela cúpula quando uma força axial é aplicada. Assim, os modos 33 e 31 de vibração do disco estão envolvidos na geração de energia. De acordo com [Kim et al. \(2005\)](#), o coeficiente piezelétrico efetivo das placas pode ser expresso como:

$$d_{eff} = d_{33} + A |d_{31}| \quad (3.1)$$

onde A é o fator de amplificação entre a força axial de entrada na extremidade das tampas e a força radial aplicada no disco.

As tampas do dispositivo são geralmente feitas de aço com alto poder de escoamento, e, conseqüentemente pode suportar altas forças de impulso. Além disso, devido ao formato de domo circular das tampas, o estresse é distribuído no disco de maneira mais uniforme.

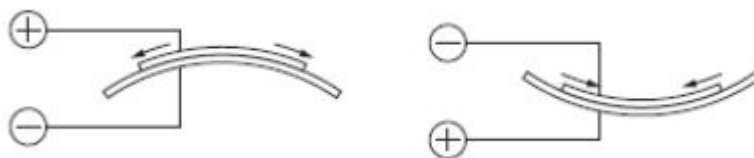


Figura 3.3 – Vibração do diafragma piezelétrico
Adaptado de [MURATA \(2012\)](#)

Otimizando os parâmetros de geometria do prato apresentada na Figura 3.2, ou seja, t_p , d_c , d_o , d_i um aumento da potência de saída pode ser obtido.

Percebe-se que a natureza robusta das tampas metálicas resulta em menos eficiência na captação de energia quando excitado pouco, e a frequência ideal ainda está além da amplitude de movimento humano.

A Figura 3.3 apresenta o diafragma piezelétrico vibrando conforme recebe tensão em seus terminais, expandindo e contraindo de acordo com a polaridade da tensão aplicada sobre ele.



Figura 3.4 – Estrutura do diafragma piezelétrico (SANCHES, 2015)

Neste trabalho foi utilizado este tipo de transdutor piezelétrico que possui uma estrutura fina em forma de disco, constituído por um disco cerâmico piezelétrico que dispõe de elétrodos adesivos em ambos os lados, aplicados em uma chapa de metal, latão ou aço inoxidável, também conhecido como *buzzer* piezelétrico.

É um transdutor simples, de baixo custo, e segundo MURATA (2012), constitui-se um atuador já pronto para uso, ou seja, a cerâmica piezelétrica já está colada sobre um substrato de metal formando um conjunto atuador-membrana, é apresentado na Figura 3.4 e ao longo do trabalho será melhor apresentado.

3.3 Magnético

A Figura 3.5 apresenta um sistema de EH utilizando um ímã na ponta do cantilever interagindo com dois ímãs fixos com polos opostos, ou seja, utilizando a força magnética dos ímãs para oscilar. Conforme Stanton, McGehee e Mann (2009) e Sebald et al. (2011) apresentaram, a não linearidade do sistema pode ser ajustada conforme é variada a distância entre os ímãs fixos e o oscilante preso a ponta da barra, quanto mais para trás da ponta da barra estão os ímãs fixos, mais rígida é a resposta do sistema, que possui uma resposta suavizada quando os ímãs fixos estão a frente da ponta da barra.

Existem diversos outros tipos de sistemas EH utilizando força magnética, alguns utilizando apenas um ímã, outros dois ímãs fixos, e variando as distâncias e posições dos

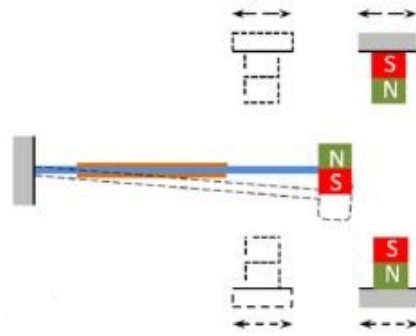


Figura 3.5 – PEH utilizando força magnética
(STANTON; MCGEHEE; MANN, 2009)

mesmos, conforme mostrado em Liu et al. (2018).

3.4 Flexíveis

Os materiais piezelétricos comumente utilizados em sistemas de EH, são na maioria das vezes quebradiços quando submetidos a grandes tensões ou forças, levando a certas restrições em suas aplicações, como por exemplo em aplicações que exigem mais flexibilidade e até mesmo que o dispositivo EH possua biocompatibilidade, ou seja compatível com determinado biosistema.

Nesta linha de pensamento, a flexibilidade permite aos materiais piezelétricos um maior número de aplicações, além de, segundo Kang et al. (2016), permitir uma maior extração de energia do ambiente fora da frequência de ressonância, uma vez que o material suporta maior deformação.

Para adquirir tal flexibilidade, os materiais piezelétricos, as micro e nanoestruturas, e os filmes finos, têm sido utilizados com um composto de polímero e uma estrutura independente.

Nesta seção são apresentados alguns tipos de dispositivos *Energy Harvesting* Piezelétricos flexíveis como: Nanotubos, nanotrilhos, nanofios, nanofibras, nanocompósitos e filmes finos.

3.4.1 Nanotubos

Os nanotubos piezelétricos são sintetizados através de método de infiltração assistida utilizando um óxido de alumínio anodizado (AAO), e de acordo com Xu e Shi (2009), com nanotubos piezelétricos com diâmetro entre 190 e 210 nm, dispostos entre dois eletrodos de prata (Ag), conforme mostrado na Figura 3.6.

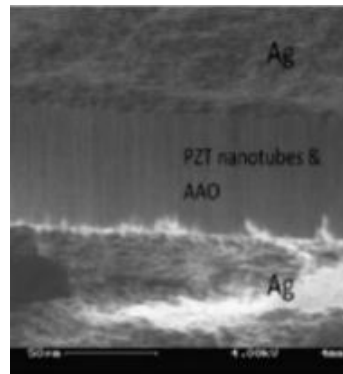


Figura 3.6 – Vista do corte transversal do dispositivo utilizando nanotubos piezelétricos (XU; SHI, 2009)

3.4.2 Nanotrinhos e Nanofios

Os nanotrinhos e nanofios geralmente são sintetizados através de um método hidrotermal. Segundo Xu e Shi (2009) a estrutura do dispositivo foi embalada com um polímero de epóxi para garantir a robustez e isolar os nanofios de uma possível umidade.

Experimentos com esse dispositivo utilizando um circuito retificador e um Diodo emissor de luz (LED), permitiram atingir 1 V de tensão de saída e uma corrente de aproximadamente 200 nA quando submetido a uma pressão.

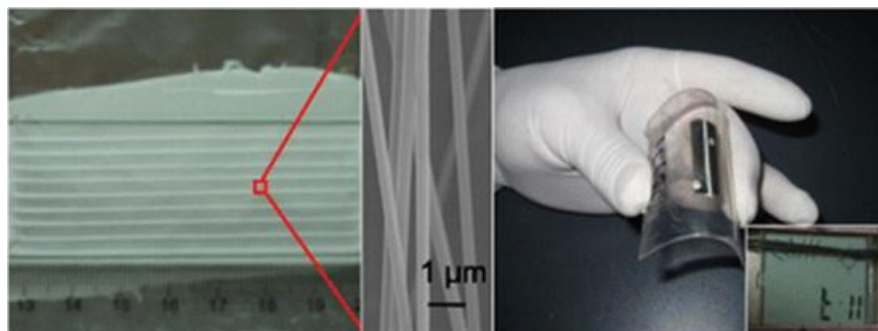


Figura 3.7 – Dispositivo de EH utilizando nanofios piezelétricos alinhados (WU et al., 2012)

Wu et al. (2012) demonstraram um dispositivo de EH utilizando nanofios, cujo método de construção utilizado foi o de eletrofação, alcançando níveis de tensão de saída de aproximadamente 6 V e 45 nA de corrente de saída, o que na época era capaz de suportar um display de LCD ligado. A flexibilidade de tal dispositivo foi possível através do alinhamento dos nanofios em paralelo a estrutura de polidimetilsiloxano (PDMS), ou também conhecido como dimetilsilicone, como apresentado na Figura 3.7.

3.4.3 Nanofibras

Kang et al. (2016) afirma que as nanofibras piezelétricas são estruturas promissoras para se obter uma grande tensão e flexibilidade com a alta densidade de energia. Na Universidade de Princeton, Qi et al. (2010) fabricaram nanofitas piezelétricas impressas em borracha para aplicações flexíveis de *Energy Harvesting*.

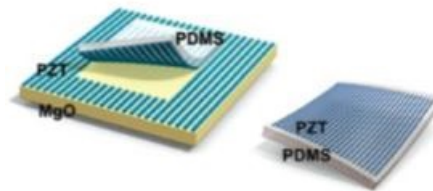


Figura 3.8 – Nanofitas piezelétricas flexíveis em um substrato de PDMS (Qi et al., 2010)

Os filmes fabricados foram modelados em nanofitas grossas e impressos no PDMS através de uma transferência a seco, conforme mostrado na Figura 3.8.

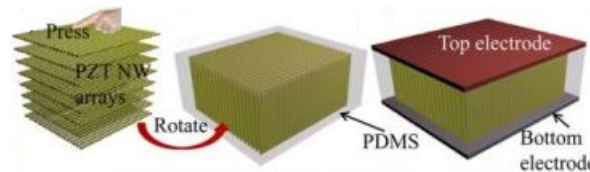


Figura 3.9 – Nanogerador utilizando nanofibras piezelétricas (GU et al., 2013)

Gu et al. (2013) apresentaram um nanogerador de fibras flexível, que permite ligar o diodos emissores de luz. Para fabricar matrizes de nanofibra piezelétricas alinhadas verticalmente, o filme de nanofibra foi obtido primeiro e foi empilhado camada por camada para formar filmes multicamadas (Figura 3.9). PDMS foi preenchido no espaço entre os filmes e nanofibras usando uma força capilar, e as camadas múltiplas o filme foi pressionado suavemente sem danificar sua estrutura.

3.4.4 Nanopartículas

As nanopartículas piezelétricas têm sido muito utilizadas em sistemas de EH. Park et al. (2013) demonstrou geradores de nanocompósitos (NCG) flexíveis e de grande área, baseados em nanopartículas piezelétricas e nanotubos de carbono. Com o auxílio das nanopartículas, ótimos sinais de tensão e corrente de saída foram obtidos, 10 V e 1,3 μA , respectivamente. Utilizando um gerador de nanocompósitos de grande área, com dimensões de 30 x 30 cm^2 foi obtido um sinal de 100V e uma corrente de saída de aproximadamente 10 μA .

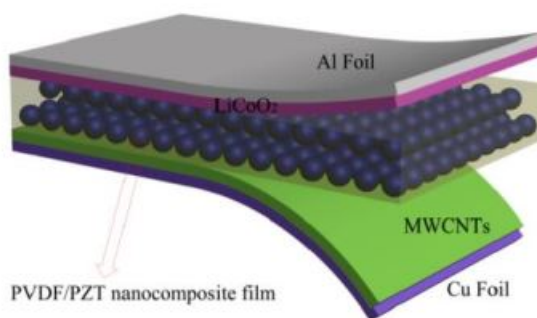


Figura 3.10 – Dispositivo formado por nanopartículas piezelétricas (ZHANG et al., 2014)

Na Figura 3.10 apresenta-se uma bateria de Lítio autocarregável baseada em um composto separador formado por nanopartículas piezelétricas juntamente com fluoreto de polivinilideno (PVDF), onde segundo Zhang et al. (2014), o potencial piezelétrico do separador, garante a efetiva difusão dos íons de lítio, conseqüentemente, transforma energia mecânica em eletroquímica, que por sua vez é armazenada pela bateria.

3.4.5 Filmes finos

Os materiais de filme fino também têm um potencial notável para a coleta de energia piezelétrica flexível. Porém, o filme fino possui algumas limitações no que diz respeito à flexibilidade, portanto precisa ser instalado junto a substratos flexíveis devido à sua alta temperatura de cristalização.

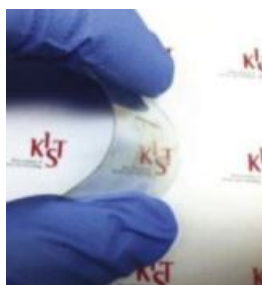


Figura 3.11 – Dispositivo *Energy Harvester* transparente e flexível utilizando filmes finos piezelétricos.

(DO et al., 2013)

Do et al. (2013) desenvolveram um filme fino utilizando um processo conhecido como LLO, ou *laser lift-off*. Eles fabricaram um dispositivo de EH transparente e flexível utilizando filmes finos com esse processo LLO, como apresentado na Figura 3.11. Eles sintetizaram o filme fino cristalizado em um substrato de safira, e pelo processo de LLO, o filme fino foi transferido do substrato de safira para um substrato receptor por sua vez, flexível. Neste processo não foi necessário qualquer tipo de tratamento térmico

adicional, e seus eletrodos são formados de óxido de índio-estanho (ITO, do termo em inglês *Indium-Tin Oxide*) revestidos por Polietileno tereftalato, o famosos PET. Realizando experimentos com o dispositivo, 0,28 V de máxima tensão de saída e aproximadamente 30 nA de corrente.

Park et al. (2014) também desenvolveram um dispositivo de EH filmes finos utilizando o processo de LLO, porém, utilizou-se de um substrato de plástico, formando padrões nos filmes finos piezelétricos, construindo assim o dispositivo. Tal dispositivo de EH gerou aproximadamente 200 V de tensão de saída e $150 \mu A/cm^2$, e permitiu a ligação de 100 LEDs azuis sem a utilização de fonte externa de energia.

3.5 MEMS

O avanço da eletrônica e da microeletrônica tem permitido a diminuição significativa dos componentes eletrônicos e de seu consumo de energia. Cada vez mais os chips estão menores e consumindo menos energia, segundo Safaei, Sodano e Anton (2019), através da diminuição do consumo de energia e da desenvolvimento de microeletrônica de pequena escala, o uso de sistemas microeletromecânicos (MEMS, do termo em inglês *Micro Electro Mechanical Systems*) de *Energy Harvesters* baseados em vibração se tornou viável.

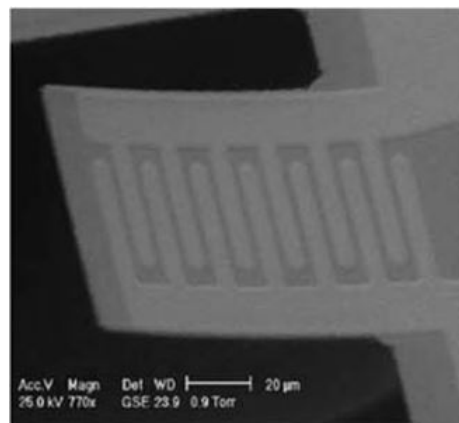


Figura 3.12 – Primeiro MEMS piezelétrico *Energy Harvester* produzido e caracterizado (JEON et al., 2005)

Geralmente, a estrutura dos dispositivos MEMS baseados na estrutura cantilever são desenvolvidos principalmente para obter alta potência de saída e que permita facilmente o ajuste da frequência de ressonância.

Um MEMS baseado em metal é uma estrutura promissora para obter flexibilidade para reduzir a frequência de ressonância e melhorar sua tensão/deformação. Normalmente, um cantilever MEMS convencional opera em alta frequência, acima de 1 kHz, devido ao comprimento curto e à pequena massa da barra do cantilever.

Sistemas microeletromecânicos piezelétricos podem permitir que dispositivos e sensores sejam totalmente autoalimentados, ou seja, livres de baterias, e servem para diversas aplicações como na biomedicina, onde o tamanho e uso de energia devem ser otimizados.

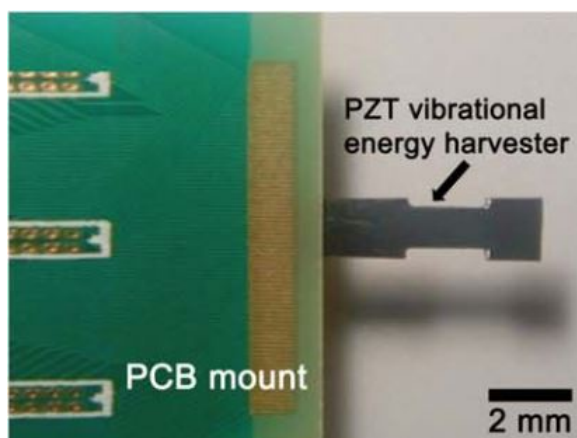


Figura 3.13 – MEMS piezelétrico produzido em metal flexível (WON et al., 2019)

As Figuras 3.12 e 3.13 apresentam respectivamente, o primeiro dispositivo microeletromecânico produzido e caracterizado por Jeon et al. (2005), e um protótipo de MEMS piezelétrico com dimensões de 2 mm x 4 mm x 25 μm (LxCxE), cujo processo de fabricação foi realizado com perfurações simples (WON et al., 2019).

Os resultados experimentais deste protótipo mostram que sujeito a uma aceleração de 0.5 g, a uma frequência de 127 Hz e com uma resistência de carga de aproximadamente 11 $k\Omega$, a energia gerada pelo sistema foi da ordem de 5.6 μW , o que é um ótimo resultado quando comparado as dimensões do protótipo, mostrando que é factível a construção otimizada de sistemas de EH utilizando MEMS.

3.6 Aplicações

As principais fontes de energia vibratória investigadas para a captação piezelétrica na última década incluem fluidos como fontes, movimento do corpo humano, atividade animal, vibração de estruturas e infraestruturas e também movimentação de veículos. Vários dispositivos piezelétricos de captação de energia introduzidos na literatura a partir dessas fontes são apresentados nesta seção.

Segundo Safaei, Sodano e Anton (2019) alguns exemplos de ambientes onde a captação piezelétrica de energia por vibração pode ser usada: infraestrutura civil, como edifícios e pontes, sistemas aeroespaciais e no corpo humano, como implantes.

Levando em consideração que a maioria dos sistemas de *Energy Harvesting* piezelétricos opera na escala de microwatt (μW) a miliwatt (mW), a aplicação mais comum é a coleta de energia piezelétrica para o fornecimento de energia em sistemas e dispositivos eletrônicos de baixa potência e/ou extra baixa potência, incluindo eletrônicos incorporados, dispositivos biomédicos implantáveis, sensores sem fio, dispositivos eletrônicos portáteis entre outros.

Com relação ao ambiente para captação de energia cinética utilizando material piezelétrico, existem ambientes ricos em fluxo de fluido, mas falta de vibração estrutural onde funcionam os sistemas de EH. Segundo [Safaei, Sodano e Anton \(2019\)](#), os fluidos oferecem energia cinética de densidade relativamente alta o que geralmente está prontamente disponível.

Transdutores piezelétricos podem ser utilizados para converter a energia disponível no fluxo de água, líquidos e ar em energia elétrica. Esta conversão é relatada na literatura usando várias configurações como moinhos de vento, estruturas cantilever, filmes, placas, bandeiras, membranas e discos piezelétricos. ([ABROL; CHHABRA, 2017](#))

A captação de energia eólica é tipicamente investigada usando sistemas EH de moinho de vento e agitadores, *shakers*. [Yang et al. \(2014\)](#) afirma que a captação de energia eólica tem sido muito mais atraente do que muitas outras fontes devido à ampla disponibilidade e sua natureza perpétua, fornecendo energia mecânica contínua.

Vale lembrar que assim como [Kishore, Vučković e Priya \(2014\)](#) ressaltaram, uma limitação ao uso de sistemas de EH eólicos é a velocidade relativamente baixa do vento perto do solo devido a obstruções físicas, como árvores e estruturas.

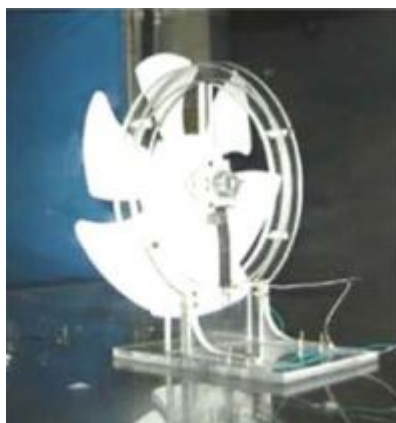


Figura 3.14 – Sistema EH eólico - moinho de vento
([TIEN; GOO, 2010](#))

[Tien e Goo \(2010\)](#) sugeriram o projeto de um sistema EH de moinho de vento constituído por um único cantilever piezelétrico. Um ventilador convencional com dentes foi instalado no o cubo da turbina e utilizado para excitar o sistema, como mostrado na

Figura 3.14.

O projeto foi testado no túnel de vento e obteve a potência máxima de $8,5 \text{ mW}$ com 26 V de saída, porém a velocidade do vento não foi informada.

Utilizando o fluxo da água para geração de energia, [Taylor et al. \(2001\)](#) introduziram um dos primeiros trabalhos na captação de energia a partir do fluxo de líquidos usando materiais piezelétricos. Eles apresentaram uma enguia de captação de energia, que consiste em um elemento PVDF bimorfo submerso na água, como mostrado na Figura 3.15.

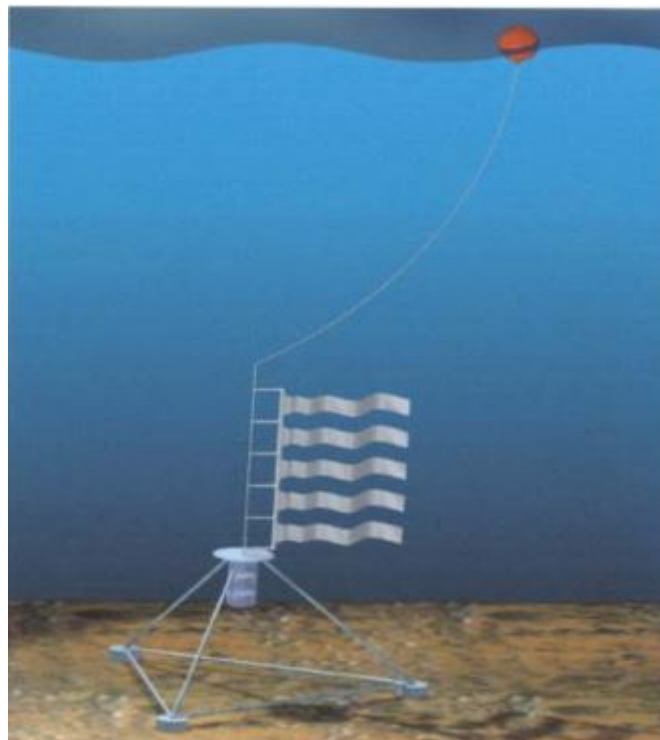


Figura 3.15 – Sistema EH submerso na água
(TAYLOR et al., 2001)

Conforme o fluxo de água passa pela enguia, o material piezelétrico se movimenta, gerando energia. O protótipo foi testado em um tanque e obteve a tensão de 3 V com uma velocidade da água de $0,5 \text{ m/s}$.

A presença dispositivos eletrônicos portáteis e as limitações de vida útil das baterias dos mesmos, incentivaram os pesquisadores a desenvolver dispositivos de captação de energia que pudessem ser usados ou vestidos, com a capacidade para gerar micro a miliwatts de potência. Essa quantidade de energia pode ser suficiente para alimentar pequenos dispositivos eletrônicos, como monitores de frequência cardíaca e respiratória, ou até mesmo celulares.

Neste sentido, [Shenck e Paradiso \(2001\)](#) propuseram um dos primeiros sistemas de EH capaz de ser vestido por uma pessoa, transdutores piezelétricos foram integrados aos



Figura 3.16 – Sapatos com dispositivo EH piezelétrico (ZHAO; YOU, 2014)

sapatos, assim como Zhao e You (2014) propuseram posteriormente, dois projetos para aumentar a eficiência energética e o conforto dos sapatos, conforme Figura 3.16.

Os dispositivos EH consistem em filmes de PVDF multicamadas incorporados dentro de uma base de plástico e uma base de borracha e silicone flexível prensado entre duas superfícies onduladas. Os resultados dos testes mostraram que uma maior potência de 1 *mW* foi gerada pelo dispositivo com base de plástico, enquanto o dispositivo com base de silício mostrou-se mais confortável.

Ainda com o intuito de desenvolver dispositivos que pudessem ser usados ou vestidos, Granstrom et al. (2007) desenvolveram uma mochila capaz de gerar energia durante a caminhada afim de reduzir a quantidade de baterias transportadas por soldados ou pessoal de emergência, utilizando em suas alças, dispositivos EH constituídos por material PVDF. O modelo teórico das alças piezelétricas previu uma potência média gerada de 45,6 *mW* carregando uma carga de 444 *N*.

Diversos estudos propuseram mecanismos para converter a energia cinética do movimento dos membros em energia elétrica. Uma questão importante na captação da energia cinética do corpo humano é a baixa frequência de movimento corporal, menos de 25 Hz, segundo Shukla e Bell (2015). Os sistemas EH piezelétricos são mais eficientes quando trabalham na frequência de ressonância, que normalmente é superior à frequência do movimento no corpo humano.

A crescente utilização de implantes médicos inteligentes nas últimas décadas tem aprimorado os tratamentos e métodos terapêuticos e de diagnóstico nos pacientes. Um problema com dispositivos implantáveis é a vida útil limitada das baterias, que exigem substituição intermitente. Em muitos casos, a substituição da bateria ou do próprio dispositivo exige rigorosos procedimentos sem contar no alto risco para os pacientes.

Afim de superar os atuais limites de potência desses dispositivos, pesquisadores têm investigado dispositivos EH piezelétricos implantáveis com o intuito de alimentar implantes eletrônicos embutidos no corpo humano. Almouahed et al. (2011) sugeriram a utilização de um dispositivo EH com quatro transdutores piezelétricos colocado na bandeja

tibial do implante de joelho.

Posteriormente [Safaei, Ponder e Anton \(2018\)](#) propuseram um design aprimorado de um mancal de joelho com seis transdutores piezelétricos incorporados afim de monitorar e medir forças compartimentais e locais. A Figura 3.17 apresenta o dispositivo.

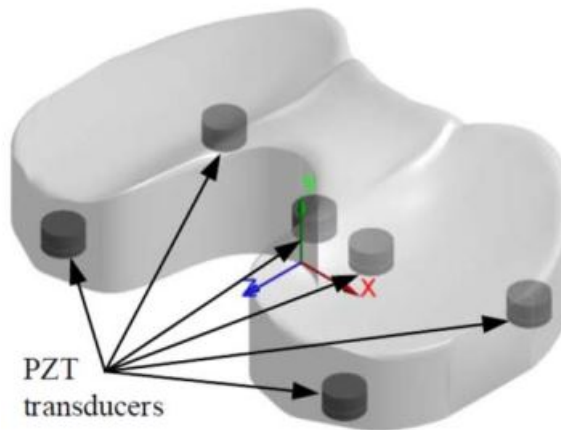


Figura 3.17 – Dispositivo EH piezelétrico implantável de joelho ([SAFAEI; PONDER; ANTON, 2018](#))

Com potencial para captar energia de órgãos internos, como coração, pulmões, diafragma, etc, [Karami et al. \(2011\)](#) investigaram sistemas EH piezelétricos para coletar energia da vibração dos batimentos cardíacos, usando um coletor de energia piezelétrico não linear para marcapassos.

[Deterre et al. \(2014\)](#) apresentaram um pequeno sistema EH piezelétrico capaz de captar energia a partir das variações normais da pressão arterial para alimentar um marcapasso. Já [Zhang et al. \(2015\)](#) sugeriram a aplicação de um dispositivo com filme PVDF flexível e selado para coleta de energia da pulsação da veia aorta ascendente do coração, conforme mostrado na Figura 3.18.

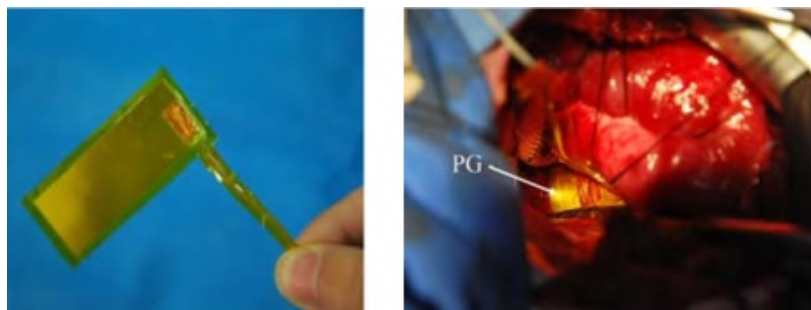


Figura 3.18 – Dispositivo de filme PVDF flexível na veia aorta ascendente do coração ([ZHANG et al., 2015](#))

Assim como em humanos, estudos sobre a utilização de sistemas EH piezelétricos em animais têm crescido. Com o tamanho relativamente pequeno da maioria dos animais

que voam, como insetos e aves, restringe-se o tamanho e a massa circuitos eletrônicos, dispositivos de rastreamento desenvolvidos para coletar dados de suas atividades e suas baterias.

Pesquisadores têm recentemente introduzido o conceito de captação de energia em vida selvagem para criar veículos autônomos, vivos e micro veículos aéreos (MAVs) que podem ser controlados, onde o sistema de captação pode fornecer a energia necessária para os dispositivos de rastreamento e registro biológico dos animais.

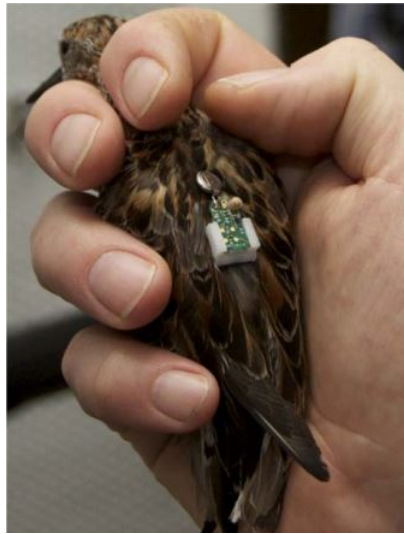


Figura 3.19 – Sistema de captação de energia em aves
([SHAFFER et al., 2012](#))

[Reissman e Garcia \(2008\)](#) investigaram a possibilidade de captar energia vibratória durante o voo de uma mariposa usando materiais piezelétricos. Em 2012, [Shafer et al. \(2012\)](#) investigaram a possibilidade de captação de energia de aves para poder ativar etiquetas de monitoramento da fauna silvestre, Figura 3.19. A energia armazenada pode ser usado para coletar dados ambientais, dados de localização, transmitir dados armazenados e fazer medições fisiológicas do pássaro.

A complexidade do gerenciamento de energia nas cidades, juntamente com desenvolvimentos recentes em tecnologias para monitorar infraestrutura e edifícios levaram pesquisadores a investigar a viabilidade de captação de energia a partir de infraestrutura.

Pontes, prédios e estradas proporcionam promissoras fontes vibratórias para a coleta de energia piezelétrica devido ao vento, movimento de veículos e tráfego humano, que podem ser convertidos em energia elétrica utilizável. Esta energia pode ser utilizada em sistemas próximos, como redes de sensores sem fio que fornecer informações sobre as condições da estrada, peso do tráfego, velocidades do veículos ou outros sistemas eletrônicos. ([SAFAEI; SODANO; ANTON, 2019](#))

[Hwang et al. \(2015\)](#) apresentaram um sistema capaz de gerar energia conforme as

peçoas pisassem nele, ou seja, um sistema de captação de energia piezelétrica através dos passos das peçoas, formado por uma placa superior, uma placa do meio com módulos piezelétricos e uma placa fixa com quatro molas de suporte. Os módulos piezelétricos contêm quatro vigas cantilever com massas de prova na ponta, que estão ligadas à placa superior.

Xie et al. (2013) propuseram a utilização de sistemas EH piezelétricos na geração de energia em edifícios altos submetidos a ventos e terremotos, através da oscilação de um amortecedor.

A vibração do solo na presença de tráfego também pode ser utilizada para geração de energia, Xiang et al. (2013) investigaram um gerador piezelétrico utilizado no solo e Jiang et al. (2014) apresentaram um novo sistema EH piezelétrico baseado em compressão para gerar energia a partir da movimentação dos carros nas rodovias.

Zhang et al. (2018) apresentaram um estudo com a aplicação de um sistema EH piezelétrico, utilizando material bímorfo, para captação de energia em pontes com a passagem de veículos, com uma configuração experimental em pequena escala e na frequência de ressonância, o sistema proposto gerou 0.53 mW de potência com um carro atravessando a ponte a uma velocidade de $8,3 \text{ km/h}$.



Figura 3.20 – Sistema de captação de energia nos pneus dos veículos (MAKKI; POP-ILIEV, 2012)

Especificamente em veículos, diversos estudos com sistemas EH foram realizados, como apresentado por Makki e Pop-Iliev (2012), onde o sistema localizado dentro do pneu, conforme mostrado na Figura 3.20, é utilizado para acionar o sistema de monitoramento de pressão dos pneus do veículo.

Xie e Wang (2015) também propuseram a utilização de um sistema para captar energia nos pneus dos veículos, porém tal sistema é construído junto com o pneu, o sistema faz parte de uma das diversas camadas do pneu. A configuração proposta pode gerar até $42,08 \text{ W}$ de potência RMS com um veículo estando a uma velocidade de 144 km/h .

Dentre diversas aplicações existentes, as principais foram apresentadas nesta seção, com o intuito de reforçar o quão aplicável e eficaz é um sistema EH piezelétrico.

4 CANTILEVER BEAM

Nesta Seção é apresentada detalhadamente a estrutura Cantilever, desde os componentes estruturais até as equações características.

4.1 Estrutura

Como mencionado no Seção 3.1, a estrutura Cantilever é uma das mais eficazes para aplicações de EH, onde de maneira simples transforma energia mecânica das vibrações em energia elétrica. Segundo [Fernandes \(2017\)](#) a maioria dos PEHs está na forma de barras cantilever e são uma das configurações mais estudadas para conversão de energia.

Esta estrutura normalmente consiste em uma ou duas camadas de material piezelétrico, ligadas a uma base flexível. Assim como a Figura 3.1 apresentada no Capítulo 3, a Figura 4.1 também apresenta a estrutura cantilever.

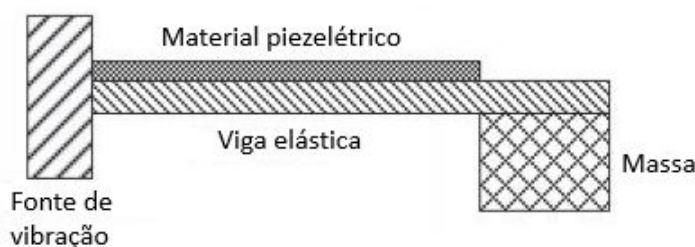


Figura 4.1 – Estrutura cantilever

Normalmente uma massa é adicionada na ponta da barra para sintonizar a frequência ressonante do sistema e também aumentar a potência. O dispositivo responsável pela captação de energia está localizado em uma estrutura vibratória e a tensão é induzida na camada piezelétrica, o que resulta em uma saída de tensão alternada através de seus terminais.

Segundo [Roundy, Wright e Rabaey \(2003\)](#) e [Dutoit, Wardle e Kim \(2005\)](#) o sistema cantilever pode ser modelado utilizando parâmetros da massa concentrada, associados às equações dos circuitos elétricos. A Figura 4.2 mostra o sistema cantilever piezelétrico representado pelo sistema massa-mola-amortecedor, como apresentado em [Hehn e Manoli \(2015\)](#).

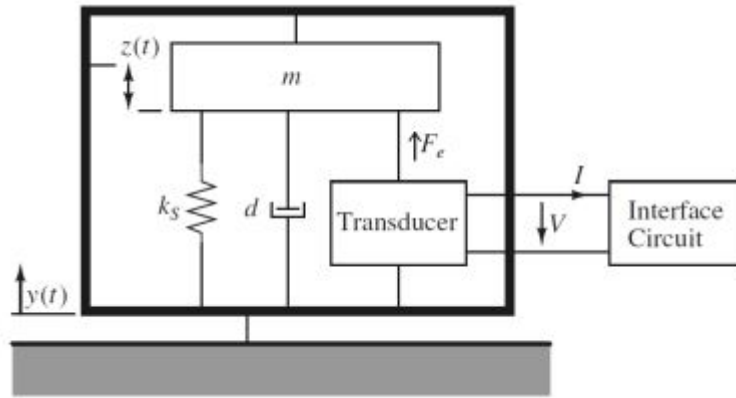


Figura 4.2 – Estrutura cantilever modelo massa-mola-amortecedor (HEHN; MANOLI, 2015)

4.2 Equações características

As equações características da frequência natural do sistema Cantilever são apresentadas e comparadas entre si nesta seção, visto que cada autor aqui apresentado utiliza o seu método.

Segundo Erturk e Inman (2008), considerando a inércia da base do sistema e da massa de prova, a equação dinâmica do sistema pode ser descrita como:

$$YI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = q \quad (4.1)$$

Sendo $\mu = m_1/L$, é a densidade da linha, q é a densidade da linha da carga externa. Desprezando a torção do bloco de massa, com base nas condições de continuidade da massa de prova e na junção da barra, a equação dinâmica fica assim:

$$m_2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \Big|_{x=L} - YI \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} \Big|_{x=L} = f \quad (4.2)$$

sendo que $f = m_2 a$, a é a aceleração do ambiente.

Assim, levando em consideração uma série de autovalores $\lambda_n (n = 1, 2, \dots)$, uma série da frequência natural ω_n pode ser escrita:

$$\omega_n = (\lambda_n L)^2 \sqrt{\frac{YI}{\mu L^4}} = (\lambda_n L)^2 \sqrt{\frac{YI}{m_1 L^3}} \quad (4.3)$$

Algumas variações na expressão do calculo da frequência de ressonância podem ser encontradas na literatura, como dependendo do maior ou menor grau de simplificação na modelagem matemática.

De acordo com [Erturk e Inman \(2011\)](#), a frequência natural do sistema Cantilever com uma barra pode ser descrito pela Equação 4.4, onde K_{eq} e m_{eq} são respectivamente a

$$\omega_n = \sqrt{k_{eq}/m_{eq}} = \sqrt{\frac{3YI/L^3}{(\frac{33}{140})mL + M_t}} \quad (4.4)$$

rigidez e massa equivalentes do sistema, YI é a rigidez da barra, L é o comprimento da barra, m é a massa da barra por unidade de comprimento, e M_t é a massa da ponta da barra.

[Fernandes \(2017\)](#) afirma que para um sistema de captação de energia é crítico que a frequência natural do sistema corresponda à frequência de oscilação, pois é exatamente nessa frequência onde a máxima potência de saída é captada. De fato a conforme a frequência é alterada em algumas unidades, a potência de saída é diminuída consideravelmente, e esse fato é um problema para estruturas EH de tamanho reduzido como os *MEMS*, pois conforme o tamanho da barra diminui, a frequência natural do sistema aumenta. Considerando a inércia da massa e negligenciando a inércia da barra cantilever elástica, a equação dinâmica do sistema mecânico é expressa abaixo:

$$m_2 \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \Big|_{x=L} + c \frac{\partial w}{\partial t} + kw \Big|_{x=L} = f \Big|_{x=L} \quad (4.5)$$

Sendo que c é o coeficiente de amortecimento, f é a força da inércia e k é a rigidez equivalente da barra. Esta rigidez equivalente pode ser escrita como:

$$k = \frac{2YI}{L^3} \quad (4.6)$$

Segundo [Zhang, Gao e Liu \(2016\)](#), levando em consideração as expressões da equação mecânica e da rigidez equivalente do sistema, a frequência natural do sistema cantilever ω_n é deduzida como:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_2}} = \sqrt{\frac{2YI}{m_2 L^3}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{YI}{m_2 L^3}} \quad (4.7)$$

[Kang et al. \(2016\)](#) afirmam que para maximizar a potência de saída de um sistema de captação de energia (EH) o sistema cantilever normalmente opera na frequência de ressonância da estrutura mecânica, conhecida como frequência natural ou ω_n . Por isso é importante determinar a frequência natural de acordo com a aplicação do sistema EH.

Assim como [Erturk e Inman \(2011\)](#), [Kang et al. \(2016\)](#) também afirmam que 33/140 ou 23,5 % da massa de prova, localizada na ponta da barra, participa do movimento, e isso entra nos cálculos da frequência natural do sistema.

Percebe-se a partir dessas equações que a frequência ω_n depende de alguns parâmetros do sistema, como a constante de amortecimento, a massa de prova, comprimento, largura e espessura da barra do sistema cantilever.

[Caliò et al. \(2014\)](#), como os demais autores, demonstram que a frequência natural ω_n pode ser calculada como:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4.8)$$

Em termos práticos, o sistema EH deve ser projetado para trabalhar na frequência de excitação do ambiente e quando isso acontece, a energia máxima é extraída do transdutor piezoeletrico, conforme [Figura 4.3](#).

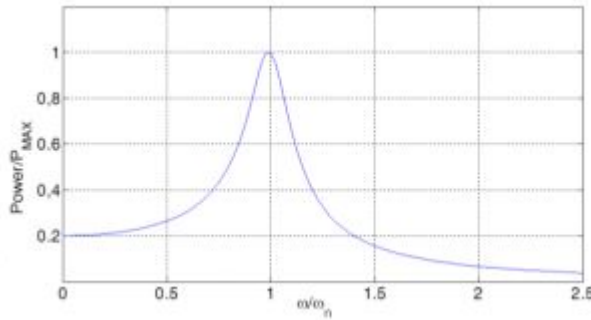


Figura 4.3 – Comportamento do sistema em ressonância ([CALIò et al., 2014](#))

Segundo [Zhang, Gao e Liu \(2016\)](#) a potência de saída do sistema PEH pode ser abreviada como

$$P = I^2 R_1 = \frac{V_{max}^2}{2(R_1 + R_2)^2} R_1 \quad (4.9)$$

Sendo I a corrente na carga, R_1 é a reatância da carga, $R_2 = 1/\omega_1 C_p$ é a reatância disco piezoeletrico e V_{max} é a tensão de pico máxima com circuito aberto. Considerando $R_1 = R_2$, a máxima potência pode ser calculada como:

$$P_{max} = \frac{\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_r b L U^2}{2\delta} \quad (4.10)$$

Sendo que f é a frequência de ressonância, ε_0 é a permissividade do vácuo e ε_r é a permissividade relativa.

Percebe-se através do comportamento do sistema em ressonância com o ambiente, que a potência de saída é realmente a potência máxima, visualmente, fica claro com a Figura 4.3, um pico de máxima potência bem definido quando $\omega = \omega_n$, reforçando a ideia de que para extrair o máximo de potência do sistema EH piezoeletrico é necessário projetá-lo corretamente para o ambiente, ou seja, trabalhar na frequência ω_n .

5 CIRCUITO DE CONDICIONAMENTO DE SINAL

Os circuitos de condicionamento de sinal ou circuitos de interface elétrica, possuem papel fundamental para o funcionamento do sistema EH, além de serem responsáveis por transformar o sinal CA (corrente alternada) gerado pelo PZT em CC (corrente contínua), pois a maior parte dos equipamentos eletrônicos utilizam CC para funcionarem, a ideia é buscar a máxima geração de potência, mantendo tais circuitos com o menor consumo de energia e a máxima eficiência possíveis.

Neste sentido, o presente capítulo apresenta dois métodos bastante explorados que são o casamento de impedâncias (*impedance matching*) e o chaveamento sincronizado (*synchronous switching*) com seus respectivos circuitos.

5.1 Casamento de impedâncias

O casamento de impedâncias é uma técnica muito utilizada em sistemas de *Energy Harvesting* e normalmente conversores CC-CC são utilizados para tal fim. Esta técnica consiste em projetar a impedância de entrada de uma carga elétrica ou a impedância de saída de sua fonte de sinal correspondente para maximizar a transferência de energia, e é fundamentada no teorema da máxima transferência de potência, onde de acordo com Souza (2018), a potência da carga será máxima quando a impedância da carga for o conjugado da impedância de Thévenin entre os terminais da fonte.

Neste caso, a tensão da carga é a metade da tensão em aberto e para garantir a máxima transferência de potência, é preciso usar circuitos que controlem a tensão de saída.

Kymissis et al. (1998) e Amirtharajah e Chandrakasan (1998) utilizavam um retificador de onda completa em ponte e um regulador linear para obter uma tensão saída desejada do sistema.

Pouco tempo depois, SCHENCK (2001) comprovaram que circuitos conversores CC-CC são duas vezes mais eficientes do que circuitos reguladores linear, eles utilizaram um conversor *forward* CC-CC para extrair a máxima potência do sistema. Porém do ponto de vista prático, este circuito se tornou inviável, visto que utilizavam um indutor de 105 H. Ottman et al. (2002) propôs e implantou melhorias na razão cíclica do conversor *buck* e amenizou o problema da indutância alta.

O conversor *buck* utilizado por Ottman, Hofmann e Lesieutre (2003) foi dimensionado para garantir menor consumo de energia e com um controle simples, ou seja, ele opera

no modo de condição descontínua. Vale lembrar que o desafio de utilizar um conversor CC-CC destes é gerar um sinal de controle adaptativo, que funcione independentemente da carga conectada, e com componentes que apresentem baixo consumo, uma vez que o sistema não pode consumir mais do que produz.

Pensando em consumo, [Lefeuvre et al. \(2007\)](#) desenvolveram um circuito de controle simples para o conversor *buck-boost* e sem a necessidade de sensores, diminuindo o consumo e melhorando a eficiência.

Neste mesmo caminho, [Tabesh e Frechette \(2010\)](#) projetaram um circuito adaptativo de baixo consumo, com um dobrador de tensão trabalhando junto com o conversor *boost*, o que permitiu a extração da potência máxima através da tensão da carga fixa, que é controlada por uma realimentação da tensão de saída, independente da carga e dos parâmetros do PZT, tal circuito é mostrado na Figura 5.1.

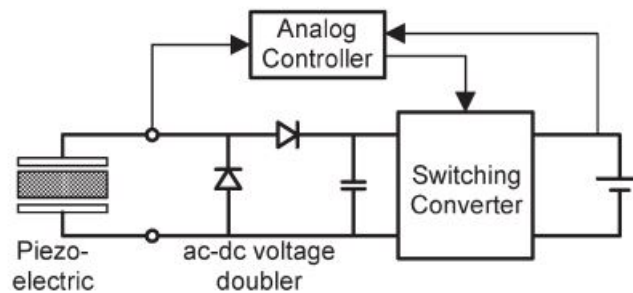


Figura 5.1 – Circuito adaptativo de baixo consumo
([TABESH; FRECHETTE, 2010](#))

Outra técnica para controle adaptativo utilizando um conversor CC-CC é o algoritmo *maximum power point tracking* (MPPT). Segundo [Babaa, Armstrong e Pickert \(2014\)](#), é uma das técnicas mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos e tem como objetivo alcançar o valor máximo do produto entre tensão e corrente, em outras palavras, a potência máxima.

Os primeiros a utilizar esta técnica em um sistema PEH foram [Chao, Tsui e Ki \(2007\)](#), e mostraram que o circuito é mais eficiente com a tensão de saída variável e não como era feito para emular a resistência ótima, usando a tensão fixa na metade do valor da tensão em aberto.

Alguns autores ainda utilizaram da técnica do MPPT em outras situações, [Kong e Ha \(2012\)](#) utilizaram o MPPT para extrair o máximo de potência com o sistema operando fora da frequência de ressonância, enquanto [Sankman e Ma \(2015\)](#), utilizaram diversas amplitudes de vibração.

Segundo [Souza \(2018\)](#), embora estes autores terem se preocupado em projetar circuitos de controle com baixo consumo, estes ainda consomem mais do que o circuito

emulador de resistência ótima e a potência extraída pelo sistema é pouca coisa superior, assim, não se pode afirmar que esta técnica tenha o melhor custo-benefício.

Na tentativa de solucionar o problema de eficiência do conversor CC-CC, [Kwon e Rincon-Mora \(2009\)](#) e [Kwon e Rincon-Mora \(2010\)](#), propuseram um circuito para a conversão direta CA-CC, ao invés de utilizar os circuitos convencionais, retificador em ponte e depois um conversor CC-CC. Tal circuito se torna mais eficiente por utilizar menos componentes semicondutores, porém o circuito de controle se torna mais complexo ao precisar de mais sinais para o chaveamento.

Alguns autores foram além, [Tzu-Chi Huang et al. \(2014\)](#) propuseram a integração do conversor direto CA-CC com a técnica MPPT e [Sudha M et al. \(2016\)](#) utilizaram o conversor para maximizar a captação fora da frequência de ressonância.

5.2 Chaveamento Sincronizado (*Synchronous Switching*)

O chaveamento sincronizado ou (*synchronous switching*), é uma técnica que faz com que a tensão do piezelétrico fique em fase com a corrente, de modo que o produto entre a tensão e corrente seja o maior possível, ou seja, que gere a máxima potência. Essa sincronização é obtida trocando a polaridade da tensão através de chaveamento na mesma. ([SOUZA, 2018](#))

Normalmente esses circuitos utilizam elementos não lineares, como chaves e indutores. Os principais circuitos que utilizam essa técnica serão apresentados neste trabalho e são eles: *Parallel Synchronous Switch Harvesting on Inductor* (SSHI em paralelo), *Series Synchronous Switch Harvesting on Inductor* (SSHI em série) e *Synchronous Electric Charge Extraction* (SECE), porém antes disso, será apresentado o circuito retificador de onda completa em ponte, que serve de base para o desenvolvimento destes citados anteriormente.

5.2.1 Retificador de onda completa em ponte

Base e parte integrante do chaveamento sincronizado, os retificadores de onda completa em ponte são apresentados na Figura 5.2, onde o PZT é representado por uma fonte de corrente I_S com um capacitor C_P em paralelo, a carga é representado por um capacitor C_L em paralelo com a resistência R_L , e considerando que a capacitância do capacitor C_L é muito maior do que a do capacitor C_P , a tensão de *ripple* é praticamente nula, resultando em uma tensão de saída constante $V_{out} = V_p - 2V_D$.

O funcionamento do retificador em ponte é simples, a cada semiciclo do sinal gerado pelo PZT, apenas dois diodos conduzem e permitem a passagem de corrente para a carga.

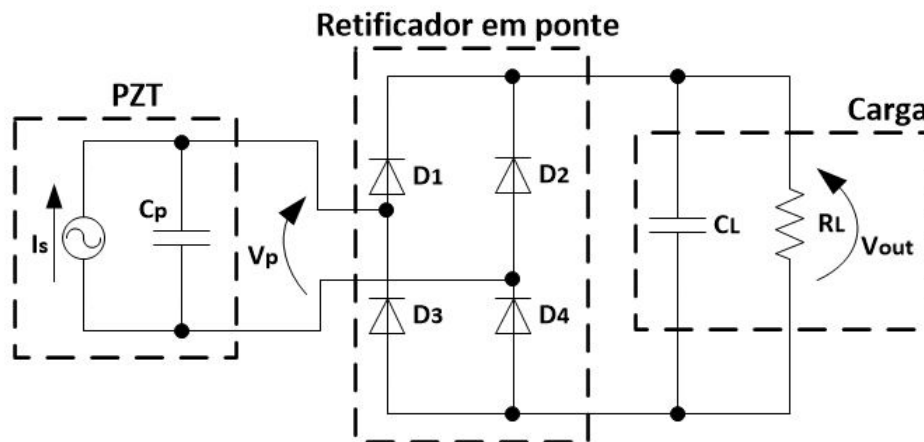


Figura 5.2 – Retificador de onda completa em ponte

5.2.2 SSHI - *Synchronous Switch Harvesting on Inductor*

Proposta por [Guyomar et al. \(2005\)](#), a técnica SSHI consiste em adicionar um dispositivo de chaveamento em paralelo com o elemento piezelétrico, como mostrado na Figura 5.3.

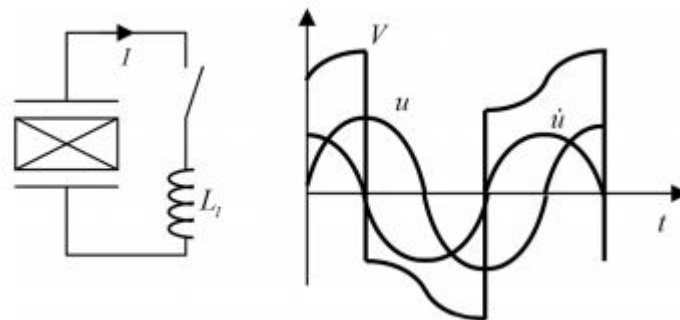


Figura 5.3 – Dispositivo não linear e formas de onda típicas de tensão, deslocamento e velocidade sem carga.

([GUYOMAR et al., 2005](#))

Este dispositivo é composto de uma chave e uma indutância L_I conectada em série. A chave permanece quase sempre aberta, exceto quando um deslocamento extremo ocorre. Neste instante, a chave é fechada, então a capacitância C_O do PZT e a indutância L_I constituem um oscilador. A chave é mantida fechada até que a tensão reversa no PZT diminua.

Tal dispositivo pode ser conectado ao PZT de duas formas, em paralelo (SSHI em paralelo) ou em série (SSHI em série), estas duas formas são apresentadas nas seções a seguir, e em ambas configurações, a chave é fechada quando a corrente passa por zero, ou analogamente, quando o deslocamento atinge seu valor máximo positivo ou negativo, como já apresentado na Figura 5.3, e o indutor é responsável por transferir a energia para

a carga, que antes era consumida internamente pelo PZT.

Comparado-o com o retificador em ponte, o circuito SSHI é mais eficiente e consegue extrair mais potência do sistema, porém a dissipação de energia é maior, pois utiliza mais componentes semicondutores, tentando amenizar esse problema, [Garbuio et al. \(2009\)](#) propuseram um circuito SSHI em série utilizando transformadores ao invés de indutores, denominado *Series Synchronous Switch Harvesting on Inductor with Magnetic Rectifier* (SSHI-MR), apresentado na Figura 5.4, permitindo uma redução drástica das perdas de energia em componentes discretos como diodos pelo uso de um processamento não linear original.

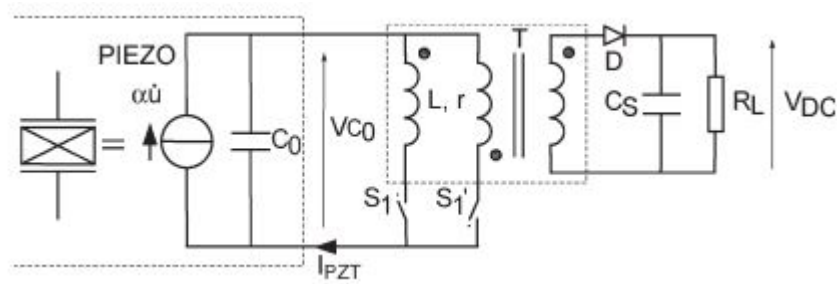


Figura 5.4 – Circuito SSHI-MR
(GARBUIO et al., 2009)

[Lallart et al. \(2011\)](#) propuseram a mistura do SSHI em paralelo com o SSHI-MR, o que chamaram de SSHI Híbrido, conforme mostrado na Figura 5.5.

O circuito SSHI Híbrido permite a colheita quatro vezes por período enquanto duas vezes nos casos anteriores durante a inversão e funcionamento do retificador, quando a tensão retificada for menor do que a tensão máxima do PZT, operação SSHI em paralelo, caso contrário, apenas o SSHI-MR está operando. Embora o SSHI Híbrido não melhorar ainda mais o aprimoramento da conversão, permite ampliar a largura de banda da carga.

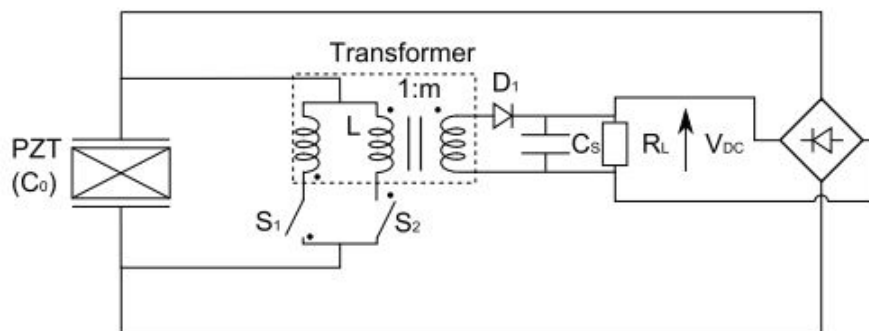


Figura 5.5 – Circuito SSHI Híbrido
(LALLART et al., 2011)

Com o mesmo intuito de reduzir o número de diodos no circuito, [Kushino e Koizumi](#)

(2014) utilizaram um SSHI em paralelo e substituíram o retificador em ponte por um dobrador de tensão.

Ramadass e Chandrakasan (2010) apresentaram uma solução para outro problema apresentado pela topologia SSHI, que é a necessidade da utilização de sensores para auxiliar o chaveamento no circuito de controle. A solução apresentada é um circuito compacto e eficiente, composto por um retificador e um conversor CC-CC.

Visando eficiência no consumo de energia, Luo (2010) propôs um circuito de controle de chaveamento suave, sendo até cinco vezes mais eficiente do que a técnica passiva convencional fora da frequência de ressonância. Souza (2011) também propôs um circuito simples de baixo consumo, o circuito é formado por resistores, capacitores e comparadores, e utiliza a derivada da tensão no PZT para determinar o sinal de controle.

Liang e Liao (2012) propuseram uma modificação a partir de um SSHI em paralelo, para *self-powered* SSHI, ou seja, SP-SSHI e chegaram a conclusão de que é viável a utilização de do sistema SSHI em paralelo ao invés do retificador em ponte convencional, quando o sistema for excitado com altos valores.

Utilizando um retificador ativo com transistores no lugar do retificador em ponte convencional, Hsieh, Chen e Chen (2015) modificaram tanto o circuito SSHI em paralelo quanto o SSHI em série, em busca de maior extração de potência fora da frequência de ressonância, e conseguiram resultados experimentais com aumento de até 23% na largura de banda.

Assim como Hsieh, Chen e Chen (2015) fizeram, Stein e Hofmann (2015) também propuseram um circuito para aumentar a largura de banda utilizando a técnica SSHI em paralelo e um retificador ativo, onde o indutor é conectado em série com o PZT. Algum tempo depois, Wu et al. (2017) simplificaram o circuito de controle e melhoraram o consumo de energia do circuito proposto por Stein e Hofmann (2015), utilizando dois transistores e dois diodos no lugar dos quatro transistores anteriormente utilizados.

5.2.2.1 SSHI em paralelo

O circuito SSHI em paralelo, também conhecido como retificador *bias-flip*, é composto pelo retificador de onda completa em ponte com uma chave e um indutor conectados em série entre si e em paralelo com o PZT, como mostrado na Figura 5.6, onde o objetivo do indutor, assim como no série é inverter a polaridade do capacitor interno C_P toda vez que a corrente I_S mudar de sentido.

Resumidamente, a chave S é fechada toda vez que a corrente no PZT, I_S , passar por zero ou estiver nos seus pontos de máximo, positivo ou negativo. Assim que a chave S fecha, o capacitor C_P é conectado em série com o indutor L_1 que é responsável por inverter a polaridade da tensão no PZT. Quando a chave é aberta, a corrente I_S termina de

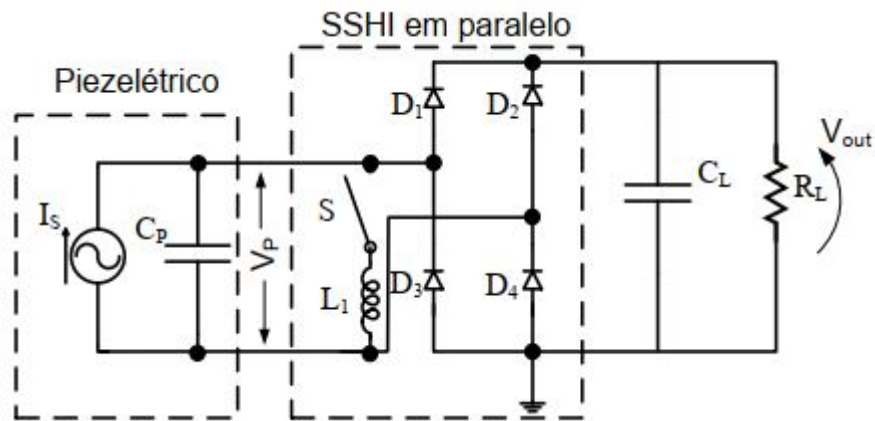


Figura 5.6 – Circuito SSHI em paralelo
(SOUZA, 2018)

carregar o capacitor C_P , logo após, a dupla de diodos responsáveis pelo semiciclo entram em ação e permitem a passagem de corrente para a carga.

5.2.2.2 SSHI em série

O circuito SSHI em série é semelhante ao SSHI em paralelo, mas ao invés de conectar a chave e o indutor em paralelo com o PZT e o retificador, eles são conectados em série, como mostrado na Figura 5.7.

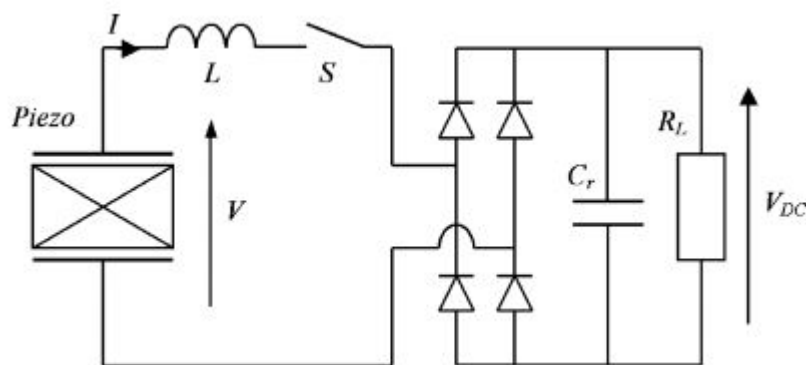


Figura 5.7 – Circuito SSHI em série
(LEFEUVRE et al., 2006)

O controle da chave S é igual ao controle descrito no para o circuito SSHI em paralelo, na Seção 5.2.2.1. Na maior parte do tempo, o elemento piezelétrico, PZT, está em trabalhando com circuito aberto. Cada vez que a chave é fechada, uma parte da energia armazenada no bloqueio do capacitor C_O é transferido para o capacitor C_r através do retificador em ponte. Nesses instantes, ocorrem inversões de tensão no PZT. (LEFEUVRE et al., 2006)

Comparando o princípio de operação dos dois circuitos SSHI apresentados, o funcionamento do circuito SSHI em paralelo consiste em inverter a tensão após um processo de extração de energia, enquanto o circuito SSHI em série a inversão e extração de energia ocorrem ao mesmo tempo.

Também pode-se observar que a abordagem do circuito SSHI em série pode ser obtida substituindo o indutor L por um transformador, o que permite uma alteração artificial na carga vista pelo PZT. Esta abordagem foi proposta por (GARBUIO et al., 2009), é chamada de *Series Synchronous Switch Harvesting on Inductor with Magnetic Rectifier* (SSHI-MR), conforme já mencionado no trabalho.

5.2.3 SECE

Proposto por Lefevre et al. (2005), o método *Synchronous Electric Charge Extraction* (SECE), consiste em sincronizar a extração de energia com o ponto de máxima vibração, onde a carga não é conectada diretamente no PZT, e conseqüentemente a potência extraída não depende da carga. A Figura 5.8 apresenta o circuito SECE proposto.

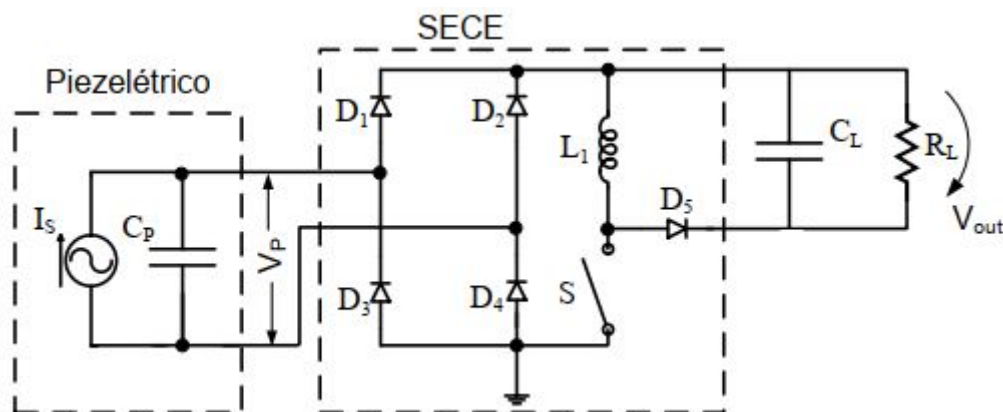


Figura 5.8 – Circuito SECE
(SOUZA, 2018)

O circuito SECE é composto por um retificador em ponte mais um conversor CC-CC, um *buck-boost* que por sua vez é constituído pela chave S , o indutor L_1 e o diodo D_5 . A carga é representada por um capacitor C_L em paralelo com o resistor R_L . O objetivo do circuito é transferir a energia do sistema sem conectar a carga diretamente no PZT, assim a potência extraída independe da carga conectada ao sistema.

De acordo com Souza (2018), o circuito SECE apresenta eficácia apenas quando o fator de acoplamento piez elétrico é baixo, este é um parâmetro do sistema mecânico que quantifica a potência elétrica extraída em relação aos parâmetros do PZT, já mencionado no trabalho.

Na busca por melhorias no circuito SECE, [Lallart et al. \(2008\)](#) apresentaram um circuito novo utilizando uma combinação dos circuitos SSHI em série e SECE, e denominaram de *Double Synchronized Switch Harvesting* (DSSH), conforme Figura 5.9.

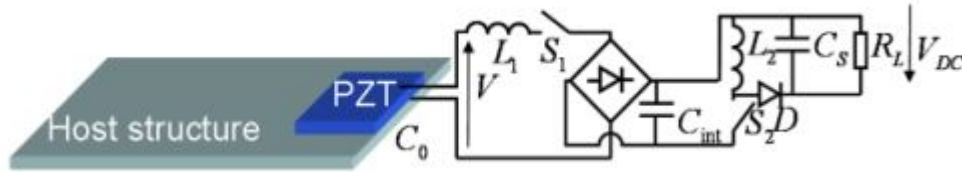


Figura 5.9 – Circuito DSSH
Adaptado de [Guyomar e Lallart \(2011\)](#)

[Kwon e Rincon-Mora \(2012\)](#) também propuseram melhorias ao circuito SECE, uma realimentação do PZT aumentando a tensão, com o intuito de aumentar a extração de potência, porém, deve-se atentar para o consumo de energia, que também aumenta, mas não pode superar a capacidade gerada pelo sistema.

Um circuito de controle capaz de detectar os deslocamentos máximo e mínimo de vibração e acionar os interruptores eletrônicos de forma síncrona foi proposto por [Wu et al. \(2014\)](#) para o circuito SECE, assim como uma análise levando em consideração a potência dissipada e a influência do atraso no acionamento das chaves do circuito de controle.

[Romani, Filippi e Tartagni \(2014\)](#) utilizaram o circuito SECE para o chaveamento e sincronização de três transdutores piezoelétricos. Os três são conectados ao mesmo indutor por meio do chaveamento, fazendo com que a energia transferida para a carga pelo indutor seja três vezes maior, se comparada a um circuito com apenas um PZT. Para que isso ocorra, cada PZT precisa ser conectado ao indutor no instante de máxima vibração, consequentemente, cada PZT precisa estar ligado a uma estrutura com frequência de ressonância diferente uma da outra, e ainda precisa do circuito de controle para realizar a sincronização, o que inviabiliza a implementação do circuito.

Assim como [Hsieh, Chen e Chen \(2015\)](#), [Lefeuvre et al. \(2017\)](#) também apresentaram uma nova técnica de controle para o circuito SECE, objetivando a melhora de extração de potência fora da frequência de ressonância, onde a fase do sinal de controle pode ser variada de acordo com a frequência de excitação do sistema. Com essa estratégia nova, o circuito SECE passou a ser eficiente não só para valores baixos do fator de acoplamento piezoelétrico, e sim para todos os valores.

5.3 Circuito Proposto

O circuito proposto neste trabalho consiste em basicamente realizar o casamento de impedância entre o transdutor piezoelétrico e a carga, utilizando como base o circuito

conversor CA-CC *boost* apresentado na Figura 5.10. Um MOSFET é utilizado para o chaveamento do circuito em questão.

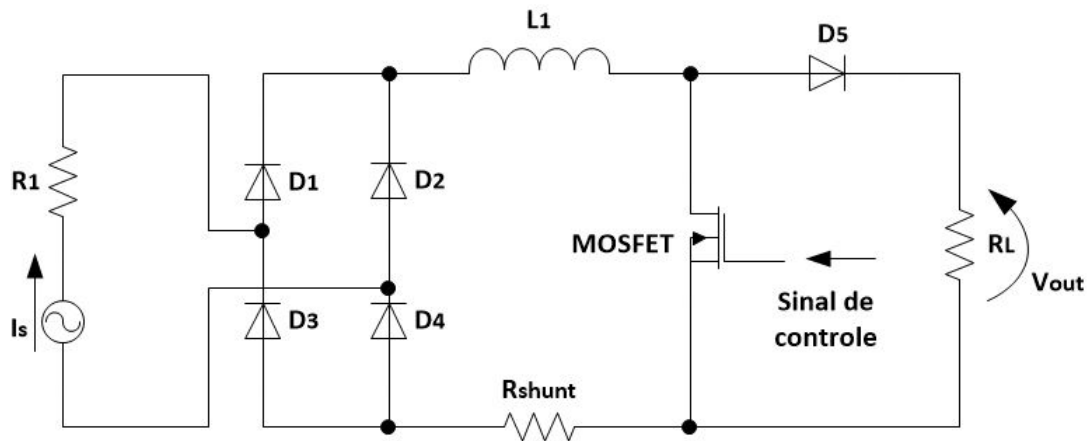


Figura 5.10 – Conversor CA-CC *Boost*

O sinal de controle do chaveamento do MOSFET é realizado por histerese, conforme as formas de onda apresentadas na Figura 5.11, tendo duas correntes como referência, uma corrente de referência inferior e a outra superior, a ideia é manter a corrente IL dentro dos limites, maior que o limite inferior e menor que o limite superior, realizando o chaveamento do circuito.

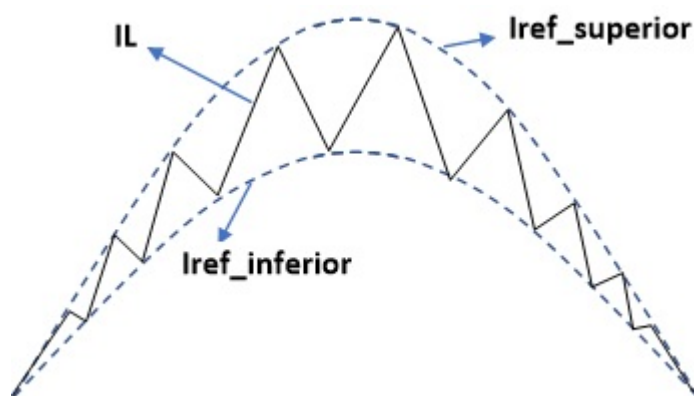


Figura 5.11 – Principais formas de onda da corrente de entrada e das referências superior e inferior do sinais de controle por histerese

A Figura 5.12 apresenta o circuito responsável pela geração dos sinais de referência superior e inferior, 10 % para mais e para menos, podendo ser ajustados conforme os ganhos dos amplificadores operacionais. O sinal a ser comparado com os sinais de referência superior e inferior, é proveniente do resistor *shunt*, Figura 5.10, e amplificado antes da etapa de comparação.

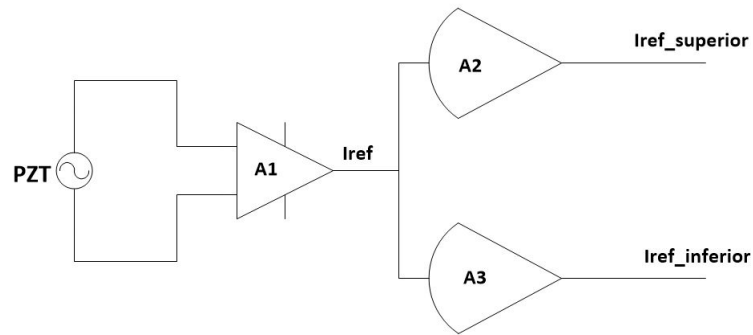


Figura 5.12 – Circuito de geração de sinal de referência

$$V_{REF} = V_{sensor} \cdot A_{REF} \quad (5.1)$$

O circuito de amostra da corrente é realizada por meio de um resistor shunt (R_{shunt}) e um circuito de amplificação cujo sinal amplificado (V_{SA}) é dado por:

$$V_{SA} = A_S \cdot I_L \cdot R_S \quad (5.2)$$

A lei de controle impõe $V_{SA} = V_{REF}$, fazendo $V_{SA} = V_{REF}$, o casamento de impedância é obtido para:

$$\frac{V_{sensor}}{I_L} = Z_{sensor} = \frac{A_S \cdot R_S}{A_{REF}} \quad (5.3)$$

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta todos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho.

Conforme diagrama apresentado na Figura 6.1, o sistema utilizado nos experimentos é composto por uma fonte de alimentação, um amplificador, um gerador de sinais, o *shaker*, a estrutura cantilever, dois acelerômetros, a placa de aquisição de sinais e um notebook. Basicamente através do gerador de sinais é possível ajustar a amplitude e a frequência do sinal, que depois de ser amplificado, chega ao *shaker*, fazendo com que a estrutura cantilever se movimente para cima e para baixo, gerando sinal no transdutor piezelétrico, que por sua vez é amostrado e analisado pela placa de aquisição e pelo notebook, respectivamente.

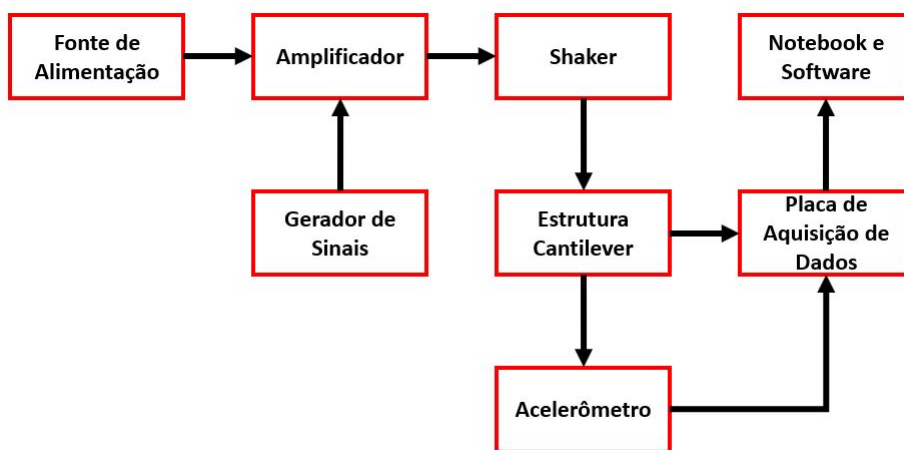


Figura 6.1 – Fluxograma do sistema utilizado nos experimentos

Os experimentos práticos foram realizados utilizando os equipamentos apresentados na Figura 6.2, os experimentos consistiram em basicamente variar o diâmetro dos transdutores piezelétricos e conseqüentemente a largura e comprimento das barras de alumínio presas a base quadrada de acrílico fixada no *shaker*.

As medidas aquisitadas pela placa de aquisição foram realizadas através de dois acelerômetros e pelos próprios transdutores piezelétricos. Um acelerômetro foi posicionado na ponta da barra, já o outro foi fixado na base da estrutura, ou seja, foi possível realizar as medidas de aceleração em dois pontos distintos da estrutura, na base e na ponta, podendo ser feitas diversas comparações.

Utilizando as medidas de largura, comprimento e espessura dos materiais utilizados no experimento, foi possível utilizar o *software Ansys* para simular a estrutura cantilever e observar as frequências de ressonância. Para tal, foi simulado três condições específicas

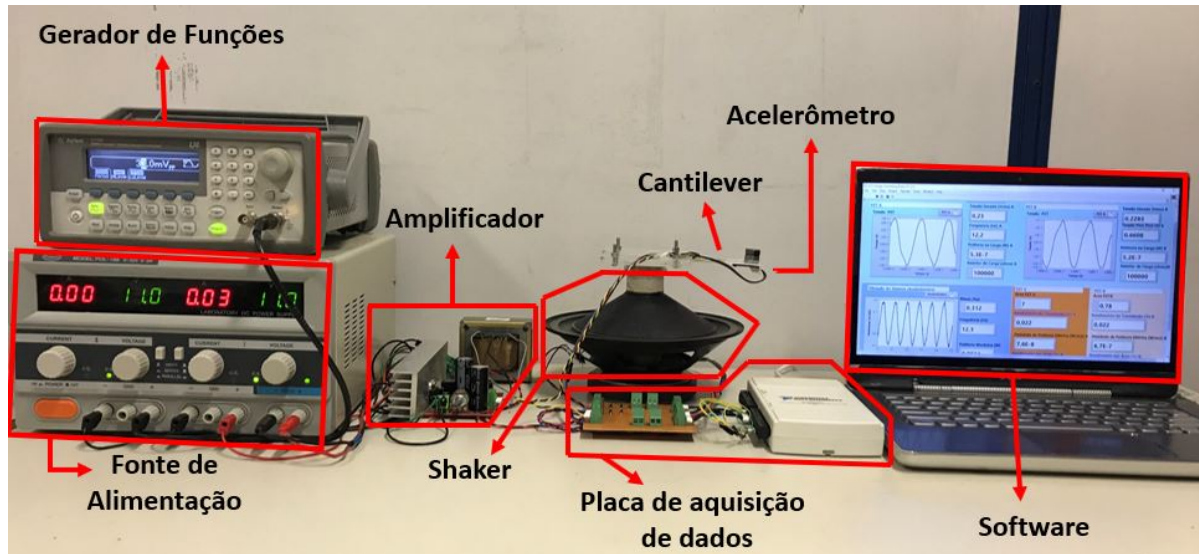


Figura 6.2 – Sistema utilizado nos experimentos

conforme apresentado na Tabela 6.1:

Tabela 6.1 – Condições da estrutura Cantilever para simulações e experimentos práticos

<i>Transdutor</i>	Largura(mm)	Comprimento(mm)	Espessura(mm)	Massa de prova(g)
10mm	16	37,5	0,3	9,40
20mm	30	57,5	0,3	9,40
25mm	40	65	0,3	13,14

A Figura 6.3 apresenta as três variações de barras utilizadas nos experimentos.

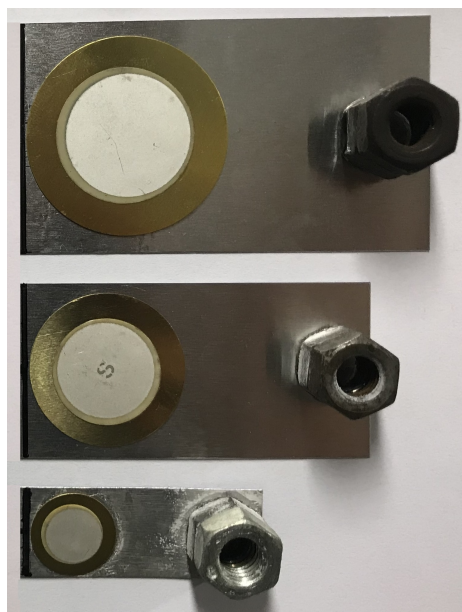


Figura 6.3 – Barras utilizadas nos experimentos

Vale lembrar que a nomenclatura dos transdutores utilizados referem-se as medidas de diâmetro útil de cada transdutor piezelétrico, ou seja, o diâmetro do material piezelétrico do transdutor é menor do que seu diâmetro total, portanto, o transdutor comercial de 15 mm possui um diâmetro útil de 10 mm, o de 27 mm, possui 20 mm e o transdutor de 41 mm possui 25 mm de diâmetro útil, conforme apresentado na Figura 6.4.

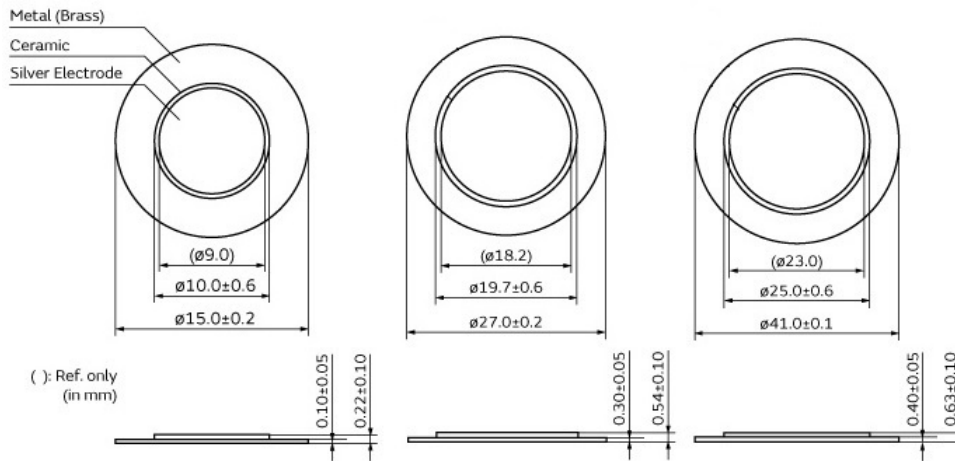


Figura 6.4 – Transdutores piezelétricos de 10, 20 e 25mm de diâmetro útil
Adaptado de (MURATA, 2012)

6.1 Simulação Barras

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nas simulações com as barras..

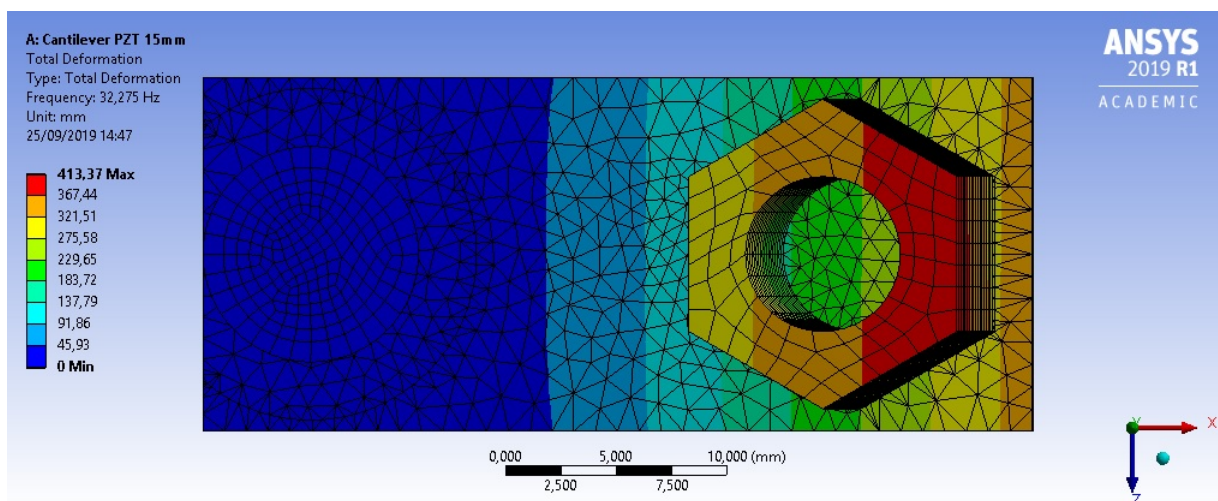


Figura 6.5 – Frequência de ressonância para o transdutor de 10 mm simulada no ANSYS

As Figuras 6.5, 6.6 e 6.7 apresentam as frequências de ressonância da estrutura cantilever para o transdutor de 10, 20 e 25 mm de diâmetro, respectivamente, resultados

obtidos através de simulações no *Ansys*, e como mostrado na Tabela 6.1, para cada tamanho de transdutor, as especificações de largura e comprimento da estrutura cantilever são alteradas.

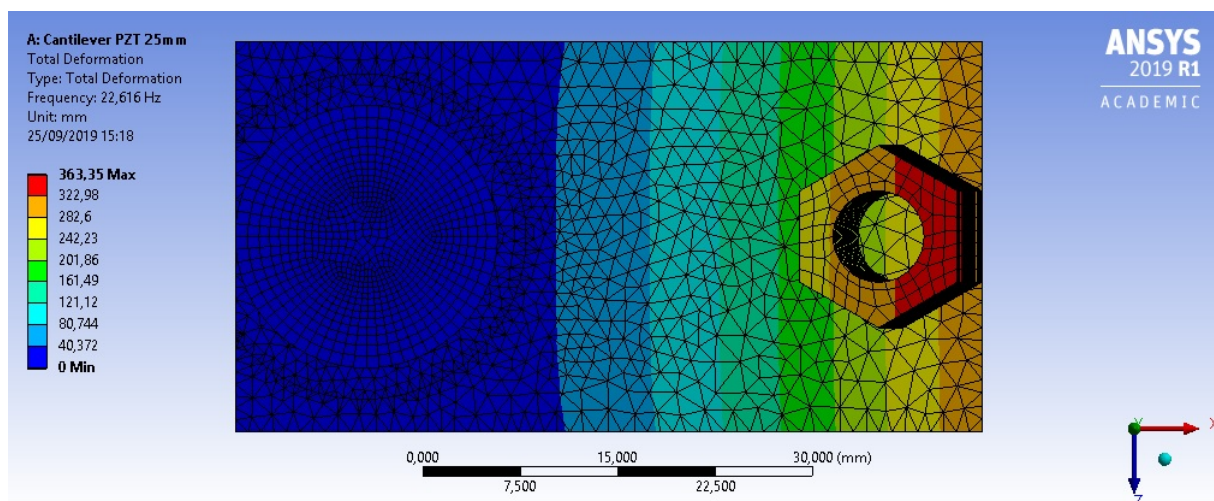


Figura 6.6 – Frequência de ressonância para o transdutor de 20mm simulada no *ANSYS*

Como resultado das simulações obteve-se os valores de 32,27 Hz, 22,61 Hz e 20,05 Hz de frequência de ressonância para os transdutores de 10, 20 e 25 mm, respectivamente.

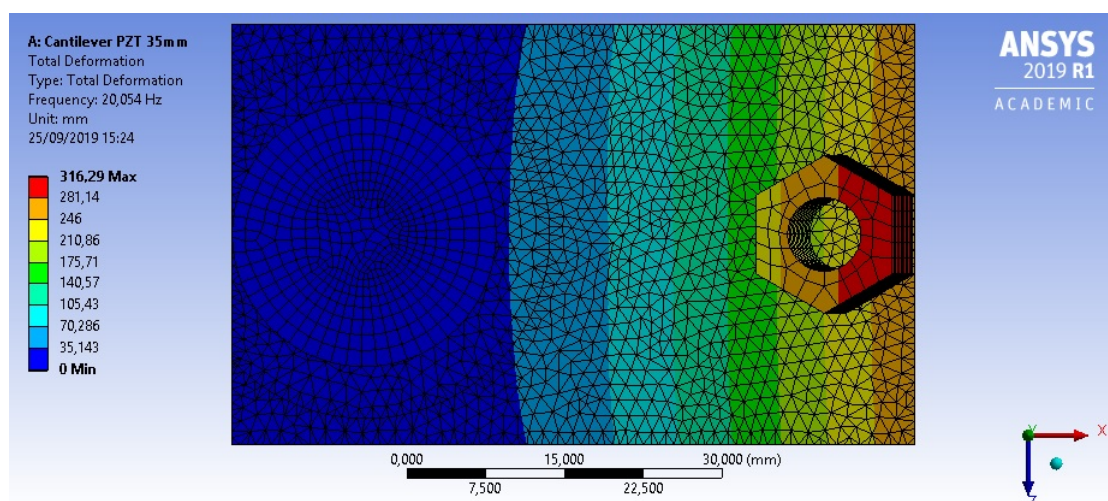


Figura 6.7 – Frequência de ressonância para o transdutor de 25 mm simulada no *ANSYS*

O resumo das frequências de ressonância obtidas através das simulações no *Ansys* é apresentado na Tabela 6.2.

Experimentalmente, para cada tamanho de transdutor, foi excitado com um sinal *Chirp*, aplicado na base da estrutura, *shaker*, durante alguns segundos, varrendo uma faixa de frequência de 5 a 100 Hz, e através do *LabView* a placa de aquisição de sinais, amostrou-se os dados dos dois acelerômetros instalados na estrutura, normalizando a

Tabela 6.2 – Frequências de ressonância obtidas utilizando as simulações no *Ansys*

<i>Transdutor</i>	Frequência de Ressonância (Hz)
10 mm	32,27
20 mm	22,61
25 mm	20,05

aceleração na base e na ponta do sistema, obtendo assim as máximas amplitudes nas respectivas frequências de ressonância de 32,1 Hz para o transdutor de 10 mm, 17,7 Hz para o transdutor de 20 mm e 23 Hz para o transdutor de 25 mm.

6.2 Simulação Circuito

A Figura 6.8 apresenta a simulação do circuito proposto no *software* Simulink. Para obter o casamento de impedância a corrente de referência é gerada a partir da amostra da senoide retificada. O ganho do amplificador da geração da corrente de referência deve ser ajustado como:

$$A_1 = \frac{1}{Z_{sensor}} \quad (6.1)$$

Onde Z_{sensor} é resistência série do sensor.

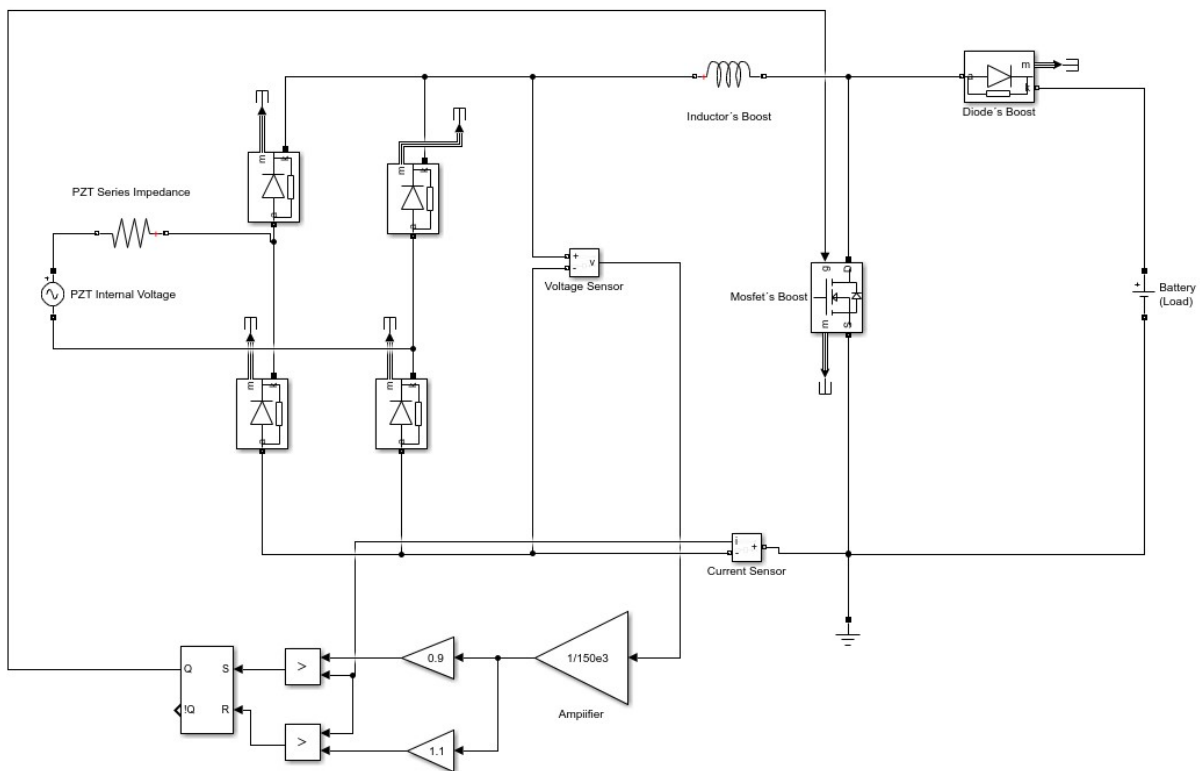


Figura 6.8 – Simulação do circuito proposto

A Figura 6.9 mostra a corrente de referência I_{ref} e a corrente de entrada, I_L , obtidas da simulação. Pode-se observar que a corrente de entrada rastreia a corrente de referência, validando o controle de *loop* de corrente proposto. Como a tensão de entrada não é tão alta, é possível observar um tempo morto devido à barreira de tensão, V_D , do diodo 0,7 V. O valor da corrente foi ajustado para ter o valor de $13 \mu A$ mas que o resultado foi um pouco abaixo devido a queda de tensão no diodo. Apesar disso, a razão da corrente e da tensão de entrada do conversor é igual a impedância série do sensor, validando o casamento de impedância para a máxima transferência de potência como esperado.

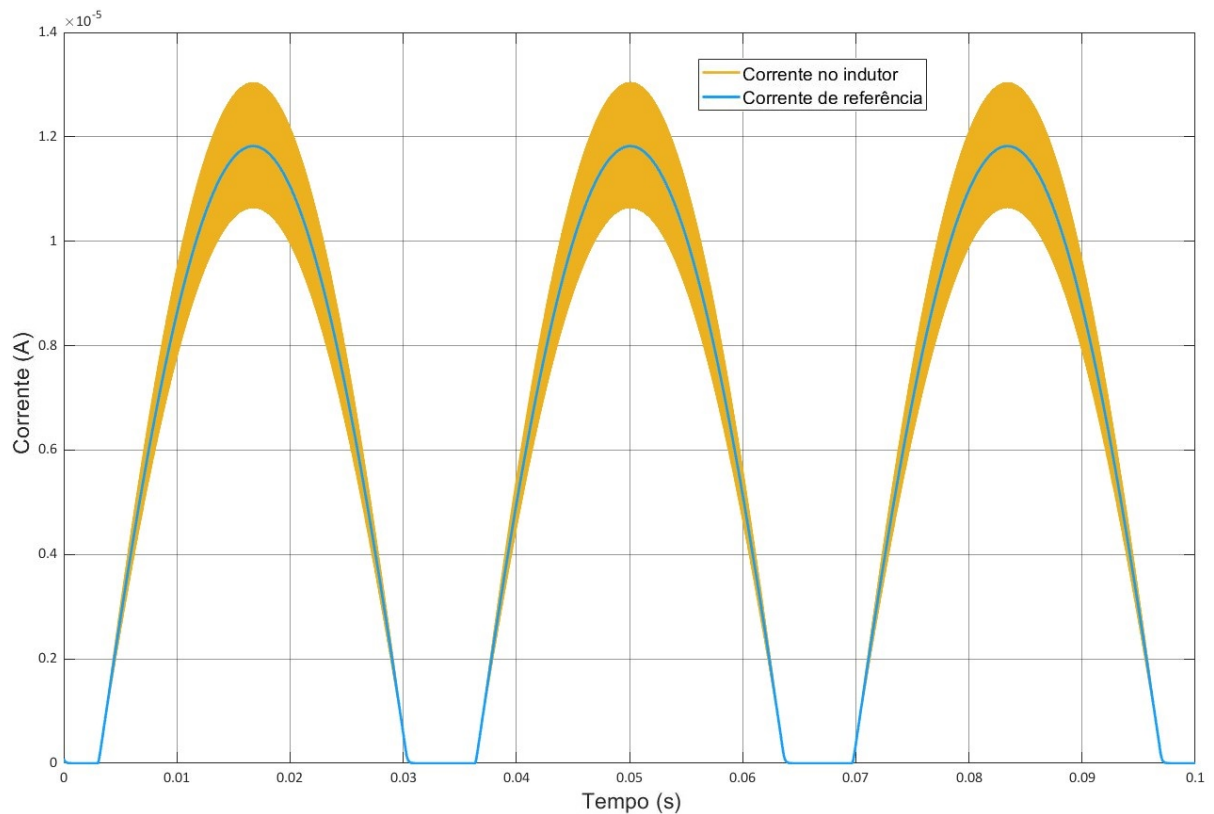


Figura 6.9 – Correntes de entrada e de referência para $V_D = 0,7 V$

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este Capítulo, apresenta os resultados das simulações realizadas no software *Ansys*, os experimentos práticos realizados em bancada e os cálculos realizados com o auxílio do software *MATLAB*, comparando-os.

Vale ressaltar que todos os resultados obtidos e apresentados nesta seção, foram obtidos através de experimentos realizados com os mesmos valores de carga para cada transdutor e com o sistema vibrando em suas respectivas frequências de ressonância, conforme mencionado no Capítulo 6 e apresentado na Figura 7.1.

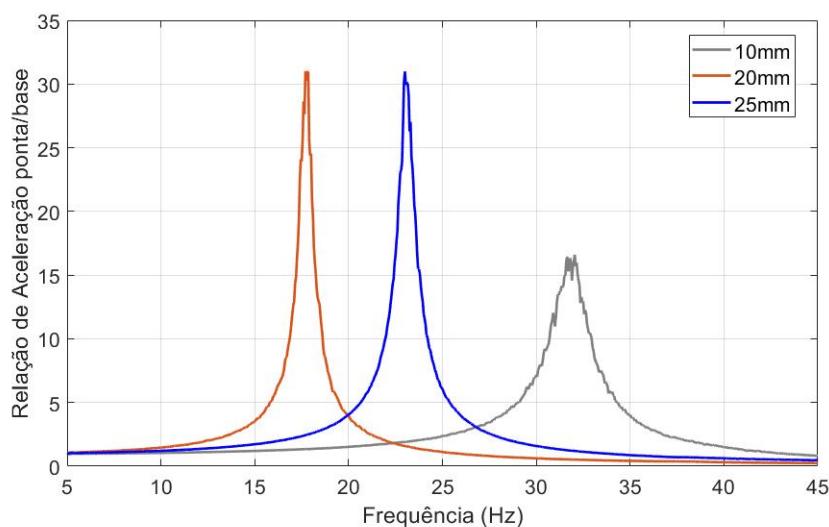


Figura 7.1 – Frequência de ressonância para os 3 transdutores

Os resultados apresentados foram obtidos acionando o cantilever na frequência de ressonância de cada barra, Tabela 7.1, e fixando-se aceleração de 1g na massa de prova.

Tabela 7.1 – Frequências de ressonância obtidas através de simulações no *Ansys* e experimentalmente com as barras

<i>Transdutores</i>	Simulação (Hz)	Experimentos (Hz)
10 mm	32,27	32,1
20 mm	22,61	17,7
25 mm	20,05	23

A Figura 7.2 mostra a tensão gerada em função da carga resistiva para as três barras e transdutores de tamanhos diferentes. A máxima tensão encontrada é de 9,3 V para o transdutor de 25 mm, 1,6 V para o transdutor de 20 mm e de 3,08 V para o

transdutor de 10 mm. A máxima tensão obtida é para carga resistiva de $1 M\Omega$, que se aproxima da medida em circuito aberto.

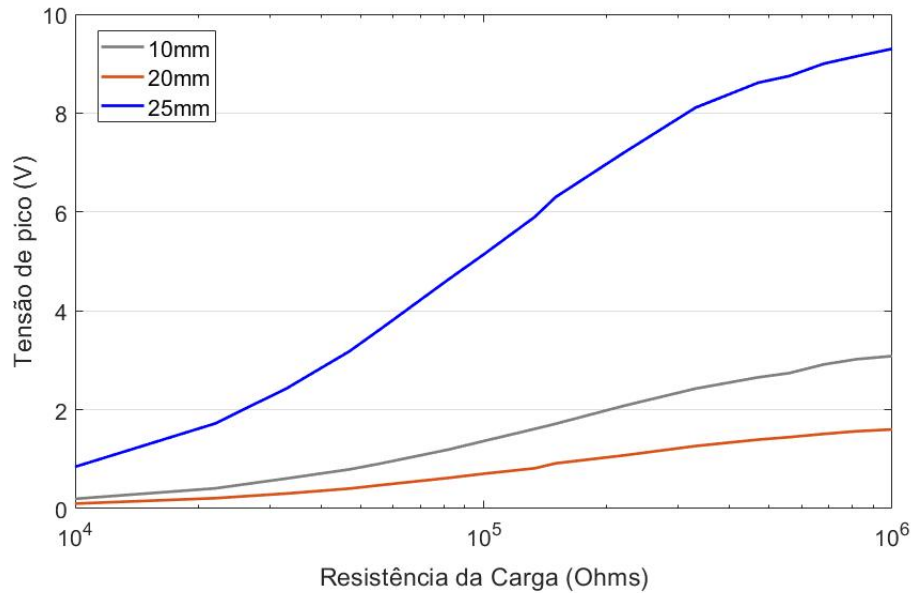


Figura 7.2 – Tensão de Pico gerada nos 3 transdutores piezelétricos

A Figura 7.3 mostra a potência na carga resistiva variando a resistência de carga entre $10 k\Omega$ até $1 M\Omega$. Nos três transdutores a máxima transferência de potência ocorre para resistência de carga no valor de $150 k\Omega$.

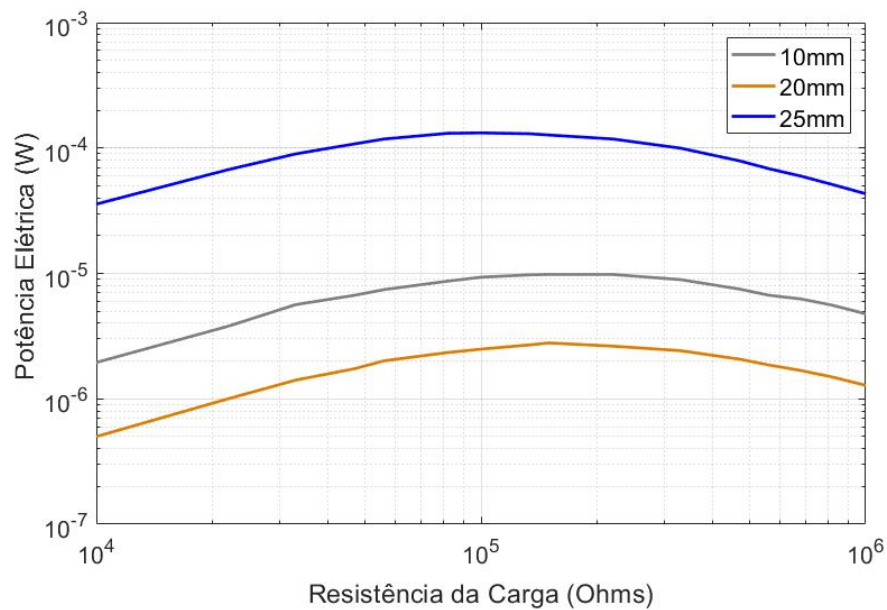


Figura 7.3 – Potência Elétrica gerada nos 3 transdutores

As máximas potências geradas foram $9,81 \mu W$, $2,79 \mu W$ e $132 \mu W$ nas lâminas com os transdutores de 10, 20 e 25 mm respectivamente.

A densidade de área dos transdutores pode ser observada na Figura 7.4 e na Figura 7.5. Embora não tenha sido realizado projeto das lâminas com o objetivo de otimização, mas sim mantendo o tamanho da lâmina proporcional as dimensões dos transdutores, comparando a máxima potência gerada no transdutor maior de 25 mm com o transdutor médio de 20mm observa-se que a relação entre as potências máximas geradas é aproximadamente a relação das áreas do transdutores. Entretanto a máxima potência gerada no transdutor menor não segue a relação das áreas ativas dos transdutores.

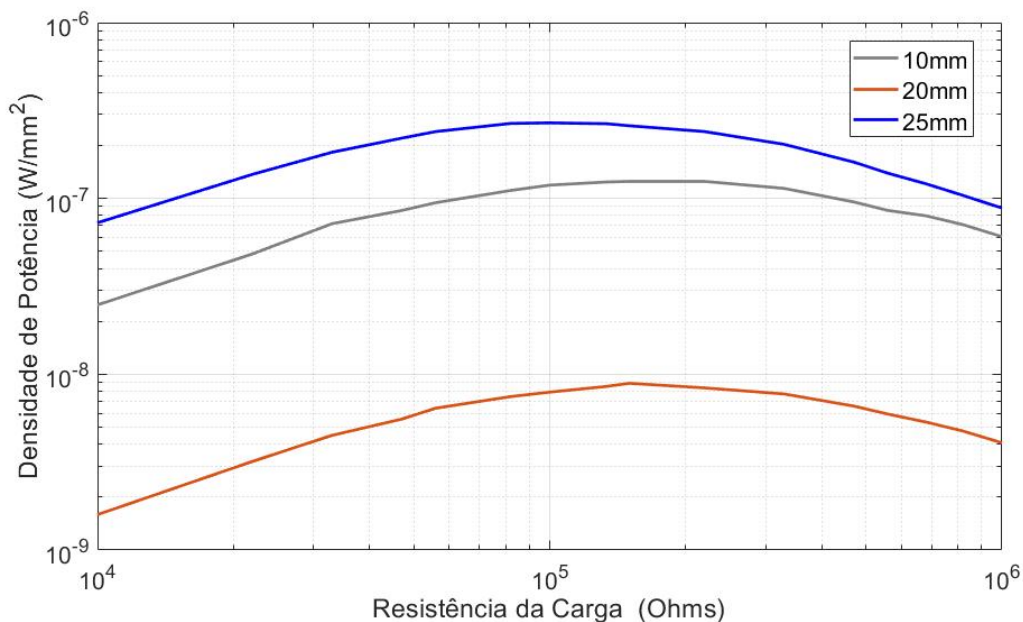


Figura 7.4 – Densidade de área dos 3 transdutores

Assim como a densidade de área, a densidade volumétrica dos 3 transdutores é apresentada na Figura 7.7, onde o transdutor de 25 mm apresenta maior eficiência seguido pelo de 10 mm, e bem mais abaixo aparece o transdutor de 20 mm com um desempenho inferior aos anteriores.

A Figura 7.6 apresenta a área relativa dos 3 transdutores estudados, tendo como base o transdutor com maior área, o transdutor de 25 mm. Assim o transdutor de 20 mm possui 64% da área e por último o transdutor de 10 mm com apenas 16% da área do transdutor maior.

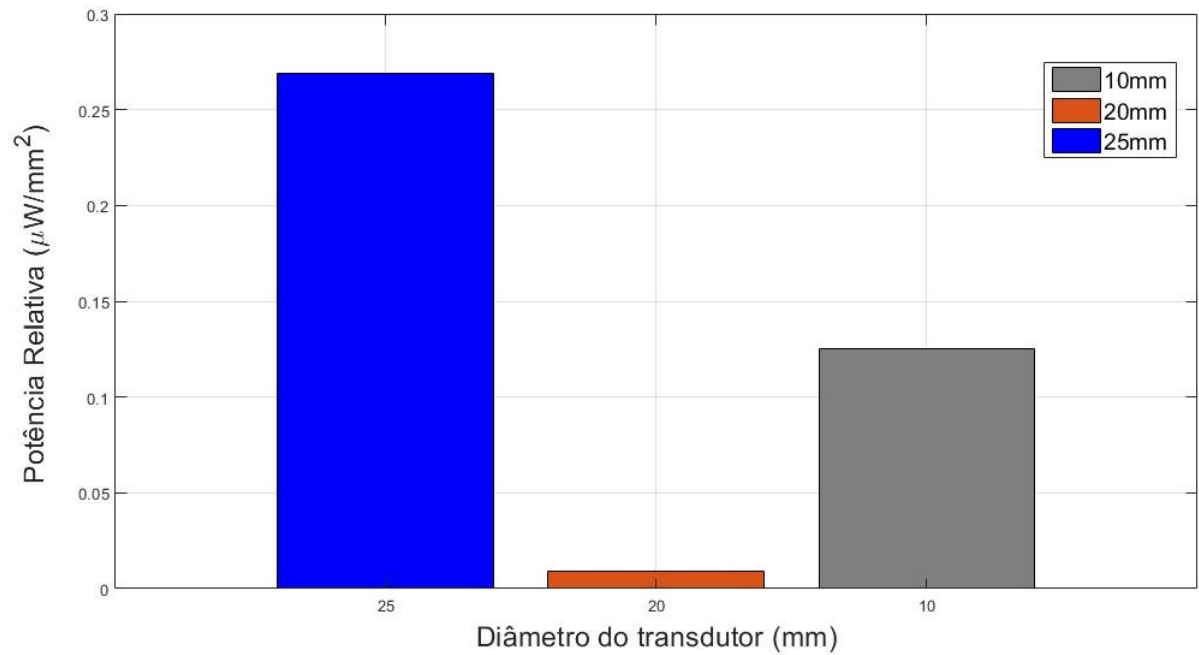


Figura 7.5 – Potência gerada por unidade de área

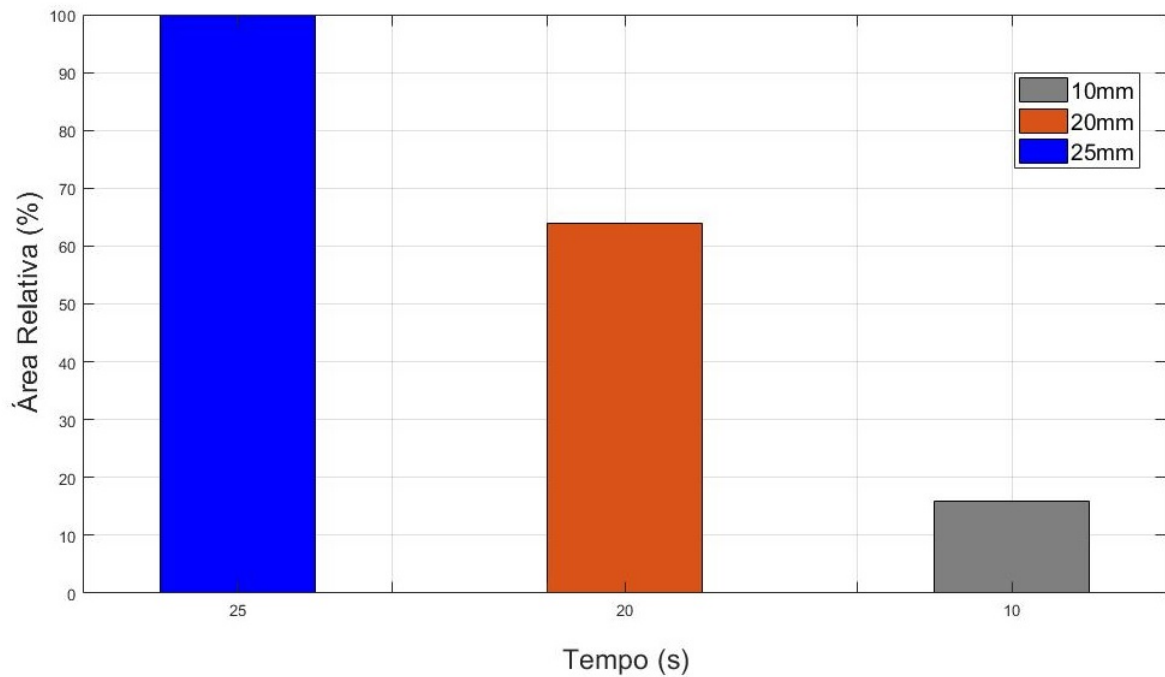


Figura 7.6 – Área relativa dos 3 transdutores

A Figura 7.8 apresenta a máxima potência gerada por unidade de volume ativo dos transdutores e a Figura 7.9 mostra a proporção entre os volumes dos transdutores. Assim como já mencionado para as medidas de área dos transdutores, mantendo o tamanho da lâmina proporcional as dimensões dos transdutores, comparando a máxima potência

gerada no transdutor de 25 mm com o transdutor de 20mm, observa-se que a relação entre as potências máximas geradas é aproximadamente a relação dos volumes dos transdutores, o que não ocorre para o transdutor de 10 mm, ou seja, sua máxima potência gerada não segue a relação dos volumes dos transdutores.

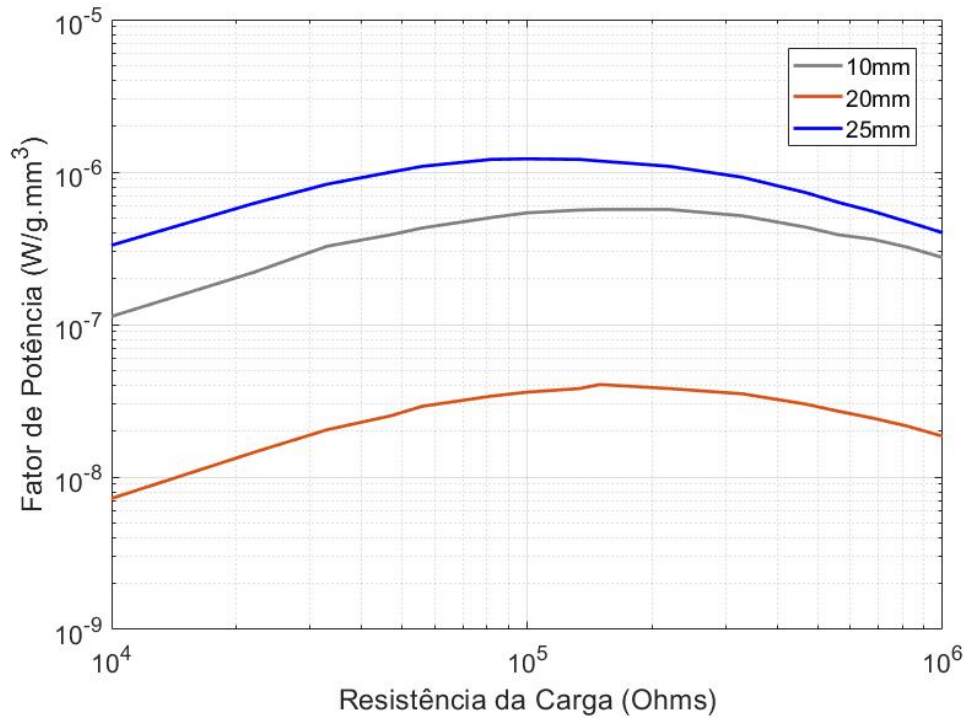


Figura 7.7 – Densidade volumétrica dos 3 transdutores

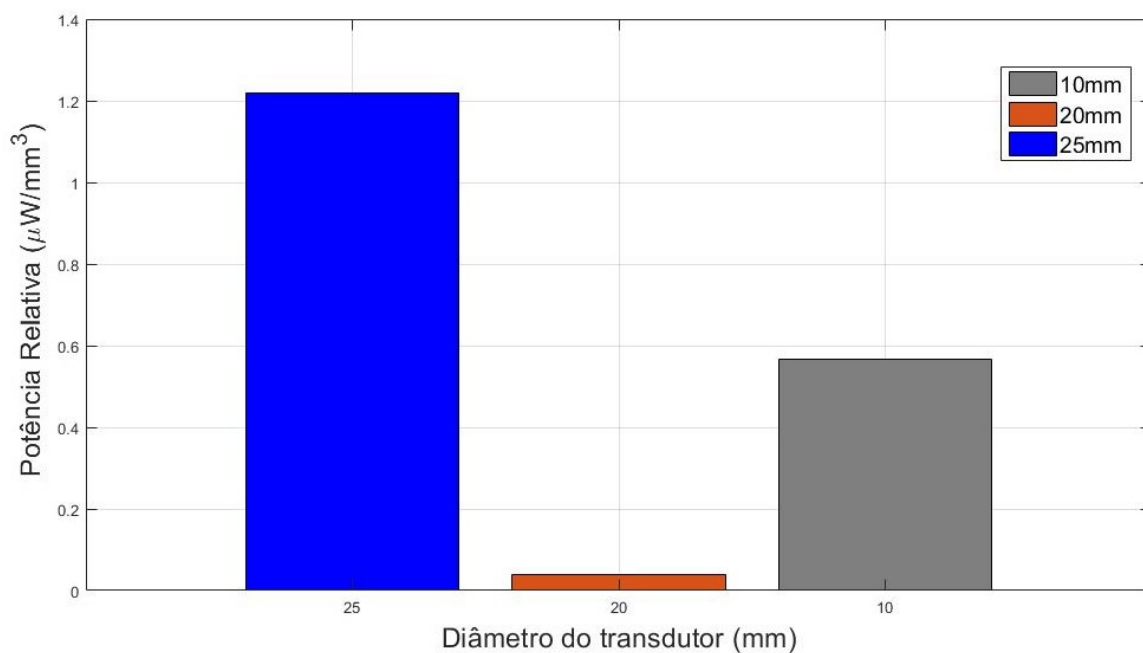


Figura 7.8 – Potência gerada por unidade de volume

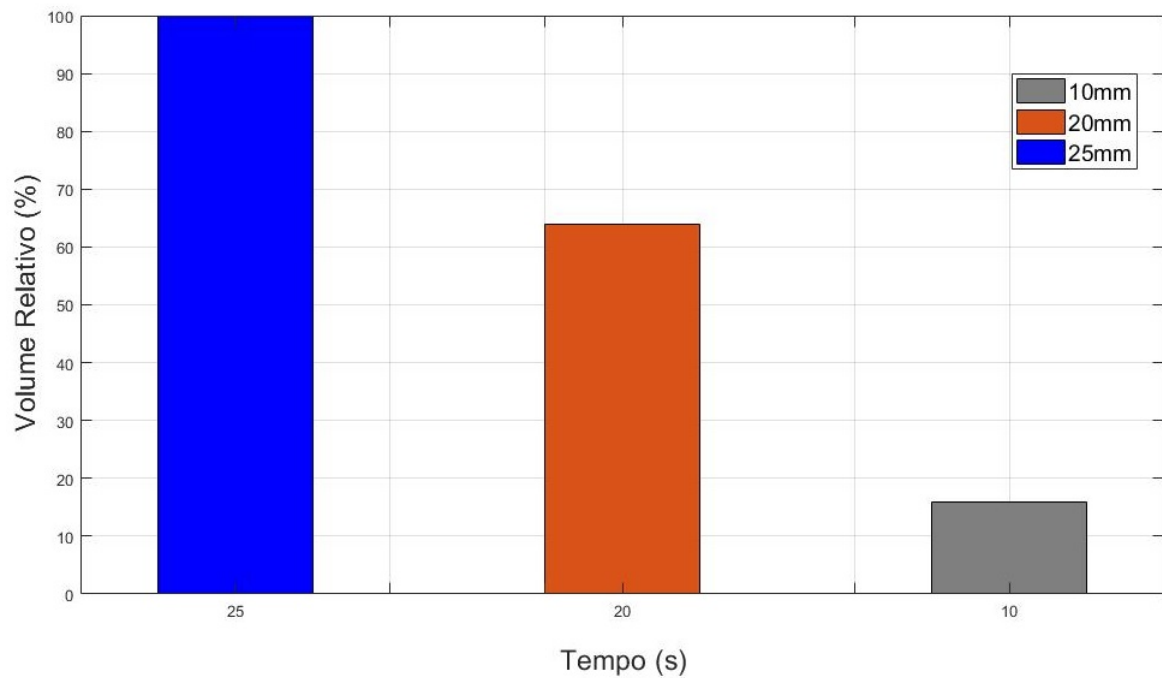


Figura 7.9 – Volume relativo dos 3 transdutores

A comparação entre diversos tipos de dispositivos ressonantes é apresentada na Tabela 7.2, onde são descritos o material piezelétrico utilizado no experimento, o modo de excitação, o volume total do transdutor, o volume do material piezelétrico, a frequência de ressonância do sistema, o valor da resistência de carga utilizada, a tensão de saída, a densidade de potência de saída e na última coluna o fator de potência, ou seja, a densidade de potência de saída normalizada com a aceleração do sistema, definida como $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Tabela 7.2 – Comparação de dispositivos ressonantes

Adaptado de (CALIÒ et al., 2014)

Autor	f_n [Hz]	R_L [Ω]	V_{OUT} [V]	Potência [W/cm ³]	Fator de Potência [W/(g ² cm ³)]
Marzencki (2008)	$1,4 \times 10^3$	650×10^3	1,6	4×10^{-3}	248×10^{-6}
Ng e Liao (2005)	212,5	$9,9 \times 10^3$	-	77×10^{-6}	$1,4 \times 10^{-6}$
Jeon et al. (2005)	$13,9 \times 10^{-3}$	$5,2 \times 10^6$	2,4 DC	-	-
Park et al. (2011)	118,1	$4,5 \times 10^6$	4,7	136×10^{-6}	543×10^{-6}
	130,8	11×10^3	0,77	$1,9 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-3}$
Kim et al. (2013)	243	2×10^3	2rms	$1,6 \times 10^{-3}$	$6,4 \times 10^{-3}$
	243	$9,9 \times 10^3$	1,5rms	2×10^{-3}	$8,1 \times 10^{-3}$
Zhao et al. (2012)	73	$2,2 \times 10^6$	6,2	51×10^{-6}	-
Wang e Liu (2011)	45	$1,6 \times 10^6$	19×10^{-3}	87×10^{-6}	$67,8 \times 10^{-3}$
Ren et al. (2010)	-	91×10^6	11,3	29×10^{-6}	189×10^{-9}
Wang (2006)	10×10^6	500×10^6	8×10^{-3}	4×10^{-6}	624×10^{-15}
Zhou e Apo (2013)	22,5	4×10^6	-	494×10^{-6}	$17,1 \times 10^{-3}$
Delnavaz (2014)	1,5	10×10^6	-	364×10^{-6}	-
	32,1	150×10^3	1,71	$5,68 \times 10^{-4}$	$5,9 \times 10^{-6}$
	17,7	150×10^3	0,915	$4,04 \times 10^{-5}$	$419,5 \times 10^{-9}$
Paulo	23	150×10^3	5,14	$1,22 \times 10^{-3}$	$12,7 \times 10^{-6}$

Observamos que comparativamente a densidade volumétrica de potência dos transdutores utilizados de baixo custo é da ordem de mW à dezenas de μW e portanto, tem característica similar aos demais transdutores publicados na literatura. Os transdutores caracterizados apresentaram fator de potência da ordem de $\mu\text{W}/\text{g}^2\text{cm}^3$. Embora o valor do fator de potência dos transdutores ensaiados não está entre os de maior desempenho na literatura, cabe ressaltar que neste trabalho tanto o transdutor quanto o cantilever não foram projetados de forma otimizada.

A Figura 7.10 mostra as mesmas correntes, mas agora reduzindo para $0,1\text{ V}$ a barreira de tensão do diodo. Para simulação usando $V_D = 0,7\text{ V}$, a potência de saída simulada obtida foi de $113,5\ \mu\text{W}$ ou 86% da transferência máxima de potência com carga resistiva ideal, conforme Figura 6.9.

A eficiência do circuito com a técnica utilizada é de 86% da máxima transferência de potência no caso de em que o transdutor gera 5 V de pico e considerando $0,7\text{ V}$ de queda de tensão. Reduzindo para $0,1\text{ V}$ a queda de tensão nos diodos, a potência de saída aumenta para $120\ \mu\text{W}$ e a eficiência para $90,9\%$ da transferência máxima de potência com carga resistiva ideal, conforme Figura 7.10. Este resultado mostra que embora apresente um circuito para casamento de impedância, a ponte retificador ainda é um elemento importante na eficiência total do circuito.

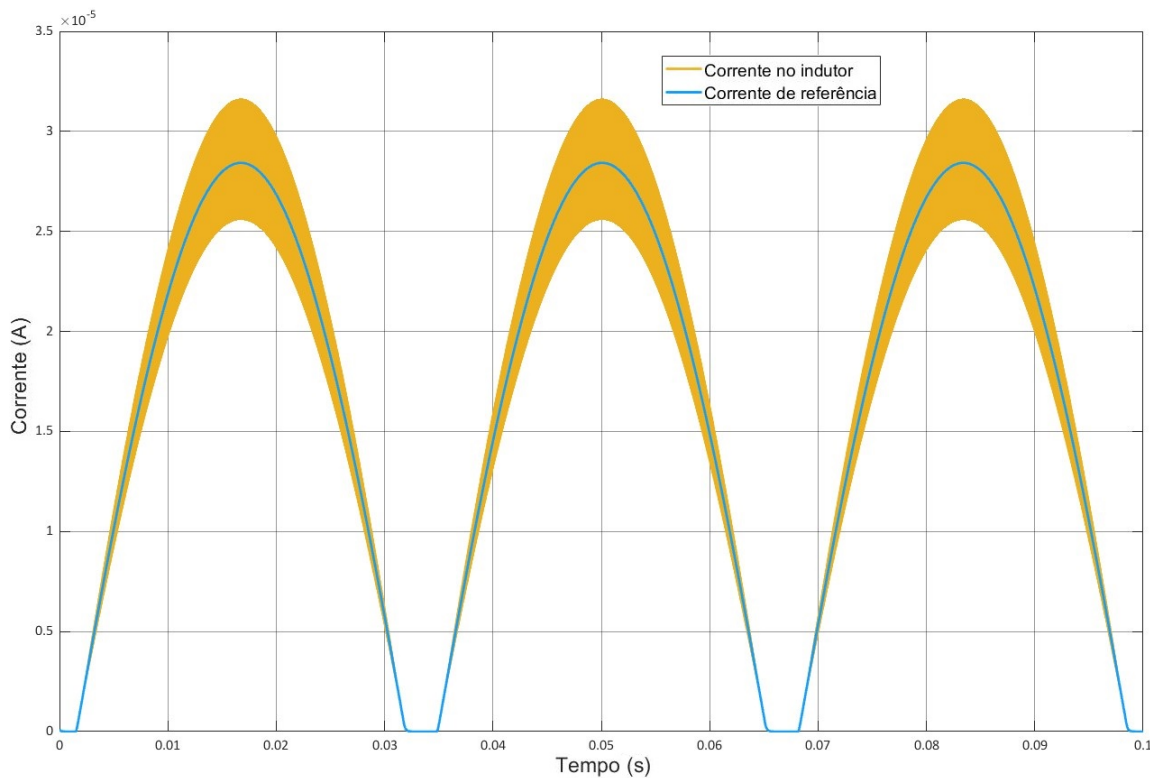


Figura 7.10 – Correntes de entrada e de referência para $V_D = 0,1\text{ V}$

No Capítulo 8 a seguir, são apresentadas as conclusões deste trabalho.

8 CONCLUSÃO

A coleta de energia piezoelétrica é um importante campo de pesquisa para desenvolver fontes alternativas de energia para redes de sensores de baixa potência e aplicações eletrônicas vestíveis. Neste trabalho, diafragmas piezoelétricos de baixo custo foram caracterizados para aplicações de coleta de energia. Três tamanhos diferentes de transdutores foram realizados, gerando $9,81 \mu W$, $2,79 \mu W$ e $132 \mu W$ para tamanhos pequeno, médio e grande, respectivamente.

Encontramos a densidade de energia elétrica de $125 nW/mm^2$, $8,88 nW/mm^2$ e $269 nW/mm^2$ para os tamanhos pequeno, médio e grande, operando em suas respectivas frequências de ressonância, $32,1 \text{ Hz}$, $17,7 \text{ Hz}$ e 23 Hz . Embora seja possível associar vários tamanhos pequenos desse tipo de diafragma para obter alta geração de energia elétrica, descobrimos que o uso de tamanhos maiores desses transdutores leva a uma maior densidade de energia elétrica gerada, portanto, para a mesma área disponível, é preferível um tamanho maior de transdutor.

O circuito de condicionamento de alta eficiência proposto é um conversor CA-CC que funciona com alto fator de potência e controle de corrente de histerese. O controle de corrente permite escolher adequadamente o valor de referência da corrente de entrada, emulando assim uma carga resistiva ideal para um melhor casamento de impedância, e conseqüentemente, a transferência máxima de potência para a carga.

Utilizando resultados da caracterização cantilever, foram realizadas simulações para validar o circuito de condicionamento de alta eficiência proposto. Os resultados das simulações mostram uma potência de saída de $113,5 \mu W$ ou 86% da transferência máxima de potência com carga resistiva ideal. A queda de tensão nos diodos do retificador, V_D , é o principal meio de perda de energia, principalmente devido à baixa tensão gerada (5 V). Reduzindo para $0,1 \text{ V}$ a tensão de queda nos diodos, a potência de saída simulada aumenta para $120 \mu W$ ou 90,9% da máxima transferência de potência com carga resistiva ideal.

8.1 Trabalhos Publicados durante o Mestrado

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

- JUNIOR, P.A.F.; CAMPOS, F.S.; CASTRO, B.A.; ULSON, J.A.C.; BAPTISTA, F.G.; ANDREOLI, A.L. Low-Cost Piezoelectric Sensor Characterization of Energy Harvesting Applications. *Proceedings*, v.4, n.1, p.25, nov. 2018. ISSN 2504-3900.

Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2504-3900/4/1/25>>.

Resumos expandidos publicados em anais de congressos

- JUNIOR, P.A.F.; CAMPOS, F.S. Caracterização de Sensores PZTs de Baixo Custo para Aplicações de Energy Harvesting. In: VIII Seminário da Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2018, Bauru. Anais do VIII Seminário da Pós-graduação em Engenharia Elétrica (2018), 2018.
- JUNIOR, P.A.F.; CAMPOS, F.S. Caracterização de Sensores PZTs de Baixo Custo para Aplicações de Energy Harvesting. In: IX Seminário da Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2019, Bauru. Anais do IX Seminário da Pós-graduação em Engenharia Elétrica (2019), 2019.

REFERÊNCIAS

ABROL, S.; CHHABRA, D. Harvesting piezoelectricity using different structures by utilizing fluid flow interactions. *International Journal of RD in Engineering, Science And Management*, v. 5, p. 13, 06 2017.

ALEMANY, C. et al. Automatic iterative evaluation of complex material constants in piezoelectric ceramics. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 27, n. 1, p. 148–155, jan. 1994. ISSN 0022-3727, 1361-6463. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0022-3727/27/i=1/a=023?key=crossref.4e30ce466965a3413ce6e97e08ce5b42>>.

ALMOUAHED, S. et al. The Use of Piezoceramics As Electrical Energy Harvesters Within Instrumented Knee Implant During Walking. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 16, n. 5, p. 799–807, out. 2011. ISSN 1083-4435, 1941-014X. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5942169/>>.

AMIRTHARAJAH, R.; CHANDRAKASAN, A. Self-powered signal processing using vibration-based power generation. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, v. 33, n. 5, p. 687–695, maio 1998. ISSN 00189200. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/668982/>>.

BABAA, S. E.; ARMSTRONG, M.; PICKERT, V. Overview of Maximum Power Point Tracking Control Methods for PV Systems. *Journal of Power and Energy Engineering*, v. 02, n. 08, p. 59–72, 2014. ISSN 2327-588X, 2327-5901. Disponível em: <<http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/jpee.2014.28006>>.

CALIÒ, R. et al. Piezoelectric Energy Harvesting Solutions. *Sensors*, v. 14, n. 3, p. 4755–4790, mar. 2014. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/3/4755>>.

CHAO, L.; TSUI, C. Y.; KI, W. H. Vibration energy scavenging and management for ultra low power applications. In: *Proceedings of the 2007 international symposium on Low power electronics and design - ISLPED '07*. Portland, OR, USA: ACM Press, 2007. p. 316–321. ISBN 978-1-59593-709-4. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1283780.1283848>>.

DELNAVAZ. Energy Harvesting for In-Ear Devices Using Ear Canal Dynamic Motion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 61, n. 1, p. 583–590, jan. 2014. ISSN 0278-0046, 1557-9948. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6420936/>>.

DETERRE, M. et al. Micro Blood Pressure Energy Harvester for Intracardiac Pacemaker. *Journal of Microelectromechanical Systems*, v. 23, n. 3, p. 651–660, jun. 2014. ISSN 1057-7157, 1941-0158. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6627938/>>.

DO, Y. H. et al. Preparation on transparent flexible piezoelectric energy harvester based on PZT films by laser lift-off process. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 200, p. 51–55, out. 2013. ISSN 09244247. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424712006516>>.

DUTOIT, N. E.; WARDLE, B. L.; KIM, S.-G. DESIGN CONSIDERATIONS FOR MEMS-SCALE PIEZOELECTRIC MECHANICAL VIBRATION ENERGY HARVESTERS. *Integrated Ferroelectrics*, v. 71, n. 1, p. 121–160, jul. 2005. ISSN 1058-4587, 1607-8489. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10584580590964574>>.

ERTURK, A.; INMAN, D. On Mechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 19, n. 11, p. 1311–1325, nov. 2008. ISSN 1045-389X, 1530-8138. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X07085639>>.

ERTURK, A.; INMAN, D. J. *Piezoelectric energy harvesting*. Chichester: Wiley, 2011. OCLC: 723496345. ISBN 978-1-119-99135-9 978-0-470-68254-8 978-1-119-99116-8 978-1-119-99115-1.

FERNANDES, E. *Design, Modelling, and Fabrication of a Low Frequency Piezoelectromagnetic Energy Harvester*. Tese (Thesis) — University of Waterloo, Ontario, Canada, 2017.

GARBUIO, L. et al. Mechanical Energy Harvester With Ultralow Threshold Rectification Based on SSHI Nonlinear Technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 56, n. 4, p. 1048–1056, abr. 2009. ISSN 0278-0046. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4776514/>>.

GRANSTROM, J. et al. Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps. *Smart Materials and Structures*, v. 16, n. 5, p. 1810–1820, out. 2007. ISSN 0964-1726, 1361-665X. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/16/5/036>>.

GU, L. et al. Flexible Fiber Nanogenerator with 209 V Output Voltage Directly Powers a Light-Emitting Diode. *Nano Letters*, v. 13, n. 1, p. 91–94, jan. 2013. ISSN 1530-6984, 1530-6992. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nl303539c>>.

GUYOMAR, D. et al. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 52, n. 4, p. 584–595, abr. 2005. ISSN 0885-3010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1428041/>>.

GUYOMAR, D.; LALLART, M. Recent Progress in Piezoelectric Conversion and Energy Harvesting Using Nonlinear Electronic Interfaces and Issues in Small Scale Implementation. *Micromachines*, v. 2, n. 2, p. 274–294, jun. 2011. ISSN 2072-666X. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-666X/2/2/274>>.

HEHN, T.; MANOLI, Y. *CMOS circuits for piezoelectric energy harvesters: efficient power extraction, interface modeling and loss analysis*. Dordrecht: Springer, 2015. (Springer series in advanced microelectronics, 38). OCLC: 890371193. ISBN 978-94-017-9288-2 978-94-017-9287-5.

HSIEH, P.-H.; CHEN, C.-H.; CHEN, H.-C. Improving the Scavenged Power of Nonlinear Piezoelectric Energy Harvesting Interface at Off-Resonance by Introducing Switching Delay. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 30, n. 6, p. 3142–3155, jun. 2015. ISSN 0885-8993, 1941-0107. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6847731/>>.

HWANG, S. J. et al. Designing and manufacturing a piezoelectric tile for harvesting energy from footsteps. *Current Applied Physics*, v. 15, n. 6, p. 669–674, jun. 2015. ISSN 15671739. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1567173915000474>>.

JEON, Y. et al. MEMS power generator with transverse mode thin film PZT. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 122, n. 1, p. 16–22, jul. 2005. ISSN 09244247. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424705000683>>.

JIANG, X. et al. Piezoelectric energy harvesting from traffic-induced pavement vibrations. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 6, n. 4, p. 043110, jul. 2014. ISSN 1941-7012. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4891169>>.

KANG, M.-G. et al. Recent Progress on PZT Based Piezoelectric Energy Harvesting Technologies. *Actuators*, v. 5, n. 1, p. 5, fev. 2016. ISSN 2076-0825. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2076-0825/5/1/5>>.

KARAMI, M. A. et al. Experimental and analytical parametric study of single-crystal unimorph beams for vibration energy harvesting. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 58, n. 7, p. 1508–1520, jul. 2011. ISSN 0885-3010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5954005/>>.

KHENG, Y.; KUMAR, S. Review of Energy Harvesting Technologies for Sustainable WSN. In: TAN, Y. K. (Ed.). *Sustainable Wireless Sensor Networks*. InTech, 2010. ISBN 978-953-307-297-5. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/sustainable-wireless-sensor-networks/review-of-energy-harvesting-technologies-for-sustainable-wsn>>.

KIM, H. W. et al. Piezoelectric Energy Harvesting under High Pre-Stressed Cyclic Vibrations. *Journal of Electroceramics*, v. 15, n. 1, p. 27–34, set. 2005. ISSN 1385-3449, 1573-8663. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10832-005-0897-z>>.

KIM, S.-B. et al. Comparison of MEMS PZT Cantilevers Based on d_{31} and d_{33} Modes for Vibration Energy Harvesting. *Journal of Microelectromechanical Systems*, v. 22, n. 1, p. 26–33, fev. 2013. ISSN 1057-7157, 1941-0158. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6293833/>>.

KISHORE, R. A.; VUČKOVIĆ, D.; PRIYA, S. Ultra-Low Wind Speed Piezoelectric Windmill. *Ferroelectrics*, v. 460, n. 1, p. 98–107, fev. 2014. ISSN 0015-0193, 1563-5112. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00150193.2014.875315>>.

KONG, N.; HA, D. S. Low-Power Design of a Self-powered Piezoelectric Energy Harvesting System With Maximum Power Point Tracking. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 27, n. 5, p. 2298–2308, maio 2012. ISSN 0885-8993, 1941-0107. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6056568/>>.

KUSHINO, Y.; KOIZUMI, H. Piezoelectric energy harvesting circuit using full-wave voltage doubler rectifier and switched inductor. In: *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2014. p. 2310–2315. ISBN 978-1-4799-5776-7. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6953711/>>.

KWON, D.; RINCON-MORA, G. A. A rectifier-free piezoelectric energy harvester circuit. In: *2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. Taipei,

- Taiwan: IEEE, 2009. p. 1085–1088. ISBN 978-1-4244-3827-3. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5117948/>.
- KWON, D.; RINCON-MORA, G. A. A 2- μ m BiCMOS Rectifier-Free AC–DC Piezoelectric Energy Harvester-Charger IC. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, v. 4, n. 6, p. 400–409, dez. 2010. ISSN 1932-4545, 1940-9990. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5611629/>.
- KWON, D.; RINCON-MORA, G. A. Energy-investment schemes for increasing output power in piezoelectric harvesters. In: *2012 IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. Boise, ID, USA: IEEE, 2012. p. 1084–1087. ISBN 978-1-4673-2527-1 978-1-4673-2526-4 978-1-4673-2525-7. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6292212/>.
- KYMISSIS, J. et al. Parasitic power harvesting in shoes. In: *Digest of Papers. Second International Symposium on Wearable Computers (Cat. No.98EX215)*. Pittsburgh, PA, USA: IEEE Comput. Soc, 1998. p. 132–139. ISBN 978-0-8186-9074-7. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/729539/>.
- LALLART, M. et al. Double synchronized switch harvesting (DSSH): a new energy harvesting scheme for efficient energy extraction. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, v. 55, n. 10, p. 2119–2130, out. 2008. ISSN 0885-3010. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4638899/>.
- LALLART, M. et al. High efficiency, wide load bandwidth piezoelectric energy scavenging by a hybrid nonlinear approach. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 165, n. 2, p. 294–302, fev. 2011. ISSN 09244247. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424710004334>.
- LEFEUVRE, E. et al. Buck-Boost Converter for Sensorless Power Optimization of Piezoelectric Energy Harvester. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 22, n. 5, p. 2018–2025, set. 2007. ISSN 0885-8993. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4300887/>.
- LEFEUVRE, E. et al. Analysis of piezoelectric energy harvesting system with tunable SECE interface. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 26, n. 3, p. 035065, fev 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1088%2F1361-665x%2Faa5e92>.
- LEFEUVRE, E. et al. Piezoelectric Energy Harvesting Device Optimization by Synchronous Electric Charge Extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 16, n. 10, p. 865–876, out. 2005. ISSN 1045-389X, 1530-8138. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X05056859>.
- LEFEUVRE, E. et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 126, n. 2, p. 405–416, fev. 2006. ISSN 09244247. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424705006151>.
- LIANG, J.; LIAO, W.-H. Improved Design and Analysis of Self-Powered Synchronized Switch Interface Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 59, n. 4, p. 1950–1960, abr. 2012. ISSN 0278-0046, 1557-9948. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6009186/>.

LIU, H. et al. A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. *Applied Physics Reviews*, v. 5, n. 4, p. 041306, dez. 2018. ISSN 1931-9401. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5074184>>.

LUO, C. *Active Energy Harvesting for piezoelectric dynamic systems*. Tese (Doutorado) — The Pennsylvania State University, Pensilvânia, 2010.

MAIWA, H. Piezoelectric Energy Harvesting. In: OGAWA, T. (Ed.). *Piezoelectric Materials*. InTech, 2016. ISBN 978-953-51-2558-7 978-953-51-2559-4. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/piezoelectric-materials/piezoelectric-energy-harvesting>>.

MAKKI, N.; POP-ILIEV, R. Battery-and wire-less tire pressure measurement systems (TPMS) sensor. *Microsystem Technologies*, v. 18, n. 7-8, p. 1201–1212, ago. 2012. ISSN 0946-7076, 1432-1858. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00542-012-1480-6>>.

MARZENCKI. Integrated power harvesting system including a MEMS generator and a power management circuit. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 145-146, p. 363–370, jul. 2008. ISSN 09244247. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424707008047>>.

MCSKIMIN, H. J.; ANDREATCH, P. Measurement of Very Small Changes in the Velocity of Ultrasonic Waves in Solids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 41, n. 4B, p. 1052–1057, abr. 1967. ISSN 0001-4966. Disponível em: <<http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.1910437>>.

MOULSON, A. J.; HERBERT, J. M. *Electroceramics: materials, properties, applications*. 2nd ed. ed. West Sussex ; New York: Wiley, 2003. ISBN 978-0-471-49747-9 978-0-471-49748-6.

MURATA. *Piezoelectric sound components*. 2012. Disponível em: <<https://www.murata.com/-/media/webrenewal/support/library/catalog/products/sound/p37e.ashx?la=en-us&cvid=20180223012852112000>>.

NG, T. H.; LIAO, W. H. Sensitivity Analysis and Energy Harvesting for a Self-Powered Piezoelectric Sensor. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 16, n. 10, p. 785–797, out. 2005. ISSN 1045-389X, 1530-8138. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X05053151>>.

NYE, J. F. *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices*. [S.l.]: Oxford university press., 1985. ISBN 0-19-851165-5.

OTTMAN, G. et al. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 17, n. 5, p. 669–676, set. 2002. ISSN 0885-8993, 1941-0107. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1035141/>>.

OTTMAN, G.; HOFMANN, H.; LESIEUTRE, G. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 18, n. 2, p. 696–703, mar. 2003. ISSN 0885-8993, 1941-0107. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1189621/>>.

PARK, J.-H. et al. Comparison of Transduction Efficiency for Energy Harvester between Piezoelectric Modes. In: PROULX, T. (Ed.). *MEMS and Nanotechnology, Volume 2*. New York, NY: Springer New York, 2011. p. 33–39. ISBN 978-1-4419-8824-9 978-1-4419-8825-6. Series Title: Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-8825-6_5>.

PARK, K.-I. et al. Flexible and Large-Area Nanocomposite Generators Based on Lead Zirconate Titanate Particles and Carbon Nanotubes. *Advanced Energy Materials*, v. 3, n. 12, p. 1539–1544, dez. 2013. ISSN 16146832. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/aenm.201300458>>.

PARK, K.-I. et al. Highly-Efficient, Flexible Piezoelectric PZT Thin Film Nanogenerator on Plastic Substrates. *Advanced Materials*, v. 26, n. 16, p. 2514–2520, abr. 2014. ISSN 09359648. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/adma.201305659>>.

POPOVICI, D.; OKUYAMA, M.; AKEDO, J. Barium Titanate-Based Materials – a Window of Application Opportunities. In: LALLART, M. (Ed.). *Ferroelectrics - Material Aspects*. InTech, 2011. ISBN 978-953-307-332-3. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/ferroelectrics-material-aspects/barium-titanate-based-materials-a-window-of-application-opportunities>>.

Pozo et al. Energy Harvesting Technologies and Equivalent Electronic Structural Models - Review. *Electronics*, v. 8, n. 5, p. 486, abr. 2019. ISSN 2079-9292. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/8/5/486>>.

QI, Y. et al. Piezoelectric Ribbons Printed onto Rubber for Flexible Energy Conversion. *Nano Letters*, v. 10, n. 2, p. 524–528, fev. 2010. ISSN 1530-6984, 1530-6992. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nl903377u>>.

RAMADASS, Y. K.; CHANDRAKASAN, A. P. An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, v. 45, n. 1, p. 189–204, jan. 2010. ISSN 0018-9200, 1558-173X. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5357551/>>.

REISSMAN, T.; GARCIA, E. Cyborg MAVs Using Power Harvesting and Behavioral Control Schemes. *Advances in Science and Technology*, v. 58, p. 159–164, set. 2008. ISSN 1662-0356. Disponível em: <<https://www.scientific.net/AST.58.159>>.

REN, B. et al. Piezoelectric energy harvesting using shear mode 0.71Pb(Mg $_{1/3}$ Nb $_{2/3}$)O $_3$ -0.29PbTiO $_3$ single crystal cantilever. *Applied Physics Letters*, v. 96, n. 8, p. 083502, fev. 2010. ISSN 0003-6951, 1077-3118. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3327330>>.

ROMANI, A.; FILIPPI, M.; TARTAGNI, M. Micropower Design of a Fully Autonomous Energy Harvesting Circuit for Arrays of Piezoelectric Transducers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 29, n. 2, p. 729–739, fev. 2014. ISSN 0885-8993, 1941-0107. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6497696/>>.

ROSEN, C. Z.; HIREMATH, B. V.; NEWNHAM, R. E. (Ed.). *Piezoelectricity*. New York: American Institute of Physics, 1992. (Key papers in physics). ISBN 978-0-88318-647-3 978-0-88318-651-0.

- ROUNDY, S. On the Effectiveness of Vibration-based Energy Harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 16, n. 10, p. 809–823, out. 2005. ISSN 1045-389X, 1530-8138. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X05054042>>.
- ROUNDY, S.; WRIGHT, P. K.; RABAEY, J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications*, v. 26, n. 11, p. 1131–1144, jul. 2003. ISSN 01403664. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140366402002487>>.
- RYU, J. et al. Magnetoelectric properties in piezoelectric and magnetostrictive laminate composites. *Japanese Journal of Applied Physics*, Japan Society of Applied Physics, v. 40, n. Part 1, No. 8, p. 4948–4951, aug 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1143%2Fjjap.40.4948>>.
- SAFAEI, M.; PONDER, R.; ANTON, S. R. Detection of compartmental forces and location of contact areas with piezoelectric transducers in total knee arthroplasty. In: ERTURK, A. (Ed.). *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems XII*. Denver, United States: SPIE, 2018. p. 61. ISBN 978-1-5106-1686-8 978-1-5106-1687-5. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10595/2296250/Detection-of-compartmental-forces-and-location-of-contact-areas-with/10.1117/12.2296250.full>>.
- SAFAEI, M.; SODANO, H. A.; ANTON, S. R. A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008–2018). *Smart Materials and Structures*, v. 28, n. 11, p. 113001, nov. 2019. ISSN 0964-1726, 1361-665X. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/ab36e4>>.
- SANCHES, F. M. *Sistema de geração e armazenamento de energia elétrica utilizando transdutor piezoeletrico na forma pulsada*. 2015. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.
- SANKMAN, J.; MA, D. A 12-W to 1.1-mW AIM Piezoelectric Energy Harvester for Time-Varying Vibrations With 450-nA I_{Q} . *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 30, n. 2, p. 632–643, fev. 2015. ISSN 0885-8993, 1941-0107. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6778073>>.
- SCHENCK, N. S. Energy scavenging with shoe-mounted piezo-electrics. *IEEE Micro.*, v. 21, n. 3, p. 30–42, 2001. Disponível em: <<https://ci.nii.ac.jp/naid/80012454347/en/>>.
- SEBALD, G. et al. Experimental Duffing oscillator for broadband piezoelectric energy harvesting. *Smart Materials and Structures*, v. 20, n. 10, p. 102001, out. 2011. ISSN 0964-1726, 1361-665X. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0964-1726/20/i=10/a=102001?key=crossref.31a21cd6ac9c177dcfd2485fc5a49abf>>.
- SHAFER, M. W. et al. Harvestable vibrational energy from an avian source: theoretical predictions vs. measured values. In: SODANO, H. A. (Ed.). San Diego, California: [s.n.], 2012. p. 834103. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.915370>>.
- SHENCK, N.; PARADISO, J. Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics. *IEEE Micro*, v. 21, n. 3, p. 30–42, jun. 2001. ISSN 02721732. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/928763/>>.

SHERRIT, S.; MUKHERJEE, B. K. Characterization of Piezoelectric Materials for Transducers. *arXiv:0711.2657 [cond-mat]*, nov. 2007. ArXiv: 0711.2657. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/0711.2657>>.

SHUKLA, R.; BELL, A. J. PENDEXE: A novel energy harvesting concept for low frequency human waistline. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 222, p. 39–47, fev. 2015. ISSN 09244247. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424714004981>>.

SOUZA, F. d. S. *Sistema de extração de potência (power harvesting) usando transdutores piezelétricos*. 2011. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

SOUZA, F. d. S. *Extração de energia através da técnica power harvesting baseada em vibrações mecânicas e transdutores piezelétricos*. 2018. 166f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018.

STANTON, S. C.; MCGEHEE, C. C.; MANN, B. P. Reversible hysteresis for broadband magnetopiezoelastic energy harvesting. *Applied Physics Letters*, v. 95, n. 17, p. 174103, out. 2009. ISSN 0003-6951, 1077-3118. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.3253710>>.

STEIN, A.; HOFMANN, H. Resonant inverter design for stand-alone dynamic active piezoelectric energy harvesting. In: *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. Charlotte, NC, USA: IEEE, 2015. p. 3265–3271. ISBN 978-1-4799-6735-3. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7104820/>>.

Sudha M et al. Design of modified power conditioning circuit for piezoelectric vibration energy harvester. In: *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*. Chennai, India: IEEE, 2016. p. 2171–2176. ISBN 978-1-4673-9338-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7566527/>>.

TABESH, A.; FRECHETTE, L. A Low-Power Stand-Alone Adaptive Circuit for Harvesting Energy From a Piezoelectric Micropower Generator. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 57, n. 3, p. 840–849, mar. 2010. ISSN 0278-0046. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5345727/>>.

TAYLOR, G. et al. The Energy Harvesting Eel: a small subsurface ocean/river power generator. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 26, n. 4, p. 539–547, out. 2001. ISSN 03649059. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/972090/>>.

TIEN, C. M. T.; GOO, N. S. Use of a piezo-composite generating element for harvesting wind energy in an urban region. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, v. 82, n. 6, p. 376–381, out. 2010. ISSN 0002-2667. Disponível em: <<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/00022661011104538/full/html>>.

TURNER, R. et al. Materials for high temperature acoustic and vibration sensors: A review. *Applied Acoustics*, Elsevier Limited, v. 41, n. 4, p. 299–324, 1 1994. ISSN 0003-682X.

Tzu-Chi Huang et al. A direct AC-DC and DC-DC cross-source energy harvesting circuit with analog iterating-based MPPT technique with 72.5% conversion efficiency and 94.6% tracking efficiency. In: *2014 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers*. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2014. p. 1–2. ISBN 978-1-4799-3328-0 978-1-4799-3327-3 978-1-4799-3326-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6858365/>>.

WANG, D.-A.; LIU, N.-Z. A shear mode piezoelectric energy harvester based on a pressurized water flow. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 167, n. 2, p. 449–458, jun. 2011. ISSN 09244247. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424711001300>>.

WANG, H.; ZHANG, Q.; CROSS, L. E. A High Sensitivity, Phase Sensitive d_{33} Meter for Complex Piezoelectric Constant Measurement. *Japanese Journal of Applied Physics*, v. 32, n. Part 2, No. 9A, p. L1281–L1283, set. 1993. ISSN 0021-4922. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1347-4065/32/L1281>>.

WANG, Z. L. Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays. *Science*, v. 312, n. 5771, p. 242–246, abr. 2006. ISSN 0036-8075, 1095-9203. Disponível em: <<https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1124005>>.

WEI, Q. *Energy harvester application of large-deformation-piezoelectrics with synchronized-mechanical-switch circuit*. 2017. 103f. Thesis (Master of Science) — Swanson School of Engineering, University of Pittsburgh, Pittsburgh, 2017.

WON, S. S. et al. Flexible vibrational energy harvesting devices using strain-engineered perovskite piezoelectric thin films. *Nano Energy*, v. 55, p. 182–192, jan. 2019. ISSN 22112855. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211285518307973>>.

WU, L. et al. A Self-Powered and Optimal SSHI Circuit Integrated With an Active Rectifier for Piezoelectric Energy Harvesting. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, v. 64, n. 3, p. 537–549, mar. 2017. ISSN 1549-8328, 1558-0806. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7778136/>>.

WU, W. et al. Lead Zirconate Titanate Nanowire Textile Nanogenerator for Wearable Energy-Harvesting and Self-Powered Devices. *ACS Nano*, v. 6, n. 7, p. 6231–6235, jul. 2012. ISSN 1936-0851, 1936-086X. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/nn3016585>>.

WU, Y. et al. Self-powered optimized synchronous electric charge extraction circuit for piezoelectric energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 25, n. 17, p. 2165–2176, nov. 2014. ISSN 1045-389X, 1530-8138. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1045389X13517315>>.

XIANG, H. J. et al. Theoretical analysis of piezoelectric energy harvesting from traffic induced deformation of pavements. *Smart Materials and Structures*, v. 22, n. 9, p. 095024, set. 2013. ISSN 0964-1726, 1361-665X. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/22/9/095024>>.

XIE, X.; WANG, Q. A mathematical model for piezoelectric ring energy harvesting technology from vehicle tires. *International Journal of Engineering Science*, v. 94, p. 113–127, set. 2015. ISSN 00207225. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020722515000786>>.

- XIE, X. et al. Energy harvesting from high-rise buildings by a piezoelectric coupled cantilever with a proof mass. *International Journal of Engineering Science*, v. 72, p. 98–106, nov. 2013. ISSN 00207225. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0020722513001080>>.
- XU, S.; SHI, Y. Power generation from piezoelectric lead zirconate titanate nanotubes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 42, n. 8, p. 085301, abr. 2009. ISSN 0022-3727, 1361-6463. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0022-3727/42/i=8/a=085301?key=crossref.66e98852be0ec03e9b0eb0bb20b4c2a7>>.
- YANG, Y. et al. Rotational piezoelectric wind energy harvesting using impact-induced resonance. *Applied Physics Letters*, v. 105, n. 5, p. 053901, ago. 2014. ISSN 0003-6951, 1077-3118. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4887481>>.
- ZHANG, G.; GAO, S.; LIU, H. A utility piezoelectric energy harvester with low frequency and high-output voltage: Theoretical model, experimental verification and energy storage. *AIP Advances*, v. 6, n. 9, p. 095208, set. 2016. ISSN 2158-3226. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4962979>>.
- ZHANG, H. et al. A flexible and implantable piezoelectric generator harvesting energy from the pulsation of ascending aorta: in vitro and in vivo studies. *Nano Energy*, v. 12, p. 296–304, mar. 2015. ISSN 22112855. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211285514003073>>.
- ZHANG, Y. et al. PVDF–PZT nanocomposite film based self-charging power cell. *Nanotechnology*, v. 25, n. 10, p. 105401, mar. 2014. ISSN 0957-4484, 1361-6528. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/0957-4484/25/i=10/a=105401?key=crossref.9862a6dc364adf4852d94b7ff7c1fa83>>.
- ZHANG, Z. et al. Experimental investigation on piezoelectric energy harvesting from vehicle-bridge coupling vibration. *Energy Conversion and Management*, v. 163, p. 169–179, maio 2018. ISSN 01968904. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019689041830164X>>.
- ZHAO, H.; YU, J.; LING, J. Finite element analysis of Cymbal piezoelectric transducers for harvesting energy from asphalt pavement. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, v. 118, n. 1382, p. 909–915, 2010. ISSN 1882-0743, 1348-6535. Disponível em: <<http://joi.jlc.jst.go.jp/JST.JSTAGE/jcersj2/118.909?from=CrossRef>>.
- ZHAO, J.; YOU, Z. A Shoe-Embedded Piezoelectric Energy Harvester for Wearable Sensors. *Sensors*, v. 14, n. 7, p. 12497–12510, jul. 2014. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/14/7/12497>>.
- ZHAO, J. et al. Investigation of a d_{15} mode PZT-51 piezoelectric energy harvester with a series connection structure. *Smart Materials and Structures*, v. 21, n. 10, p. 105006, out. 2012. ISSN 0964-1726, 1361-665X. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/21/10/105006>>.
- ZHOU; APO. Dual-phase self-biased magnetoelectric energy harvester. *Applied Physics Letters*, v. 103, n. 19, p. 192909, nov. 2013. ISSN 0003-6951, 1077-3118. Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4829151>>.