



**FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA**

ENGENHARIA ELÉTRICA

UTILIZAÇÃO DE SENSORES PIEZOELÉTRICOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA VIBRAÇÃO DE MOTORES

Beatriz Lanna Moreira

**Campo Grande MS
20 de Julho de 2021**



**FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL**

**FACULDADE DE ENGENHARIAS,
ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA**

ENGENHARIA ELÉTRICA

UTILIZAÇÃO DE SENSORES PIEZOELÉTRICOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA VIBRAÇÃO DE MOTORES

Beatriz Lanna Moreira

Orientador: Dr. Márcio Luiz Magri Kimpara

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Mato Grosso do Sul na Faculdade de
Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e
Geografia, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro(a)
Eletricista.

Campo Grande MS
20 de Julho de 2021

UTILIZAÇÃO DE SENSORES PIEZOELÉTRICOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA VIBRAÇÃO DE MOTORES

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Luiz Magri Kimpara
Orientador

Prof. Dr. Luigi Galotto Junior

Prof. Dr. Raymundo Cordero Garcia

Campo Grande MS
20 de Julho de 2021

DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

Beatriz Lanna Moreira, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado do Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº 2.115.898 e CPF nº 063.221.411-20, declaro que o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado, com o título “Utilização de Sensores Piezoelétricos para Geração de Energia Elétrica a partir da Vibração de Motores” é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este artigo não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 20 de Julho de 2021.

Beatriz Lanna Moreira

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha avó materna, Rosalina (In Memoriam), que presenciou meu início neste curso e ficaria feliz em ver sua neta se formando. E aos meus pais, que nunca mediram esforços para prover a boa educação aos seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, que com sua bondade concedeu o dom da vida e a saúde para poder realizar este curso.

Agradeço à minha família, meus pais Benedito e Filomena, e meus irmãos Luiz e Paulo, pelo apoio e compreensão as horas abdicadas de convívio por horas de estudo.

Ao meu namorado, Enis, pelo seu carinho e apoio em todos os momentos, principalmente, os mais difíceis e pela compreensão das horas ausentes devido às responsabilidades do curso.

Ao professor Dr. Márcio Kimpara por sua paciência e dedicação em me orientar no desenvolvimento deste trabalho e com seu vasto conhecimento que foi transmitido da melhor forma possível.

Aos meus amigos de curso, Jaqueline Rinke, Eduardo Silva, Pedro Henrique Prestes, Alexandre Pires, Marcelo Soares, Anderson Volpato, Amanda Martins, Geovana Braga, Matheus Lesseski, Rafael Lazaro e Leonardo Such pelo companheirismo, apoio e conhecimentos compartilhados.

Ao meu supervisor Luiz Nery que com sua experiência e amizade, compartilhou grandes ensinamentos na área de engenharia elétrica.

RESUMO

O entendimento de que as fontes de energia não renováveis são finitas e o aumento da demanda de energia elétrica fazem com que novas fontes de energia sejam exploradas, sendo elas em grande ou pequena escala. Dessa forma, este trabalho apresenta um estudo sobre a coleta de energia por meio de sensores piezoelétricos, tendo como fonte a vibração mecânica dos motores elétricos. O objetivo deste trabalho consiste em averiguar a capacidade de geração de energia elétrica a partir desta vibração. Os circuitos propostos baseiam-se em elevar a tensão gerada pelo efeito piezoelétrico, armazenar a energia em um capacitor e controlar a descarga de corrente através de transistores em uma bateria de Lítio que alimenta o sistema sensor e transmissor. Primeiramente, realizou-se a análise da vibração em motores de indução de diferentes potências, em seguida, os dados experimentais de vibração foram utilizados em simulações em ambiente *Matlab/Simulink*. Os resultados obtidos demonstram que os circuitos utilizados neste trabalho foram capazes de realizar o condicionamento do sinal de maneira adequada. Desta forma, a energia coletada desta fonte pode ser utilizada em sensores do tipo auto-alimentados (*self-powered sensors*), ou ainda, ser utilizada para aumentar a autonomia da bateria que compõem o sistema sensor-transmissor em aplicações de monitoramento das condições de máquinas rotativas. No cenário avaliado, obteve-se um aumento de aproximadamente 16% na autonomia da bateria considerada. Contudo, para que a colheita de energia apresente bons resultados, é importante que tanto a escolha do sensor quanto o nível de vibração dos motores elétricos sejam favoráveis.

Palavras-Chave: *Energy Harvesting*, Piezoelectricidade, Motores elétricos, *Simulink*, Vibração.

ABSTRACT

The understanding that non-renewable energy sources are finite and the increased demand for electricity means that new energy sources are explored, whether on a large or small scale. Thus, this work presents a study on the collection of energy through piezoelectric sensors, having as source the mechanical vibration of electric motors. The objective of this work is to investigate the capacity to generate electrical energy from this vibration. The proposed circuits are based on raising the voltage generated by the piezoelectric effect, storing the energy in a capacitor and controlling the current discharge through transistors in a lithium battery that feeds the sensor and transmitter system. Firstly, the vibration analysis in induction motors of different powers was carried out, then the experimental vibration data were used in simulations in a Matlab/Simulink environment. The results obtained demonstrate that the circuits used in this work were able to perform the signal conditioning in an adequate way. In this way, the energy collected from this source can be used in self-powered sensors, or even be used to increase the autonomy of the battery that make up the sensor-transmitter system in applications for monitoring the conditions of rotating machines. In the evaluated scenario, an increase of approximately 16% in battery autonomy was obtained. However, for the energy harvest to present good results, it is important that both the choice of the sensor and the vibration level of the electric motors are favorable.

Keywords: Energy Harvesting, Piezoelectricity, Electric Motors, Simulink, Vibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Divisão dos Tipos de <i>Energy Harvesting</i>	18
Figura 2.2 Comportamento de um elemento submetido à perturbação externa (a - Molécula Neutra; b - Molécula ao sofrer pressão externa; c - Molécula polarizada).....	21
Figura 2.3 Efeito direto da Piezoeletricidade.	21
Figura 2.4 Efeito reverso da Piezoeletricidade.....	22
Figura 2.5 Classes de cristais.	22
Figura 2.7 Sensor Piezoelétrico do tipo Circular (a - visão frontal; b – visão lateral).....	27
Figura 2.8 Sensor Piezoelétrico do tipo Pilha.....	28
Figura 2.9 Sensor Piezoelétrico do tipo Prato.	28
Figura 2.10 Modelagem do Sensor Piezoelétrico.	29
Figura 2.11 Comportamento da Impedância.	31
Figura 2.12 Associação em Série.	31
Figura 2. 13 Associação em Paralelo.....	32
Figura 3.1 Sequência de ações realizadas para validar os circuitos utilizados.	34
Figura 3.2 Sistema de colheita de energia da vibração	34
Figura 3.3 Ponte Retificadora	35
Figura 3.4 Conversor Boost.	36
Figura 3.5 Dobrador de Tensão	36
Figura 3.6 Triplicador de tensão.	37
Figura 3.7 Comparador de Tensão – Amplificador Operacional.	39
Figura 3.8 Circuito Comparador com Amplificador Operacional.	40
Figura 4.1 Associação Série dos Sensores Piezoelétricos.	41

Figura 4.2 Associação Série no circuito Duplicador de Tensão.	43
Figura 4.3 Tensão de saída do Dobrador de Tensão.	43
Figura 4.4 Esquema do chaveamento com transistor – (a) diagrama, (b) implementação.	44
Figura 4.5 Implementação do duplicador de tensão com o comparador formado por amplificador de tensão.	44
Figura 4.6 Forma de onda experimental da tensão sobre o capacitor.....	45
Figura 4.7 Descarga do Capacitor.	45
Figura 4.8 Tensão necessária para Acionar o Transistor.	46
Figura 4.9 Comportamento da Corrente ao Acionar o Transistor.....	46
Figura 4.10 Sensor PCB Piezoeletrônico	47
Figura 4.11 Condicionador de Sinal.	48
Figura 4.12 Cera para fixação do sensor.	48
Figura 4.13 Motor de Indução.	49
Figura 4.14 Ligação Delta.	50
Figura 4.15 Sinal de Vibração – Motor de Indução.	50
Figura 4.16 Freio de Foucault acoplado ao Motor de Indução.	51
Figura 4.17 Comportamento da Vibração do Motor de Indução com a Carga 1.....	52
Figura 4.18 Comportamento da Vibração – Motor de Indução com Carga 2.	53
Figura 4.19 Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento.....	53
Figura 4.20 Sensor PCB conectado ao Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento. ..	54
Figura 4.21 Sinal de Vibração – Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento.	54
Figura 4.22 Espectro de Frequência do Sinal de Vibração.	55
Figura 4.23 Modelagem do Circuito Dobrador com Comparador de Tensão.....	56
Figura 4.24 Comportamento da Bateria – Corrente de carga nominal	57

Figura 4.25 Descarga da bateria sem o aproveitamento da energia de vibração	58
Figura 4.26 Descarga da Bateria com o circuito de colheita de energia.....	59
Figura 4.27 Comparação da autonomia da bateria com e sem o circuito de colheita de energia.....	60
Figura 7.1 Diagrama de Bloco da Placa Wireless.....	68
Figura 7.2 Característica da Placa ZIGBIT 2.4GHZ.....	68
Figura 7.3 Comportamento da Bateria durante 30 s.	70
Figura 7.4 Comportamento da Bateria.	71
Figura 7.5 Componente BQ25504.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Torque aplicado e velocidade de operação – Motor de Indução.51
-------------------	--

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Contextualização Geral	14
1.2. Objetivos	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 Organização do Trabalho:.....	16
2. REVISÃO TEÓRICA	18
2.1. Energy Harvesting	18
2.2. Piezoeletrecidade.....	19
2.2.1 Materiais piezoelétricos	22
2.2.2 Fundamentação Matemática da Piezoeletricidade	24
2.2.3 Tipos de Sensores.....	26
2.2.4 Modelagem do Sensor Piezoelétrico	29
2.2.5 Associação de Sensores Piezoelétricos.....	31
3. Metodologia	33
3.1. Ponte Retificadora	34
3.2. Conversor Boost.....	35
3.3. Dobrador de tensão	36
3.4. Triplicador de tensão.....	37
3.5. Transformador Toroidal	37
3.6. Circuito Comparador de tensão	38
4. Resultados	41
4.1 Sensor Piezoelétrico Circular	41
4.2 Sensor PCB Piezoeletrônico.....	47
4.2.1 Motor de Indução.....	49
4.2.2 Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento.....	53
4.2.2.1 Simulação do Circuito Dobrador com Comparador de Tensão.....	55
5. Conclusões Gerais	61
5.1. Trabalhos Futuros	62

6.	Referências	63
7.	Apêndice A-Modelos de Simulação	67
7.	Apêndice B- Placa Wireless - ZIGBIT 2.4GHZ	68
7.	Apêndice C - Comportamento do bloco da bateria e parâmetros inseridos	69
7.	Apêndice D – Placa BQ25504.....	72

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO GERAL

O desenvolvimento da sociedade passou por diferentes pilares ao longo dos anos, marcados pelas Revoluções Industriais que se iniciaram com máquinas a vapor, na qual, acreditava-se que era possível realizar coisas grandes e que havia sido alcançado o máximo nível tecnológico. Porém, com o passar dos séculos, surgiram as máquinas elétricas que, também passaram por aperfeiçoamento ao longo do tempo, e atualmente dominam as aplicações em diferentes setores, principalmente, o setor industrial.

Com o avanço da tecnologia, diversos trabalhos braçais puderam ser substituídos pela automação dos mecanismos, agregando agilidade, padronização e praticidade. Com o crescente número de motores, equipamentos e processos cada vez mais automatizados, surge a necessidade pelo monitoramento constante das condições de operação destes elementos. Tal monitoramento visa a segurança operacional, elaboração de planos de manutenção do ativo e a eficiência. Este conjunto de práticas impacta financeiramente a indústria, seja esse provenientes da melhoria da produção ou pelo custo dos equipamentos, que sob monitoramento e cuidados tem o tempo de vida maior.

Nessa perspectiva, com os conceitos da chamada Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0), este tipo de monitoramento pode ser integrado a um sistema de conectividade entre as máquinas e dispositivos de gerenciamento, seja por meio de cabos ou pela comunicação sem fio, esta que caracteriza a Internet das Coisas (IoT) [1]. Por exemplo, caso ocorram operações de sobrecarga, na qual observam-se vibrações mecânicas significativas e/ou elevação de temperatura nas máquinas [2], pode-se configurar um alerta, não sendo mais necessária a fiscalização presencial.

Contudo, o diagnóstico de falhas incipientes em motores elétricos dependem do monitoramento *online* de diferentes variáveis, como temperatura, corrente elétrica, vibração, campo eletromagnético, entre outros. Além disso, alguns defeitos possuem assinaturas semelhantes, o que dificulta a identificação do tipo de falta através de uma análise mais simples

[3]. Desta forma, muitas técnicas utilizam inteligência artificial e aprendizagem de máquina a partir de um banco de dados, aliás, outro conceito presente na indústria 4.0 – Big Data.

O problema com os métodos de inteligência artificial e um banco de dados muito grande é o requisito por plataformas de elevada capacidade de processamento, o que impede o uso de microcontroladores embarcados. Portanto, as variáveis monitoradas normalmente são transmitidas para um terminal de processamento remoto. Esta transferência de dados, pode ser feita via cabos, entretanto esta solução seria mais adequada quando os motores estão localizados próximos uns aos outros e a esse terminal. Além disso, o sistema de monitoramento (sensor + transmissor) deve ser ligada a uma fonte de alimentação, e mais ainda, ao aumentar a quantidade de máquinas, aumenta-se consequentemente, o número de cabos.

As baterias podem ser uma alternativa para a alimentação elétrica, porém, ao optar-se por este método, deve-se estar ciente que as baterias precisam ser constantemente substituídas devido ao decaimento da carga, e caso não sejam trocadas, esta monitoração perde sua funcionalidade. Na busca pelo prolongamento do funcionamento de dispositivos alimentados por baterias, existem estudos na linha de otimização de circuitos integrados com o objetivo de redução do consumo de energia. Entretanto, estudos mais recentes envolvendo a colheita de energia - *Energy Harvesting* tem se destacado por utilizar movimentos naturais para reaproveitar a energia e alimentar sistemas como fonte secundária [4].

Desta forma, a fonte de alimentação dos dispositivos de monitoramento e transmissão de dados por comunicação sem fio, pode ser a própria vibração dos motores elétricos, originada a partir de sua operação normal. A energia de vibração pode ser coletada por meio dos chamados, sensores piezoelétricos, armazenada e utilizada para alimentar circuitos auxiliares (*self-powered sensors*), ou utilizada para carregar a bateria do módulo de transmissão *wireless*, aumentando sua autonomia.

Portanto, este trabalho apresenta uma análise dos níveis de vibração em motores elétricos e os circuitos de condicionamento necessários para armazenar esta energia em um capacitor, e posteriormente utilizar esta energia para carregar a bateria que alimenta o sistema de monitoramento e transmissão de dados.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o potencial de aproveitamento da energia mecânica de vibração dos motores elétricos para geração de energia elétrica a fim de aumentar a autonomia da bateria que alimenta o sistema de comunicação *wireless* que faz parte do monitoramento *online*.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Analisar, experimentalmente, os níveis de vibração dos motores de indução;
- Analisar diferentes circuitos para condicionar a energia gerada. Esta análise sendo realizada por meio de simulações no *software Matlab*;
- Realização de ensaios experimentais, com a intenção de validar a funcionalidade dos circuitos anteriormente simulados;
- Quantificar o aproveitamento da colheita de energia;

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO:

Além desse primeiro capítulo que consiste na introdução do assunto e objetivos, os demais capítulos são organizados como descrito abaixo.

No Capítulo 2, é apresentada a revisão teórica acerca dos temas abordados no trabalho, principalmente da transformação da energia mecânica em energia elétrica.

No Capítulo 3, são apresentados as características dos circuitos elétricos que normalmente são utilizados neste tipo de aplicação envolvendo colheita de energia.

No Capítulo 4, são apresentados a descrição dos materiais utilizados para a análise da vibração dos motores e os resultados obtidos tanto experimentalmente quanto por meio de simulações.

No Capítulo 5, são apresentadas as conclusões finais e propostas de continuidade do trabalho.

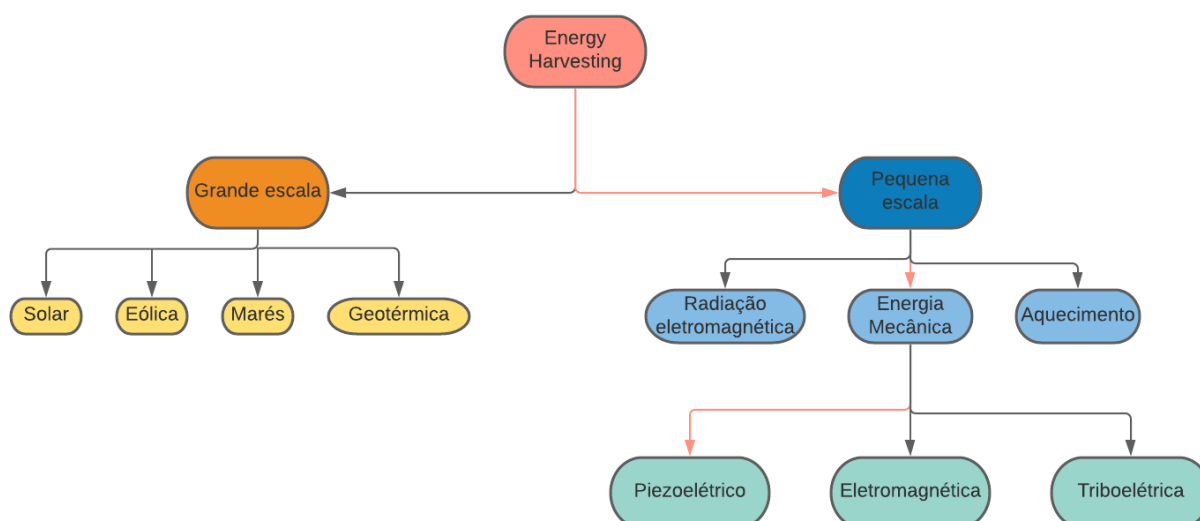
2. REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a revisão teórica sobre o conceito de coleta/colheita de energia (*energy harvesting*), bem como, o efeito piezoelétrico, utilizados neste trabalho.

2.1. ENERGY HARVESTING

O conceito conhecido como *Energy Harvesting* (Colheita de Energia), baseia-se em armazenar a energia provida de um movimento derivado de fontes externas e reutilizá-la para um determinado fim. Estes tipos de fontes são abordados de forma geral na Figura 2.1.

Figura 2.1 Divisão dos Tipos de *Energy Harvesting*.



Fonte: Adaptado de [4].

A coleta de energia possui duas vertentes de estudo, como apresentado na Figura 2.1, a de grande escala, como as usinas hidroelétricas, usinas eólicas, placas fotovoltaicas e a energia geotermal; e as de aproveitamento de energia em pequenas escalas, sendo que este método não é tão intuitivo como as fontes mais tradicionais. Ao analisar os tipos de fontes de energia em pequena escala, observa-se o aquecimento de materiais, como também, a radiação eletromagnética e a energia mecânica.

A energia mecânica possui diferentes frentes de estudo, como a triboelétrica, caracterizada pela capacidade de alguns materiais em adquirir cargas, positivas ou negativas, quando sofrem eletrização por atrito [5]; a eletromagnética, por meio da relação entre as forças elétricas e magnéticas do átomo somada com a força mecânica aplicada ao material; e por fim, a piezoelétrica, provida da vibração dos materiais. Esta última é bastante conhecida e alguns trabalhos na literatura, propõem a coleta de energia através de sensores piezoelétricos instalados em bolas de basquete [6] e sapatos [7], por exemplo, com o objetivo de estudar o quanto de energia pode ser extraída a partir dos movimentos associados a estes casos.

O presente trabalho também segue a linha destacada em vermelho na Figura 2.1, tendo como fonte de vibração os motores elétricos. Dessa forma, o estudo do funcionamento dos sensores piezoelétricos é de suma importância, visto que isto implicará na utilização de determinados circuitos para que seja possível condicionar a energia gerada.

A ideia de que o sensor piezoelétrico gera a tensão elétrica a partir de um esforço mecânico é intrínseco, porém, a próxima seção aborda as propriedades necessárias para que um material apresente o fenômeno da piezoeletricidade, além de tratar das possíveis associações entre os tipos de sensores existentes.

2.2. PIEZOELETRICIDADE

A palavra piezo, tem sua origem do grego *piezein*, tendo o conceito proveniente do verbo “pressionar”, desse modo, piezoeletricidade, tem como significado ao pé da letra, a “eletricidade da pressão”, sendo a capacidade de alguns materiais tornarem-se polarizados quando sujeitos a alguma perturbação. Este fenômeno foi observado há séculos atrás, segundo [8], pela população nativa de Ceilão, atual Sri Lanka, ao observar a propriedade pelicular dos cristais da turmalina. Quando atiravam este cristal ao fogo, observaram, que em um primeiro momento, estes se atraíam e, após, repeliavam-se.

Em 1756, o inventor do capacitor elétrico, observou que este mesmo cristal, ao ser submetido a variações de temperatura, resultavam em uma polarização elétrica. Em 1824, este fenômeno é nomeado como piroeletricidade pelo cientista D. Brewster, no qual o definiu como sendo a polarização elétrica induzida pela energia térmica, sendo esta polarização proporcional

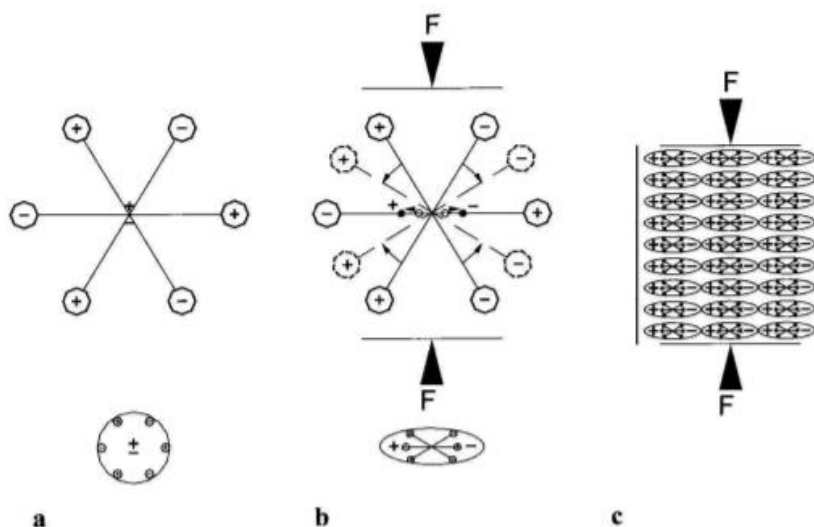
à variação de temperatura. Além disso, o mesmo apontou que a propriedade inversa, de menor amplitude, é chamada de efeito eletrocalórico [8].

Em 1817, a piezoeletricidade é mencionada, primeiramente, pelo mineralogista francês René Just Hauy, e, primeiramente demonstrado pelos irmãos Curie em 1880. Apesar destes estudos, a primeira vez que este fenômeno é aplicado fora dos laboratórios, foi na primeira guerra mundial, através de sonares. Atualmente, suas aplicações são vastas, por exemplo, em aparelhos de ultrassom, através dos transdutores (que convertem um tipo de energia em outro), em balanças eletrônicas (que possuem cristais que se polarizam ao sofrerem deformação), em instrumentos musicais elétricos (no qual as vibrações mecânicas são convertidas em sinais elétricos, através dos amplificadores), entre tantos outros [9].

Ao passo disso, estudos realizados foram capazes de criar elementos, em laboratório, que possuam esta capacidade de se deformarem e gerarem tensão elétrica. In natura, para que um elemento possua esta propriedade, o mesmo deve ser polarizado e não possuir centro de simetria. Para exemplificar estas propriedades com maior clareza, observa-se uma molécula neutra. Em primeiro momento, sem aplicação de perturbações, as cargas positivas e negativas possuem seus respectivos centro gravitacionais coincidindo, como na Figura 2.2.a. Em seguida, ao sofrer pressão, sua estrutura reticular é deformada, ocasionando a separação dos centros gravitacionais, no qual, gera pequenos dipolos, demonstrado na Figura 2.2.b. Dessa forma, o material encontra-se polarizado, ou seja, suas cargas internas do pólo são canceladas mutuamente, fazendo com que, a distribuição das cargas ligadas apareçam na superfície do material, conforme a Figura 2.2.c [10].

Esta deformação gera um campo elétrico que causa a transformação de energia mecânica em energia elétrica. Assim sendo, este comportamento é o efeito direto da piezoeletricidade, vide Figura 2.3.

Figura 2.2 Comportamento de um elemento submetido à perturbação externa (a - Molécula Neutra; b - Molécula ao sofrer pressão externa; c - Molécula polarizada).



Fonte: [9].

Figura 2.3 Efeito direto da Piezoelectricidade.

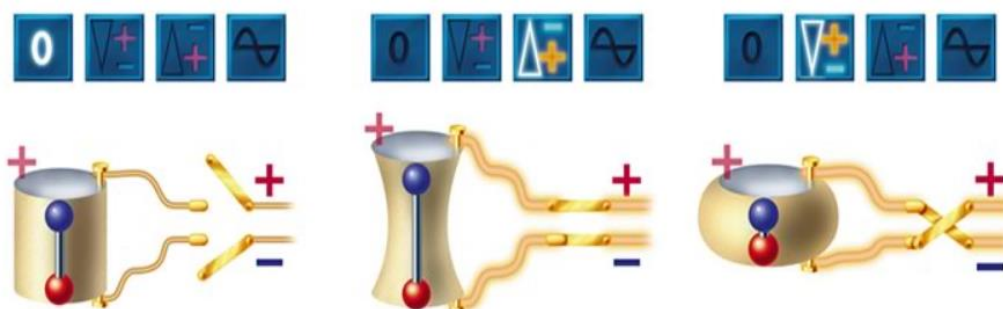


Fonte: [10].

Pela Figura 2.3, é possível observar que, em um primeiro momento, o material encontra-se em repouso e sua energia gerada é zero. Ao passo que o mesmo é expandido ou pressionado, a tensão gerada varia do mínimo ao máximo.

O efeito inverso, demonstra que quando estes materiais são submetidos a campo elétrico, sofrem deformação, como pode ser visto na Figura 2.4.

Figura 2.4 Efeito reverso da Piezoelectricidade.

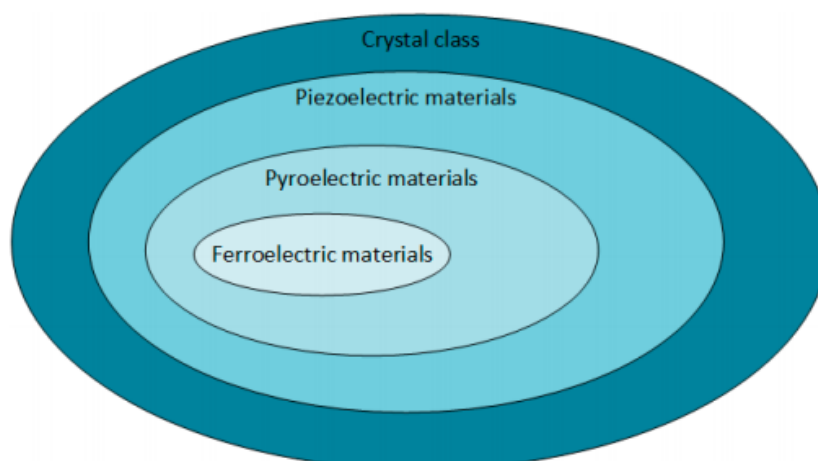


Fonte: [11].

2.2.1 Materiais piezoelétricos

Os materiais piezoelétricos podem ser divididos nas seguintes classes de cristais, mostradas na Figura 2.5.

Figura 2.5 Classes de cristais.



Fonte: [4].

Nesta classe de cristais existem cerca de 32 elementos, porém, apenas, 20 possuem a piezoelectricidade direta, e 10 são cristais espontaneamente polares. Observa-se pela Figura 2.5 que estes cristais apresentam a piroelectricidade, ou seja, uma carga é gerada na presença de um gradiente térmico, como também, são materiais ferroelétricos, ou seja, se o momento dipolo for reversível quando um campo elétrico grande o suficiente é aplicado [4]. Estes materiais podem ser divididos como:

- Naturais: Quartzo, sal de Rochelle, Topázio, grupo Turmalina;

- Sintético: Titanato de Bário, Titanato de Chumbo, Niobato de Lítio, Titanato de Zirconato de Chumbo.

Estes dois grandes grupos de cristais podem ser divididos nas seguintes categorias:

- Monocristal: como o nome menciona, é um cristal único, ou seja, qualquer objeto sólido formado de átomos, íons ou moléculas é repetido em todo o volume, não possuindo rupturas, mas contínua em toda sua forma [12]. Usados, principalmente, em sensores e aplicações de atuadores, por possuírem excelentes propriedades piezoelétricas. Como exemplo, tem-se, o Óxido de Zinco (ZnO) e o Niobato de Chumbo e Magnésio (PMN), [4];
- A base de chumbo: materiais poli cristalinos com estrutura cristalina de Perovskita (célula unitária cúbica com átomos de Titânio aos cantos, átomos de Oxigênio nos pontos médios dos cantos e, por fim, um átomo de Cálcio ao centro), [13], bem como, baixa perda dielétrica e alto efeito piezoelétrico, possui fabricação simples, porém, a presença do chumbo ocasiona em um material com um toxicidade elevada. Como exemplo, tem-se Chumbo Niobato de Magnésio (PZT), Óxido de Zinco aprimorado ($PZT - ZnO$), [4];
- Piezocerâmica sem chumbo: por não possuir o chumbo, não é considerada tóxica, possui uma menor eficiência de transdução e são um tipo de estrutura cristalina Perovskita. Como exemplo, observa-se o Niobato de Sódio e Potássio (KNN), Titanato de Sódio de Bismuto ($BNT - BKT$), [14];
- Piezo polímeros: não tóxico, leve e flexível, baixo custo de fabricação, rápido processamento, biodegradável e baixo consumo de energia quando comparado aos outros materiais piezoelétricos. Como exemplo, tem-se Fluoreto de polivinilideno ($PVDS$), polímeros derivados, [4].

A escolha de qual material piezoelétrico será utilizado, depende além de outros fatores, da sua eficiência e propriedades piezoelétricas, flexibilidade, frequência e volume. Entre os quatro apresentados, o que recomenda-se para a colheita de energia são os piezo polímeros, pelo fato de serem mecanicamente mais flexíveis, podendo suportar altas tensões, como também, baixo custo de fabricação, possuem um tempo de processamento mais rápido

do que os outros materiais. O mais utilizado é o do tipo base de chumbo, porém, por conta das restrições de uso devido a toxicidade apresentada, foi substituída pelos materiais sem chumbo, porém possuem alta densidade, coeficiente de tensão inferior e fragilidade [4].

2.2.2 Fundamentação Matemática da Piezoeletricidade

O efeito da piezoeletricidade pode ser dividido em dois fenômenos: o efeito piezoelétrico direto e o efeito da conversão piezoelétrica. A propriedade de alguns materiais de gerar um campo elétrico quando sofre uma perturbação, caracteriza o primeiro fenômeno. A conversão ou inversão piezoelétrica foi deduzida matematicamente a partir dos princípios da termodinâmica em 1881 por Lippmann [9].

O comportamento piezoelétrico dos materiais pode ser descrito pela lei de Hooke:

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (2.1)$$

No qual:

- D : é o vetor deslocamento da densidade de carga;
- ε : permissividade;
- E : força do campo elétrico aplicado.

Em um sistema definido pela lei de Hooke, aponta-se que:

$$S = s \cdot T \quad (2.2)$$

No qual:

- S : deformação sofrida pelo material piezoelétrico, este quando submetido a exposição de um campo externo;
- s : coeficiente elástico;
- T : tensão.

Quando combina-se as equações (2.1) e (2.2), obtém-se:

$$\begin{cases} \{S\} = [s^E] \cdot \{T\} + [d] \cdot \{E\} \\ \{D\} = [d^t] \cdot \{T\} + [\varepsilon^T] \cdot \{E\} \end{cases} \quad (2.3)$$

No qual:

- d : coeficiente piezoelétrico;
- $[d^t]$: matriz que descreve o efeito de conversão piezoelétrico;
- E : campo elétrico;
- t : matriz de transposição.

O efeito piezoelétrico possui quatro coeficientes, sendo estes:

$$\begin{cases} d_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial T_j} \right)^E = \left(\frac{\partial S_j}{\partial E_i} \right)^T \\ e_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial S_j} \right)^E = \left(\frac{\partial T_j}{\partial E_i} \right)^S \\ g_{ij} = \left(\frac{\partial E_i}{\partial T_j} \right)^D = \left(\frac{\partial S_j}{\partial D_i} \right)^T \\ h_{ij} = \left(\frac{\partial E_i}{\partial S_j} \right)^D = \left(\frac{\partial T_j}{\partial D_i} \right)^S \end{cases} \quad (2.4)$$

Os primeiros termos representam o efeito piezoelétrico direto, e os segundos termos o efeito de conversão piezoelétrico. Para simplificar esta relação, tem-se:

$$\begin{cases} D = d \cdot T + \varepsilon \cdot E \\ S = s \cdot T + d \cdot E \end{cases} \quad (2.5)$$

Além destas equações que regem o comportamento de um material piezoelétrico, pode-se calcular o desempenho dos coletores de energia piezoelétricos, que depende da eficiência dos transdutores de conversão mecânico-elétrica [4]. Dessa forma, a equação que caracteriza esta eficiência é:

$$E_{\%} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \quad (2.6)$$

No qual:

$$P_{out} = v_p \cdot i_p \quad (2.7)$$

$$P_{in} = F \cdot v \quad (2.8)$$

Sendo:

- v_p : tensão geral entre os eletrodos do transdutor;
- i_p : corrente que flui através do transdutor piezoelétrico, quando este possui o circuito fechado;
- F : força mecânica externa;
- v : velocidade do objeto em movimento.

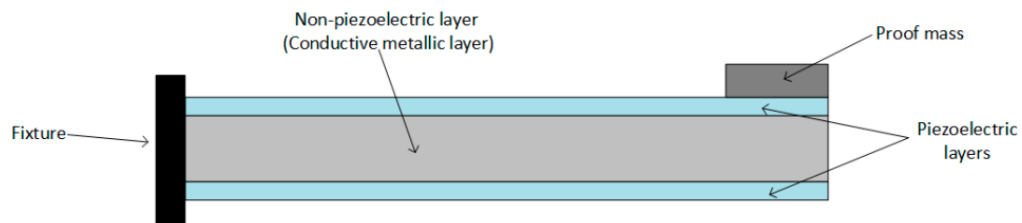
2.2.3 Tipos de Sensores

Os sistemas piezoelétricos podem ser do tipo:

- Viga em Balanço

Este sistema pode ser composto por uma camada piezoelétrica e uma camada não-piezoelétrica (camada metálica), no qual recebe o nome de uniforme; quando é composta por duas camadas piezoelétricas separadas por uma camada não-piezoelétrica, recebe o nome de biforme, como pode ser visto na Figura 2.6.

Figura 2.6 Sensor Piezoelétrico do tipo Viga em Balanço.



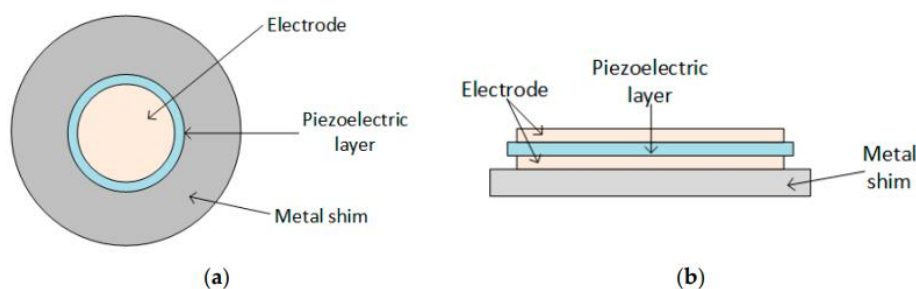
Fonte: [4].

Este tipo de sensor é um dos mais utilizados devido ao fato de que, possui uma geometria simples, baixo custo de produção, alto fator de qualidade mecânica, baixa frequência de ressonância e a saída de energia é proporcional a massa de prova; porém, caso sofra uma grande perturbação mecânica, este perde suas propriedades, ou seja, torna-se inoperante. A composição biforme é a mais escolhida dentre a outra por dobrar a produção de energia elétrica, sem que o volume do dispositivo seja aumentado.

- Circular

Formado por uma camada piezoelétrica em forma de anel, e este possui nas bordas uma camada de metal. No centro do disco existe um eletrodo, com a função de intensificar o desempenho em operação de baixa frequência, bem como, melhorar a potência de saída, conforme Figura 2.7.

Figura 2.7 Sensor Piezoelétrico do tipo Circular (a - visão frontal; b – visão lateral).



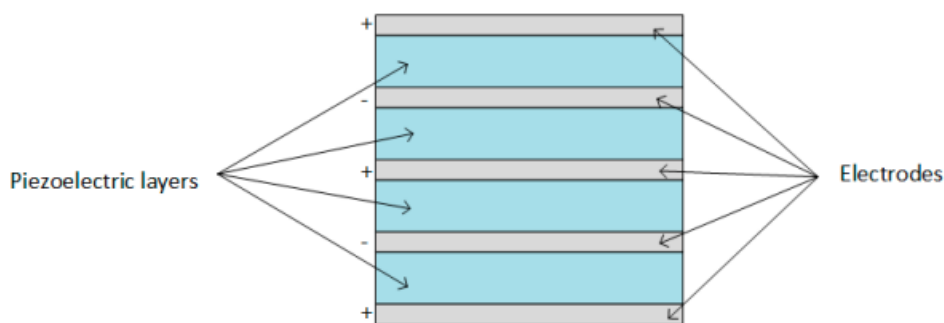
Fonte: [4].

As vantagens de utilizar este sensor dá-se pelo fato de ser compatível com o modo de operação em pressão. Porém, é mais rígido do que o sensor tipo Viga em Balanço e exigem frequências de ressonância mais altas.

- Pilha

Consiste em múltiplas camadas piezoelétricas posicionadas de forma a alinhar a força aplicada com a direção da polaridade, de acordo com a Figura 2.8.

Figura 2.8 Sensor Piezoelétrico do tipo Pilha.



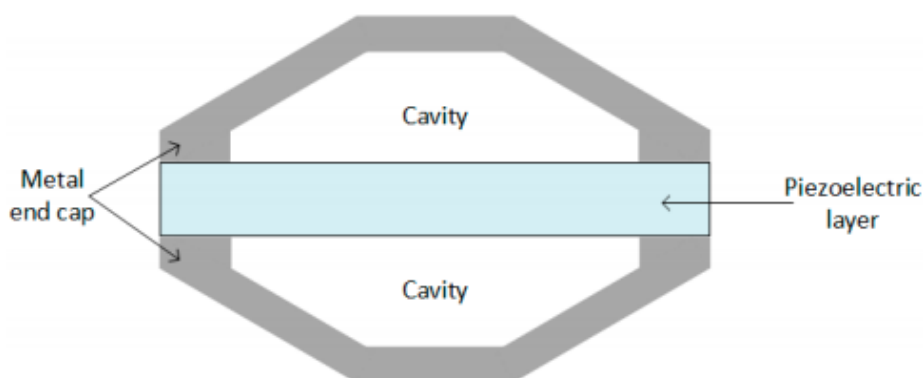
Fonte: [4].

As vantagens deste sensor caracteriza-se pelo fato de suportar alta carga mecânica e ser adequado para operação em modo de pressão, porém, possui alta rigidez.

- Prato

Camada piezoelétrica situada entre duas camadas de metal, conforme Figura 2.9. Ao aplicar uma perturbação nas camadas de metal, aquele é amplificado e convertido a uma perturbação radial o que leva a um maior coeficiente piezoelétrico, dessa forma, a uma maior geração de carga.

Figura 2.9 Sensor Piezoelétrico do tipo Prato.



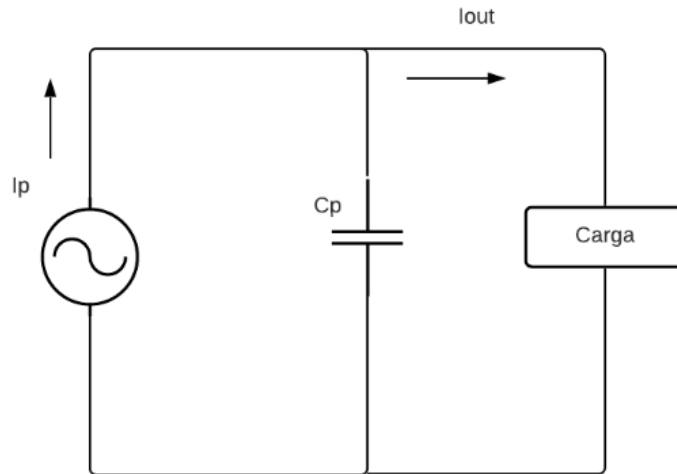
Fonte: [4].

Recomendado quando deseja-se uma alta produção de energia e quando irá ser aplicado uma grande quantidade de força. Em contrapartida, é limitado a aplicações que demandam uma alta magnitude de fontes de vibração.

2.2.4 Modelagem do Sensor Piezoelétrico

O circuito elétrico que representa o sensor piezoelétrico é mostrado na Figura 2.10, onde nota-se que o sensor possui uma corrente alternada, denominada I_p , em paralelo com um capacitor e uma carga conectada.

Figura 2.10 Modelagem do Sensor Piezoelétrico.



Fonte: Autor.

Assim sendo, caso a carga da Figura 2.10 seja um resistor, para calcular a máxima potência de saída de um sensor, pode-se utilizar a seguinte equação:

$$P = \frac{V^2}{R} = I^2 \cdot R \quad (2.9)$$

Sendo P a máxima potência de saída, V a tensão ao longo do circuito e I a corrente do circuito. Porém, para a representação do modelo, é necessário calcular a potência média do sistema, caso a entrada seja do tipo alternada, tem-se:

$$P_{avg} = V_{RMS} \cdot I_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{pico} \cdot I_{pico}}{2} \quad (2.10)$$

Caso a entrada seja um pulso, este deve ser calculado da seguinte forma:

$$P_{avg} = \frac{1}{T_{pulso}} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{V(t)^2}{R} dt = \frac{1}{T_{pulso}} \cdot \int_{t_1}^{t_2} I(t)^2 \cdot R dt \quad (2.11)$$

Sendo:

- R : resistência conectada ao sistema;
- t_1 : tempo inicial do pulso;
- t_2 : tempo final do pulso;
- T_{pulso} : é a duração do pulso.

Neste caso, quando tenha-se um pulso de fonte de entrada, o tempo de duração da tensão de saída gerada é pequeno, em consequência disso, recomenda-se a utilização de um capacitor na saída da colheita de energia, para que seja possível o carregamento do mesmo. Nessa perspectiva, chama-se de E a energia gerada, V a tensão de saída e C a capacitância, podendo ser calculada da seguinte forma:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \quad (2.12)$$

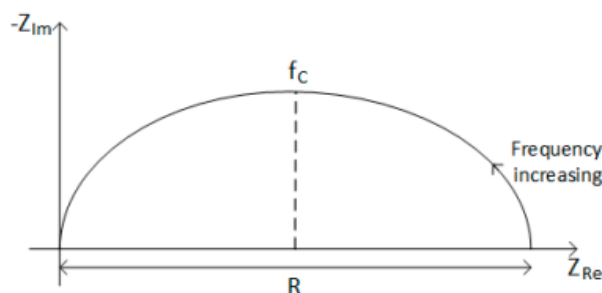
Ao modelar a forma de calcular a energia gerada, bem como, a potência gerada através do resistor e capacitor adicionado ao sistema, deve-se analisar o comportamento destes elementos passivos.

A partir de um gráfico de Nyquist (baseado na resposta de frequência), conforme Figura 2.11, elenca-se a representação da impedância resistiva, esta sendo um componente independente, e a impedância reativa, sendo um componente dependente.

A relação entre as impedâncias dá-se pelo semicírculo, no qual, a resistência equivale ao diâmetro da curva e o valor da capacitância pode ser determinado pela frequência f_c . Assim, pode-se determinar a impedância do sistema como um circuito RC, pela equação:

$$RC = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c} \quad (2.13)$$

Figura 2.11 Comportamento da Impedância.



Fonte: [3].

2.2.5 Associação de Sensores Piezoelétricos

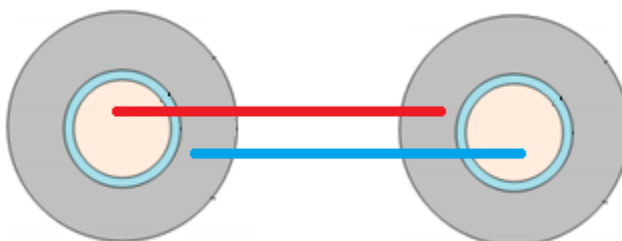
Comentou-se anteriormente, a respeito da potência máxima capturada pelos sensores, como também, da necessidade de acrescentar um capacitor na saída da colheita de energia com o objetivo de monitorar a captação de tensão. Portanto, com o intuito de aumentar a energia capturada, pode-se realizar a associação dos sensores piezoelétricos.

Utilizando o sensor do tipo circular como exemplo, é possível realizar as seguintes associações:

- Associação em Série

Esta associação caracteriza-se pela ligação do polo positivo de um sensor ao polo negativo de outro sensor, vide Figura 2.12. Esta configuração faz com que ocorra a soma das tensões.

Figura 2.12 Associação em Série.

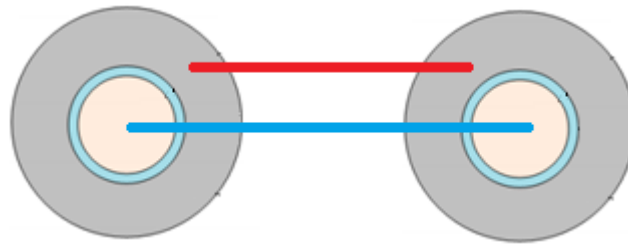


Fonte: [15].

- Associação em Paralelo

Neste, o polo positivo de um sensor é conectado ao polo positivo de outro sensor, e seu polo negativo é conectado ao polo negativo daquele, como pode ser visto na Figura 2.13. Ao contrário do anterior, as correntes se somam.

Figura 2. 13 Associação em Paralelo.



Fonte: [15].

- Associação Mista

Neste, realiza-se, primeiramente, a associação de sensores em paralelo, após, estes são conectados em série. Esta organização tem como finalidade aumentar a corrente e a tensão capturadas pelo sistema.

3. METODOLOGIA

Como mencionado anteriormente, foram utilizados sensores piezoelétricos para coletar a vibração. Neste trabalho, a vibração mecânica produzida por motores de indução durante seu funcionamento, serviram de fonte para a coleta de energia.

O motor de indução é caracterizado por não possuir corrente contínua de campo, para que a máquina funcione é necessário, apenas, que os enrolamentos do estator sejam alimentados por corrente elétrica que o fenômeno da indução dará origem à tensão do rotor e, conseqüentemente, a corrente do rotor e ao campo magnético do rotor. As características construtivas conferem um elevado grau de robustez para este tipo de motor, o que justifica o fato de ser o motor mais utilizado e por este motivo, foi inicialmente escolhido para a análise presente neste trabalho.

As leituras do sinal de vibração mecânica dos motores de indução foram obtidas experimentalmente medindo-se a tensão gerada pelos sensores piezoelétricos por meio do osciloscópio. Dessa forma, foi possível salvar os dados referentes aos sinais de vibração para posterior análise. Estes dados foram salvos em formato de planilhas que possibilitaram a importação para o *software Matlab*. A Figura 3.1 representa a sequência de ações realizadas para validar os circuitos utilizados.

Como a tensão gerada pelo sensor piezoelétrico tem característica alternada (vide Fig. 2.10), é necessário realizar a retificação da tensão, para que esta energia possa ser aplicada em uma bateria. Além da retificação, é desejável que a tensão gerada possa ser elevada, dado que normalmente os sensores piezoelétricos produzem um nível de tensão bastante baixos. A Figura 3.1 ilustra o sistema proposto.

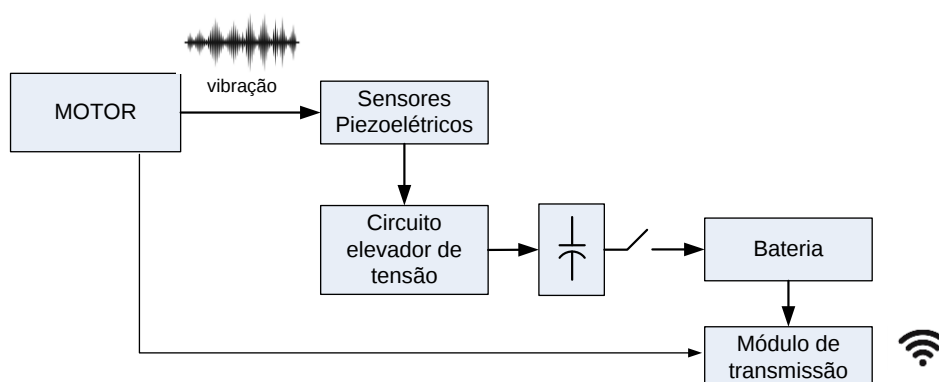
Na sequência, serão abordados alguns circuitos elétricos que podem ser adotados para condicionar a tensão gerada.

Figura 3.1 Sequência de ações realizadas para validar os circuitos utilizados.



Fonte: Autor.

Figura 3.2 Sistema de colheita de energia da vibração



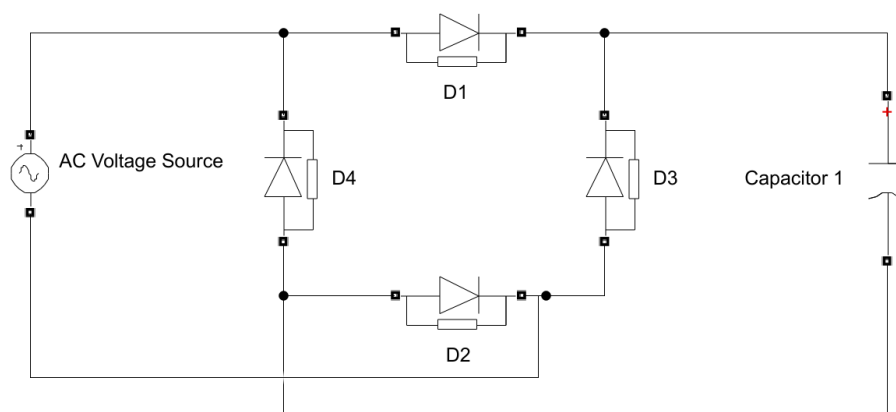
Fonte: Autor.

3.1. PONTE RETIFICADORA

Para retificar a forma de onda na saída dos sensores piezoelétricos, pode-se utilizar a clássica ponte de diodos, conforme a Figura 3.3 [16]. A ponte retificadora ao receber a tensão alternada da fonte, utiliza 4 diodos, para disponibilizar na saída uma tensão de natureza contínua. Neste caso, são utilizados diodos do tipo 1N4407, constantemente presentes em circuitos eletrônicos. Seu comportamento baseia-se na condução de 2 diodos em cada semiciclo, onde, os diodos 1 e 4 atuam no semiciclo positivo quando a tensão da fonte é maior

que a tensão no capacitor; e os diodos 2 e 3 nos semiciclo negativo, quando a tensão da fonte é menor que a tensão no capacitor [17].

Figura 3.3 Ponte Retificadora



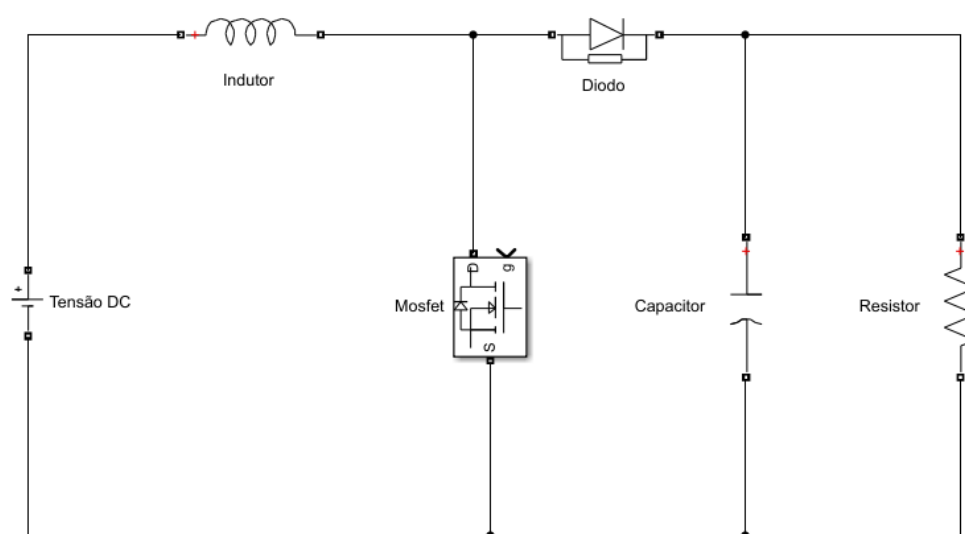
Fonte: Autor.

3.2. CONVERSOR BOOST

Uma das maneiras de condicionar o sinal provido dos sensores, é a utilização do conversor boost. Em [18] este tipo de conversor foi utilizado em uma aplicação de colheita de energia. Este tipo de conversor, do tipo CC/CC, é designado como um elevador de tensão, dessa forma, possui a finalidade de aumentar a magnitude da tensão de saída. O circuito do conversor boost pode ser visualizado na Figura 3.4.

Na primeira etapa de operação, a tensão de entrada é utilizada para armazenar energia no indutor; na segunda etapa, a energia é entregue à carga, de modo que, a tensão da indutância se soma a da entrada e há ganho de tensão [17]. Estudos foram realizados para parametrizar a razão cíclica (razão entre o tempo de operação e o período). Na Figura 3.4, é possível observar que o conversor boost possui um elemento ativo, o Transistor de Efeito de Campo de Metal-Óxido (Mosfet), o que requer um circuito de gatilho para atuar devidamente, mas que consome energia.

Figura 3.4 Conversor Boost.

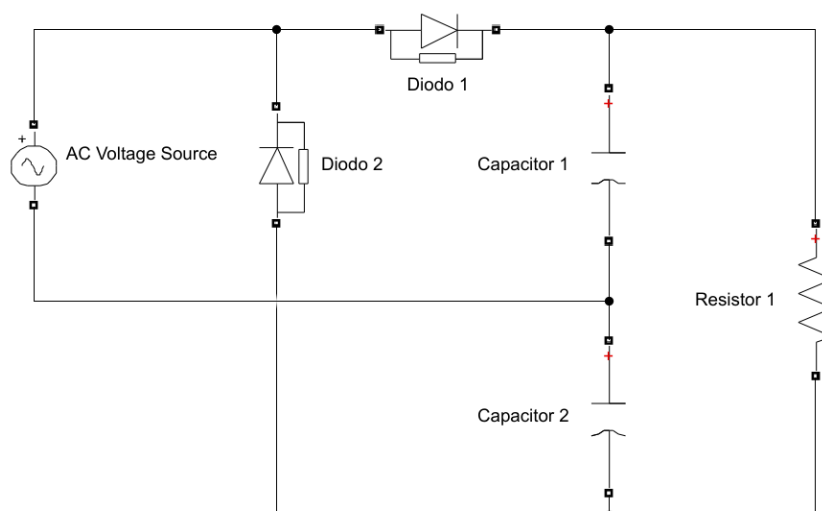


Fonte: Autor

3.3. DOBRADOR DE TENSÃO

Como uma alternativa à utilização do conversor boost, é possível empregar o dobrador de tensão, com a diferença de que este possui como entrada, a tensão alternada, enquanto aquele, possui como entrada a tensão contínua. Além disso, o dobrador de tensão possui elementos passivos e é bastante simples. Este circuito, mostrado na Figura 3.5, é formado

Figura 3.5 Dobrador de Tensão



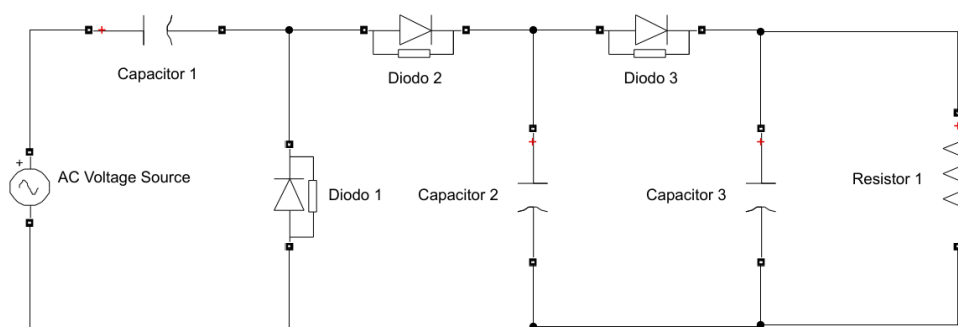
Fonte: Autor.

por capacitores e diodos, e seu comportamento se baseia em dois ciclos; o primeiro, ciclo positivo, o Diodo 1 está em condução e carrega o Capacitor 1; no segundo ciclo, o Capacitor 2 é carregado e o Diodo 2 está em condução. Como resultado, a tensão armazenada nos dois capacitores é duas vezes a tensão de entrada. Em [19] este tipo de circuito foi utilizado como forma de elevar a tensão gerada pelos sensores piezoelétricos. Observa-se na Figura 3.5 que os dois diodos atuam em ciclos diferentes, caracterizando um retificador de meia onda, não sendo necessária a utilização da ponta retificadora tal como descrito no item 3.1.

3.4. TRIPLICADOR DE TENSÃO

Com o objetivo de elevar a tensão gerada ainda mais, é possível utilizar o circuito triplicador de tensão, de acordo com a Figura 3.6. Esta topologia possui os mesmos elementos do duplicador de tensão, porém, em quantidade e disposição distintos.

Figura 3.6 Triplicador de tensão.



Fonte: Autor.

O princípio de funcionamento é o mesmo que o do esquema da Figura 3.5, porém, com este comportamento, a tensão é triplicada. Apesar da possibilidade de triplicar a tensão, é necessário avaliar as perdas adicionais no diodo e no capacitor.

3.5. TRANSFORMADOR TOROIDAL

Como alternativa para elevar o nível da tensão gerada, pode-se utilizar um transformador do tipo toroidal. Conforme [20],

O transformador é um dispositivo que converte, por meio da ação de um campo magnético, a energia elétrica CA de uma dada frequência e nível de tensão em energia elétrica CA de mesma frequência, mas outro nível de tensão. Ele consiste em duas ou mais bobinas de fio enroladas em torno de um núcleo ferromagnético comum.

O transformador toroidal é formado pelo núcleo em formato de anel e por possuir faixas laminadas de metal que estão bem fixadas. Além disso, possuem peso reduzido e a quantidade de cobre é relativamente reduzida em relação aos transformadores para fins de distribuição. Tendo a forma de anel, o cobre está em contato direto com o núcleo, o que ocasiona a maior concentração do fluxo magnético, diminuindo, dessa forma, as perdas eletromagnéticas [21].

Este dispositivo é empregado com mais frequência em circuitos eletrônicos, com a finalidade de obter-se um transformador com alto nível de rendimento, justificado por suas características estruturais. Em [22], os autores utilizam um transformador em um dos estágios para elevar a tensão produzida por um dispositivo de coleta de energia de vibração.

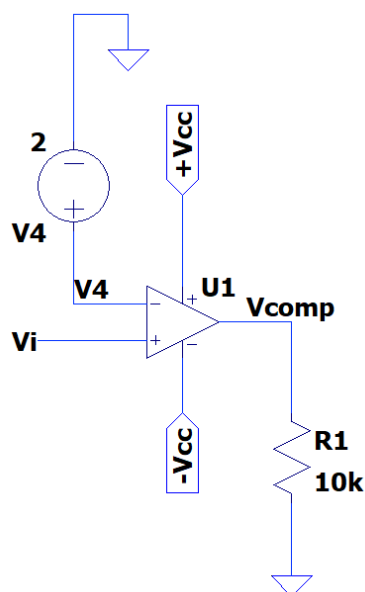
3.6. CIRCUITO COMPARADOR DE TENSÃO

Nota-se pelos circuitos apresentados, diferentes possibilidades para elevar a tensão obtida pelos sensores a partir do efeito piezoelétrico, sendo alguns destes circuitos constituídos por elementos passivos (indutor, capacitor e resistor), bem como, elementos ativos (Mosfet).

Entretanto, além de coletar energia e utilizar um circuito adequado para condicioná-la (elevar), é necessário controlar esta energia, ou seja, armazená-la em um capacitor até que o nível de tensão seja suficiente para então ser liberada para a carga. Para isso, propõe-se utilizar um transistor acionado por um circuito comparador de tensão. Dessa forma, quando a tensão no capacitor de armazenamento atinge um determinado valor, o transistor é acionado, caso contrário, ou seja, se o capacitor não possui carga suficiente, esta chave permanece aberta.

Portanto, utilizou-se um amplificador operacional como comparador de tensão, o qual, como o próprio nome menciona, tem a função de comparar as tensões. Conforme ilustrado na Figura 3.7, quando a tensão da entrada positiva (V_i) é maior que a tensão da porta inversora (V_4), tem-se a saturação positiva, um pulso é gerado através da saída (V_{comp}); porém, quando isto não é verdade, tem-se a saturação negativa [23].

Figura 3.7 Comparador de Tensão – Amplificador Operacional.

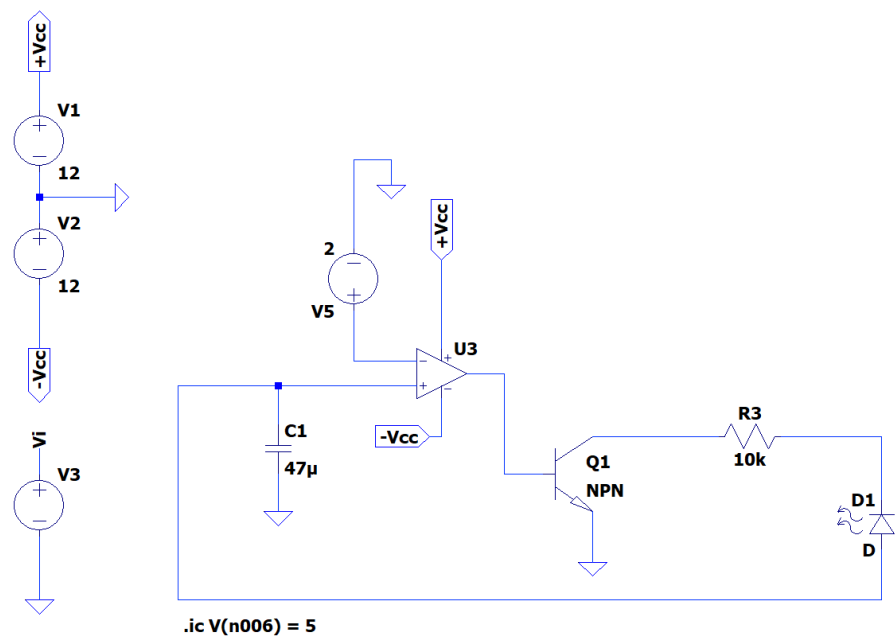


Fonte: Autor.

Para que esta lógica seja aplicável, estudou-se a forma de unir o sistema da Figura 3.7 com a chave de bloqueio Q1. Esta chave consiste em um transistor ou uma chave ideal.

Na Figura 3.8, nota-se que a tensão no capacitor C1 está sendo comparada com a tensão V_5 , ou seja, enquanto a tensão sobre o capacitor for maior que a tensão V_5 , o transistor conduz e a própria tensão do capacitor alimenta o circuito com o led, utilizado como carga para efeitos de visualização. Porém, ao acender o led, o capacitor descarrega, levando a saturação negativa do sistema e o led volta a condição inicial, desligado. Este circuito foi testado experimentalmente e os resultados obtidos são apresentados no capítulo 4.

Figura 3.8 Circuito Comparador com Amplificador Operacional.



Fonte: Autor.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações e experimentos realizados utilizando os circuitos e sensores demonstrados nos capítulos anteriores. Primeiramente, são comentados os resultados obtidos pelo sensor circular. Na sequência, os resultados obtidos pelo sensor de vibração da PCB Piezoeletrônicos.

4.1 SENSOR PIEZOELÉTRICO CIRCULAR

Neste trabalho o sensor utilizado para validar experimentalmente os circuitos mostrados no capítulo 3, foi o sensor circular, devido sua disponibilidade no laboratório de estudo.

Nessa perspectiva, com a intenção de aproveitar melhor o sinal de vibração, utilizou-se a associação série dos sensores piezoelétricos circulares, conforme Figura 4.1. Para analisar a eficiência desta associação, aplicou-se a vibração por meio de impactos manuais em seu núcleo e observou-se que estes sensores possuem maior eficiência quando a força mecânica é aplicada de maneira pontual.

Figura 4.1 Associação Série dos Sensores Piezoelétricos.



Fonte: Autor.

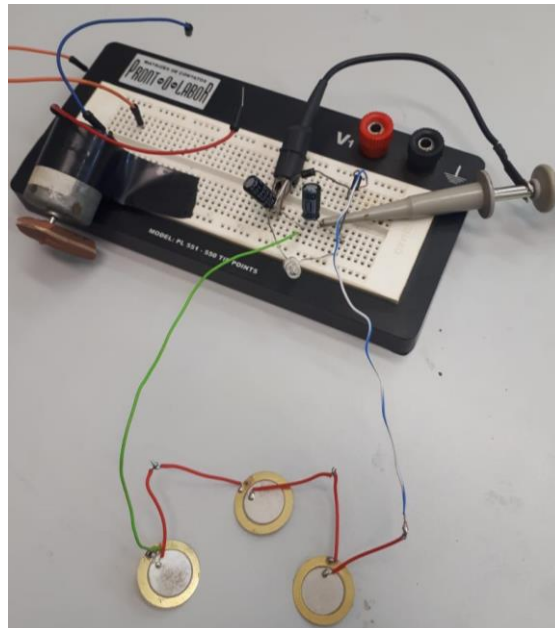
Utilizando a associação mostrada na Figura 4.1 e mediante ensaios em circuitos apresentados anteriormente, foi avaliada a solução que melhor se adequa à proposta deste trabalho. Conclui-se que:

- O transformador toroidal que poderia gerar um ganho de tensão ao sistema não atende a esta demanda. Este elemento foi confeccionado para possuir a relação de 1:10, porém ao realizar testes com este dispositivo, nota-se que a energia armazenada nos sensores em série, não foi capaz de gerar a corrente de magnetização necessária. Também foi testada a configuração paralelo dos sensores piezoelétricos, porém a corrente ainda foi muito baixa devido à quantidade de sensores disponíveis (5 unidades). Diante disso, a utilização do transformador foi descartada.
- O circuito experimental com o triplicador de tensão não apresentou bons resultados por conta das quedas de tensão nos diodos. Sua análise foi realizada, apenas, por meio de simulações.
- O circuito do boost poderia apresentar problemas com a baixa corrente de entrada para o indutor, como também descontinuidade na tensão de entrada, além do fato de exigir um circuito de gatilho ativo. Por este motivo, o sistema com o conversor boost também foi descartado.

No caso, o circuito dobrador de tensão foi o que melhor respondeu à proposta. Na sequência serão apresentados testes experimentais com o circuito dobrador e comparador. A utilização da associação em série com o dobrador de tensão, pode ser observado na Figura 4.2.

Como representado na Figura 3.4, a fonte de tensão alimenta os dois capacitores e os dois diodos, dessa forma, na Figura 4.2, a fonte de tensão (associação dos sensores piezoelétricos para converter a força aplicada em tensão), foi conectada entre os diodos e os capacitores. Utilizou -se o osciloscópio para sensoriar a saída do circuito, cujo resultado é mostrado na Figura 4.3.

Figura 4.2 Associação Série no circuito Duplicador de Tensão.



Fonte: Autor.

Figura 4.3 Tensão de saída do Dobrador de Tensão.

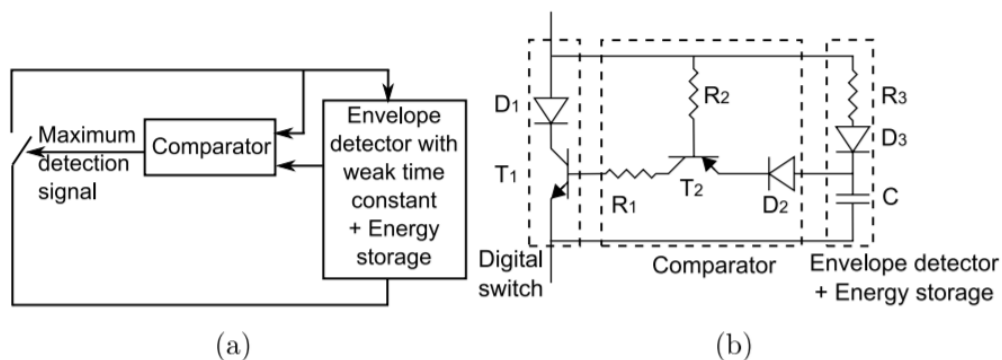


Fonte: Autor.

O osciloscópio apresenta um resultado de 3 V, o que seria suficiente para acender o led, que conforme mencionado anteriormente, foi adotado como carga para efeito de teste. Para avaliar o circuito completo, ainda é preciso implementar o comparador.

Lallart e Guyomar [24], apontaram, em seus estudos o esquema do comparador, para que o mesmo realiza-se o chaveamento no sistema, vide Figura 4.4.

Figura 4.4 Esquema do chaveamento com transistor – (a) diagrama, (b) implementação.

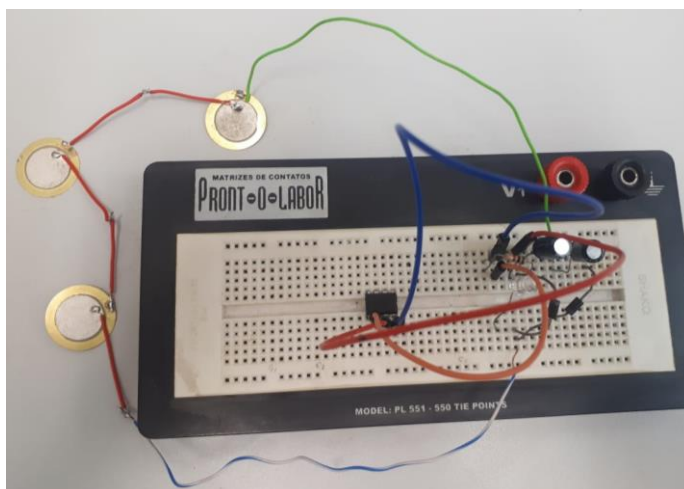


Fonte: [24].

Após realizar as devidas conexões entre os elementos do sistema, aplicou-se a mesma força manual nos sensores, e o resultado obtido foi a tensão de saída em 5,0 V, porém sem o acionamento do transistor para acender o led. Ao aplicar a força com uma maior intensidade, o resultado foi o mesmo, uma tensão capaz de acender o led, porém, sem o acionamento do transistor para realizar este chaveamento.

Nessa perspectiva, a solução adotada foi a do comparador de tensão com amplificador operacional. A implementação do duplicador de tensão com este comparador, é mostrado na Figura 4.5.

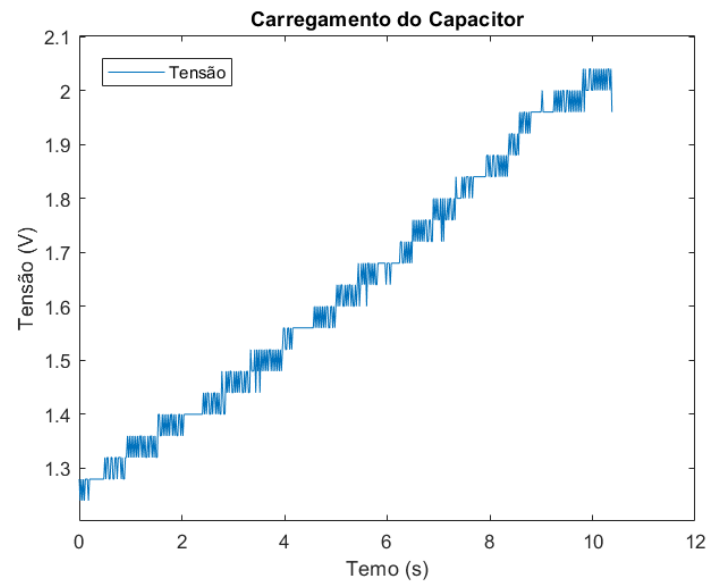
Figura 4.5 Implementação do duplicador de tensão com o comparador formado por amplificador de tensão.



Fonte: Autor.

Aplicando-se a mesma fonte de vibração anteriormente, analisa-se o capacitor sendo carregado conforme a aplicação da força no sensor piezoelétrico, como pode ser visto na Figura 4.6.

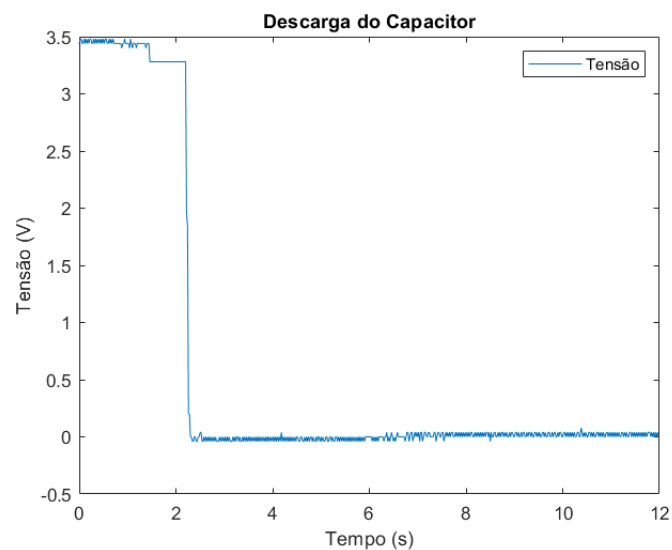
Figura 4.6 Forma de onda experimental da tensão sobre o capacitor.



Fonte: Autor.

Ao atingir cerca de 3,5 V, o transistor aplica a tensão do capacitor sobre o led, que acende e provoca a descarga do capacitor, conforme Figura 4.7.

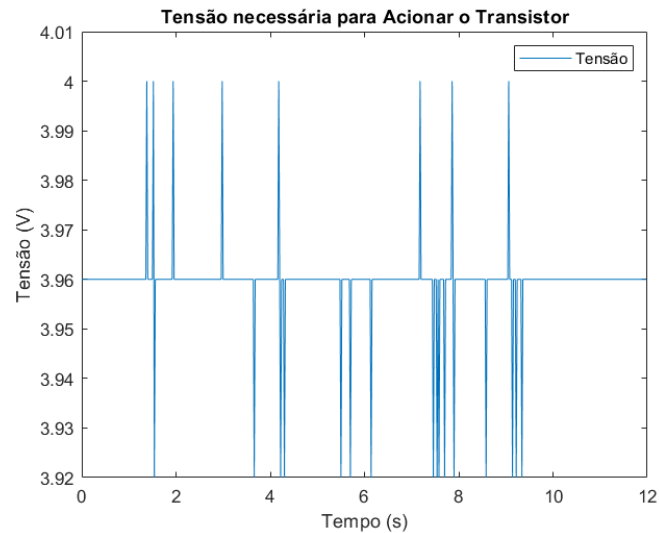
Figura 4.7 Descarga do Capacitor.



Fonte: Autor.

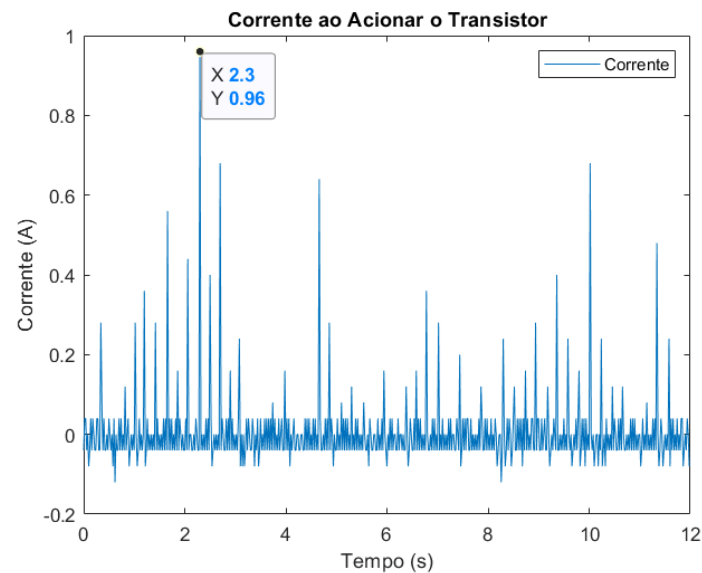
Caso a força continue sendo aplicada ao sistema, o led acende e apaga, como pode ser demonstrado pela Figura 4.8. A Figura 4.9, retrata o comportamento da corrente neste experimento.

Figura 4.8 Tensão necessária para Acionar o Transistor.



Fonte: Autor.

Figura 4.9 Comportamento da Corrente ao Acionar o Transistor.



Fonte: Autor.

Por meio destes experimentos foi possível observar o aproveitamento da energia de vibração para testar os circuitos elétricos propostos. Contudo, uma análise preliminar em um motor, demonstrou que este sensor circular não responderia de maneira satisfatória quando aplicado em motores, visto que sua resposta depende de uma força direta sobre o núcleo do sensor.

Assim sendo, os resultados a partir da vibração dos motores de indução foram analisados apenas por simulações, utilizando a vibração captada por um sensor PCB Piezoeletrônico comercial.

4.2 SENSOR PCB PIEZOELETRÔNICO

A PCB Piezoeletrônicos, é uma empresa fabricante e fornecedora de acelerômetros, tensão e sensores de pressão [25]. Os sensores piezoelétricos, representados pela Figura 4.10, são capazes de aguentar até temperaturas de 180°C.

Figura 4.10 Sensor PCB Piezoeletrônico



Fonte: [26].

Este sensor é formado por Quartzo e Cerâmica e deve ser conectado a um condicionador de sinal, conforme pode ser visto na Figura 4.11. Também é utilizado uma cera adesiva própria para fixar este sensor no objeto de estudo, conforme Figura 4.12.

É importante mencionar que este sensor foi utilizado apenas com a finalidade de analisar a vibração dos motores. Posteriormente, a capacidade de geração de energia elétrica a partir desta vibração foi feita por meio de simulações.

Figura 4.11 Condicionador de Sinal.



Fonte [27].

Figura 4.12 Cera para fixação do sensor.



Fonte: [28].

A modelagem do sistema foi realizada, na ferramenta *Simulink* do software *Matlab*. Esta que constitui-se em implementar a energia captada pelos sensores no *Matlab*, e, importar para o *Simulink*, sendo possível, avaliar o comportamento desta energia em diferentes circuitos.

Como apresentado na seção anterior, o circuito capaz de gerar uma resposta satisfatória, foi o dobrador de tensão em conjunto com o comparador de tensão, conforme testado experimentalmente com o sensor circular.

Ao utilizar o sensor piezoelétrico é possível armazenar os dados do comportamento da tensão em função da vibração do motor. Sendo assim, este armazenamento se dá por

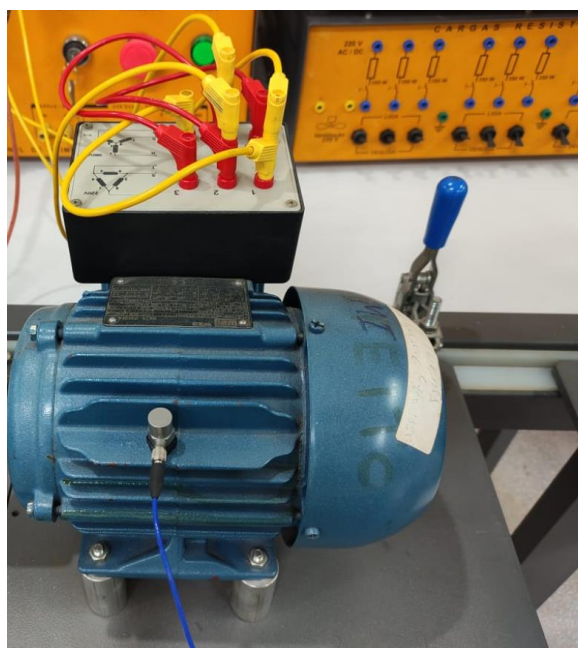
planilhas no *excel*, no qual, é possível importar para o software *Matlab*, através da ferramenta *import data*, da forma de uma matriz numérica, esta formada por duas colunas, sendo a primeira, a coluna do tempo, e a segunda coluna, a de vibração.

É necessário realizar certas modificações destes dados importados para que sua simulação seja efetivada, no qual, o código utilizado é apresentado no Apêndice A. Primeiramente, deve-se criar um vetor tempo, com o intervalo correto entre uma medição e outra. A posteriori, deve-se salvar os valores de vibração em outra variável, ou seja, separar, efetivamente, os dados importados. Por fim, para implementar estes dados na ferramenta *Simulink*, foi utilizado o bloco *repeating sequence*, com as variáveis obtidas pelo código do Apêndice A, este irá fazer com que a tensão capturada pelo sensor seja repetida durante o ciclo de tempo escolhido para a simulação.

4.2.1 Motor de Indução

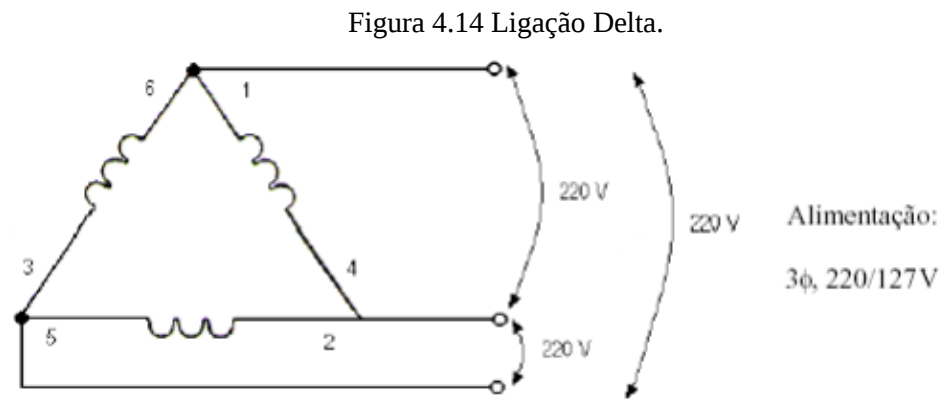
A primeira fonte de vibração considerada para este sensor foi o motor de indução, com uma potência de 0,5 cv. Fixou-se o sensor piezoelétrico na carcaça do motor através da cera adesiva, conforme a Figura 4.13.

Figura 4.13 Motor de Indução.



Fonte: Autor.

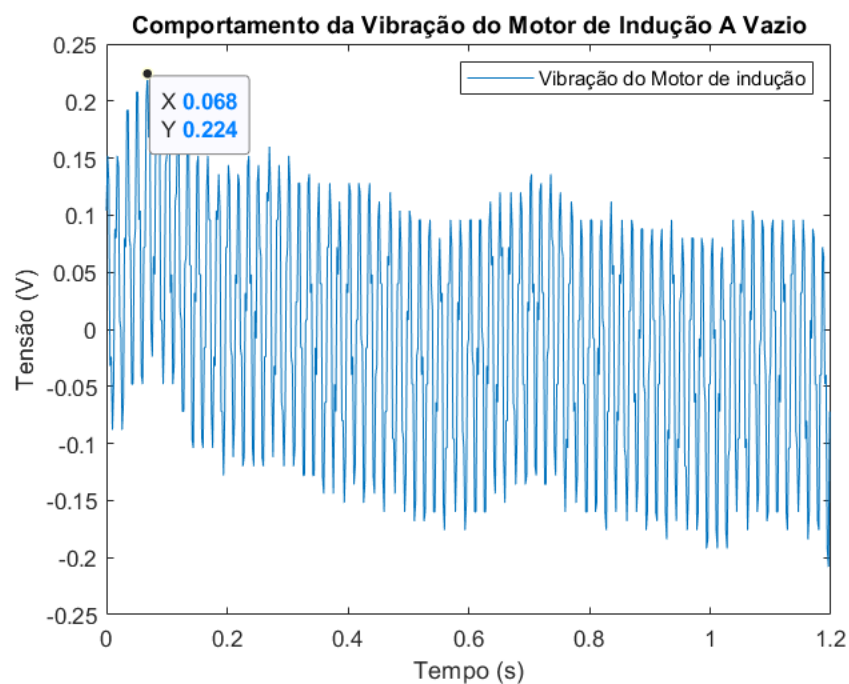
O acionamento do motor em delta é caracterizado pelo seguinte esquema, Figura 4.14.



Fonte: [29].

Ao partir do acionamento do motor, utilizou-se o osciloscópio para armazenar as vibrações capturadas pelo sensor. Ao acionar este motor, primeiramente à vazio, a vibração obtida está representada na Figura 4.15.

Figura 4.15 Sinal de Vibração – Motor de Indução.



Fonte: Autor.

Observa-se que sem carga, a tensão máxima obtida é da ordem de 0,224 V.

Aplicou-se cargas no eixo do motor, retratado pelo Freio de Foucault, conforme ilustra a Figura 4.16.

Figura 4.16 Freio de Foucault acoplado ao Motor de Indução.



Fonte: Autor.

Dois níveis de carga foram considerados neste teste, sendo eles abordados na Tabela 4.1.

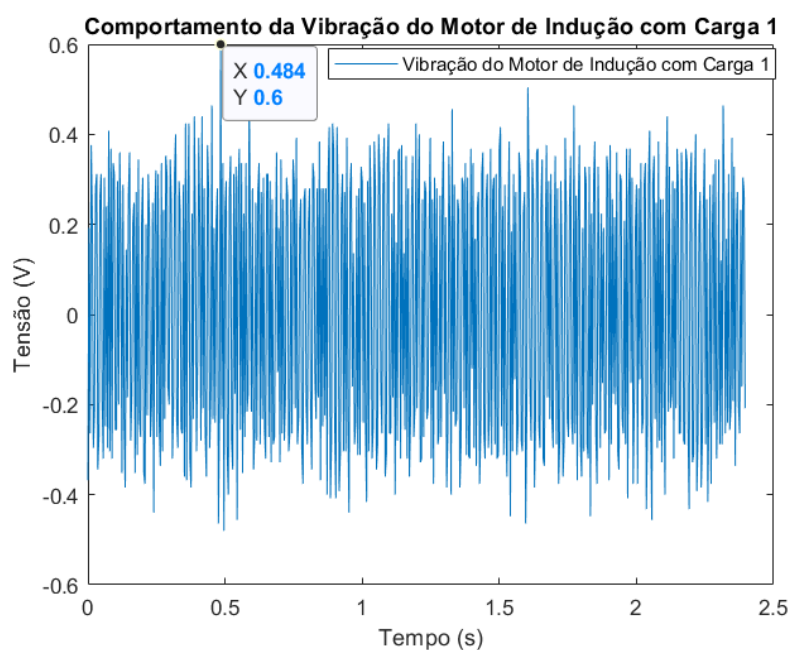
Tabela 4.1 Torque aplicado e velocidade de operação – Motor de Indução.

Velocidade (rpm)	Torque (N.m)
1769	0,5
1755	1,34

Fonte Autor.

Dessa forma, os resultados obtidos da carga 1, serão primeiramente apresentados. Ao aplicar um torque de $0,5 \text{ N.m}$ e obter uma velocidade de 1769 rpm , foi possível armazenar a vibração obtida nesta condição e ao executar o código do Apêndice A, o comportamento do sinal de vibração é apresentado na Figura 4.17. A máxima tensão obtida nesta condição de carga é de $0,6 \text{ V}$.

Figura 4.17 Comportamento da Vibração do Motor de Indução com a Carga 1.

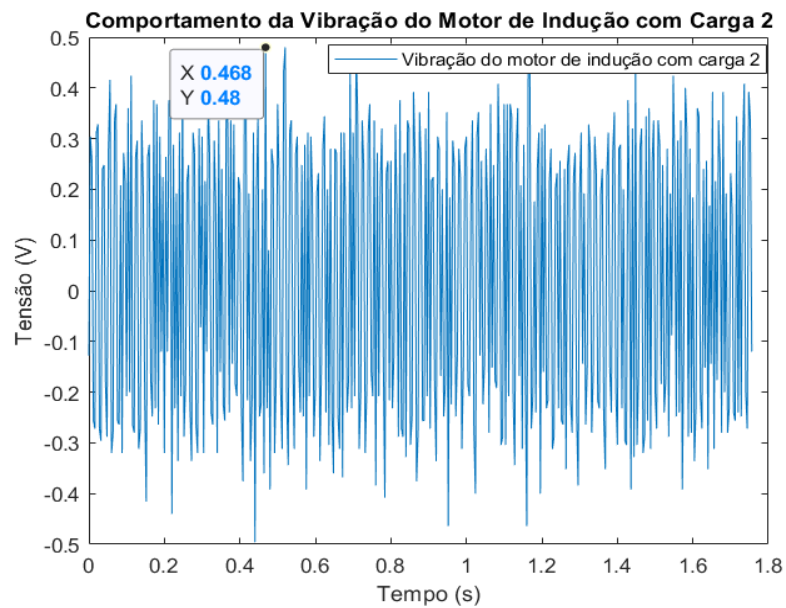


Fonte: Autor.

Aplicando uma carga de $1,34 \text{ N.m}$ e a velocidade de 1755 rpm , os resultados obtidos por essa fonte de tensão constam na Figura 4.18. A máxima tensão obtida de $0,48 \text{ V}$, mesmo sendo maior que a do motor sem carga, seu resultado mostra-se menor do que obtido na Figura 4.17.

Ao analisar previamente os resultados obtidos com este motor considerou-se que não seriam satisfatórios para que fosse realizada a simulação via *Simulink*, visto que, na operação de uma indústria espera-se que a vibração em motores de maior porte podem dar origem a vibrações igualmente maiores.

Figura 4.18 Comportamento da Vibração – Motor de Indução com Carga 2.

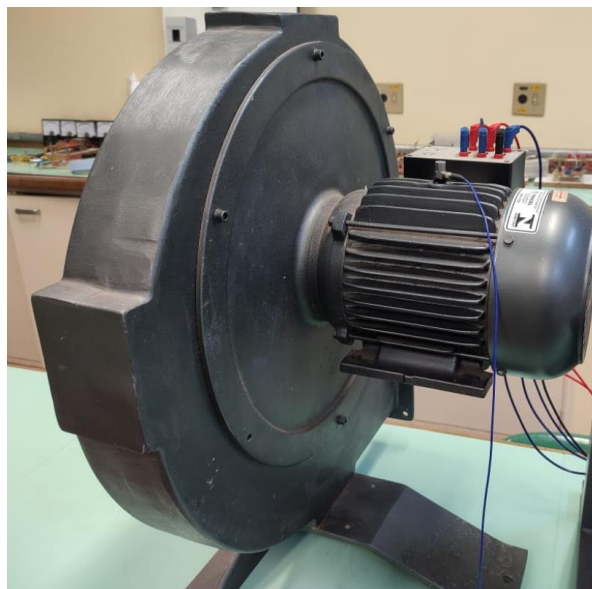


Fonte: Autor.

4.2.2 Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento

A fim de considerar uma fonte de vibração maior, realizou-se os testes em um motor de potência de 4 cv. Conforme ilustra a Figura 4.19, este motor é utilizado em um exaustor.

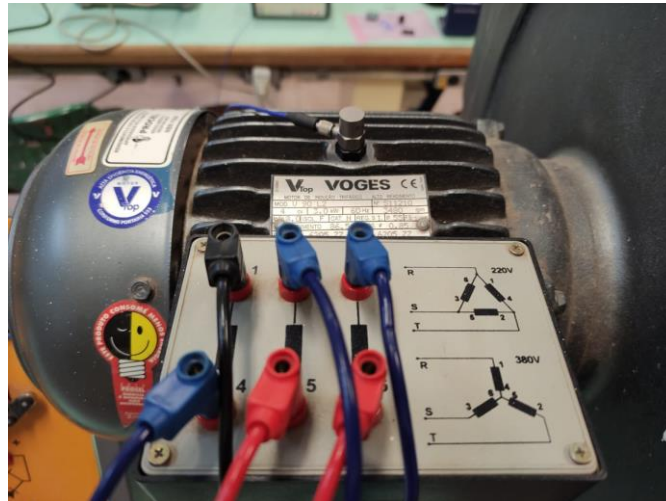
Figura 4.19 Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento.



Fonte: Autor.

O sensor da PCB foi fixado, por meio da cera, na carcaça deste motor, conforme Figura 4.20.

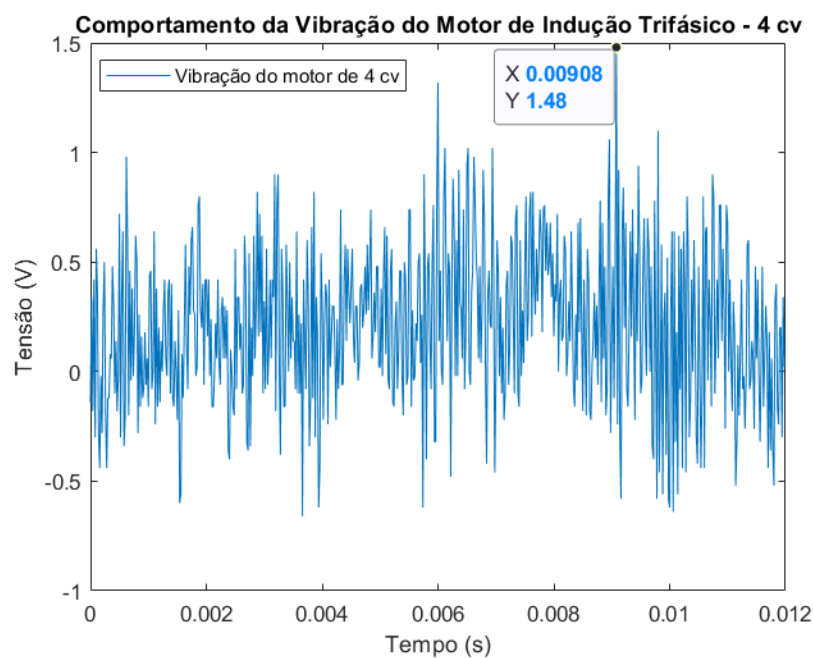
Figura 4.20 Sensor PCB conectado ao Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento.



Fonte: Autor.

Ao plotar o sinal de vibração capturado através *software Matlab*, tem-se o sinal de vibração mostrado na Figura 4.21.

Figura 4.21 Sinal de Vibração – Motor de Indução Trifásico de Alto Rendimento.

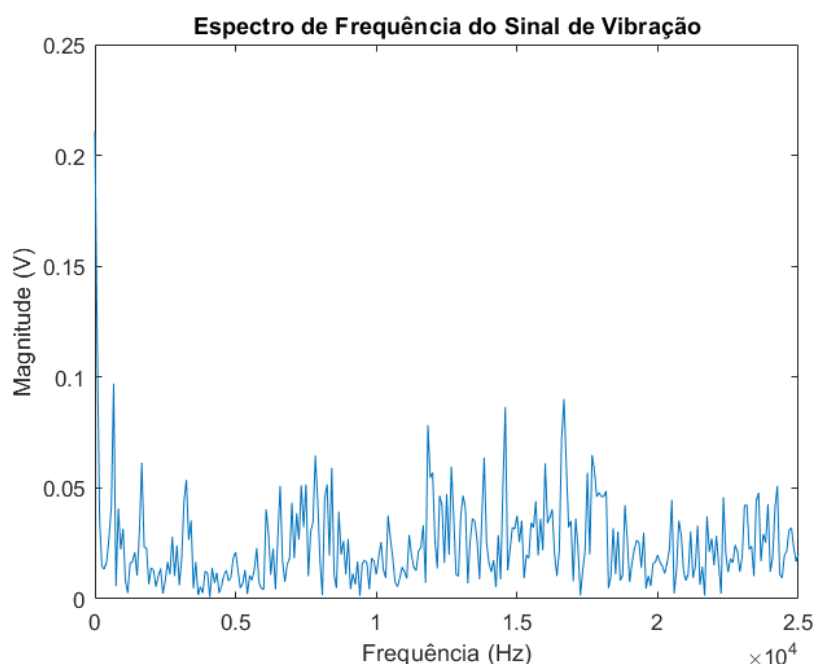


Fonte: Autor.

A Figura 4.21 mostra que a máxima tensão gerada pela vibração do motor é de $1,48\text{ V}$ em $0,009\text{ s}$. Dentre os motores disponíveis para testes no laboratório, este resultado foi o que apresentou maior nível de vibração. Portanto, na análise que segue, importou-se este sinal para a ferramenta *Simulink*, para simular o aproveitamento da energia.

Na Figura 4.22 é possível observar o espectro da frequência para o sinal da Figura 4.21. Observa-se que o sinal de vibração apresenta um espectro de frequências amplo, com componentes de maior amplitude em aproximadamente 1 kHz e entre 10 e 20 kHz . A análise da faixa de frequências presentes no sinal também é importante para definir o sensor piezoelétrico a ser utilizado nesta aplicação.

Figura 4.22 Espectro de Frequência do Sinal de Vibração.



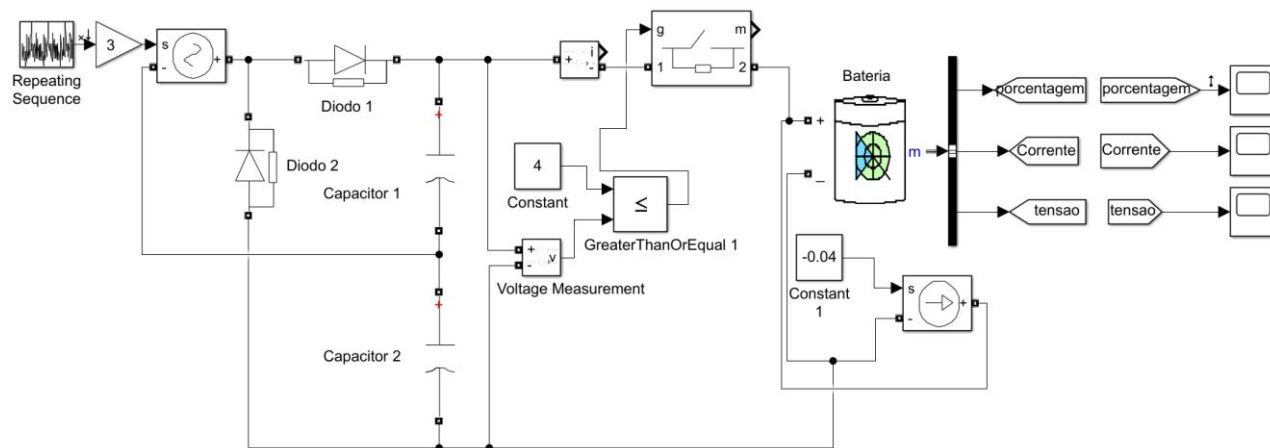
Fonte: Autor.

4.2.2.1 Simulação do Circuito Dobrador com Comparador de Tensão

Neste esquema não faz-se necessário a utilização da ponte retificadora, visto que os diodos que constituem o dobrador de tensão, realizam a retificação de meia onda. Conforme ilustrado na Figura 4.23 o sinal de vibração obtido experimentalmente no motor de 4 cv é utilizado como fonte de tensão alternada. A energia gerada é utilizada para carregar uma

bateria de Lítio, que por sua vez alimenta uma placa de comunicação *wireless* do tipo ZigBee. As características desta placa estão no Apêndice B.

Figura 4.23 Modelagem do Circuito Dobrador com Comparador de Tensão.



Fonte: Autor.

O circuito simulado possui uma chave ideal que é controlada conforme a lógica do comparador. A energia gerada pelo sensor piezoelétrico é acumulada nos capacitores até que atinja 4 V . Caso esta lógica seja verdadeira, a energia acumulada no capacitor é liberada para a bateria.

O circuito da Figura 3.7, realizado na ferramenta *LtSpice* com o amplificador operacional é representado pelo bloco *Greater Than or Equal* na Figura 4.23, e como tensão de referência o bloco *constant*.

As quedas de tensões dos diodos foram consideradas como $0,6\text{ V}$, para que fossem simuladas condições reais, como as do 1N4007. Os capacitores do circuito dobrador foram considerados com um valor de $100\text{ }\mu\text{F}$, como as dos eletrolítico.

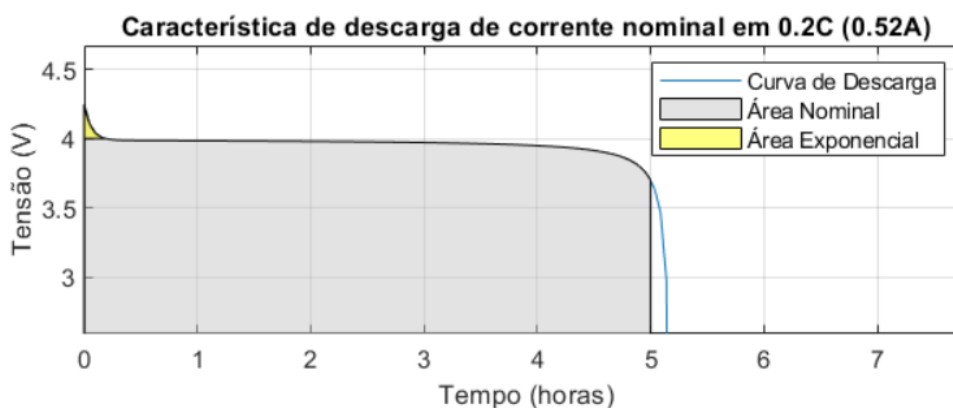
Ao conectar-se ao bloco *Battery*, os parâmetros deste elemento foram configurados conforme as características descritas no Apêndice C. Os parâmetros inseridos no bloco da bateria, foram baseados em [33] e são:

- ✓ Tipo de Bateria: Íon-Lítio;

- ✓ Tensão Nominal (V): 3,7;
- ✓ Capacidade típica (Ah): 2,6;
- ✓ Estado de carga inicial – SOC (%): 100;
- ✓ Tempo de resposta da bateria (s): 2;
- ✓ Máxima capacidade (Ah): 2,6775;
- ✓ Tensão Cut-off (V): 3;
- ✓ Tensão totalmente carregada (V): 4,25;
- ✓ Corrente nominal de descarga (A): 0,52;
- ✓ Resistência Interna (Ω): 0,07;
- ✓ Capacidade na tensão nominal (Ah): 2,6;
- ✓ Zona exponencial (tensão e capacidade): [4.0 0.1];
- ✓ Corrente de descarga [$i_1, i_2, i_3, \dots$](A): [0.034 0.04 0.0000156]

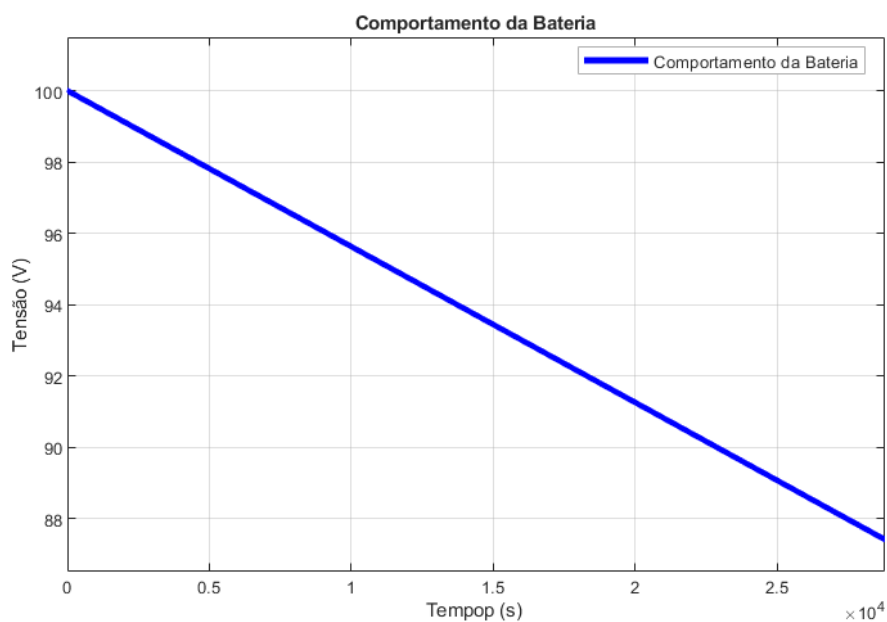
Ao simular o comportamento desta bateria, obtém-se a Figura 4.24. A curva ilustrada na Figura 4.24, retrata o comportamento natural da bateria, conforme as características descritas acima. Portanto, ao simular o circuito da Figura 4.23 com o sistema de aproveitamento de energia desconectado, o resultado obtido está elencado na Figura 4.25. Neste cenário, a bateria fornece uma corrente de carga constante, de 42mA conforme dados de consumo da placa *wireless* e o consumo do Amplificador-Operacional.

Figura 4.24 Comportamento da Bateria – Corrente de carga nominal



Fonte: Autor.

Figura 4.25 Descarga da bateria sem o aproveitamento da energia de vibração

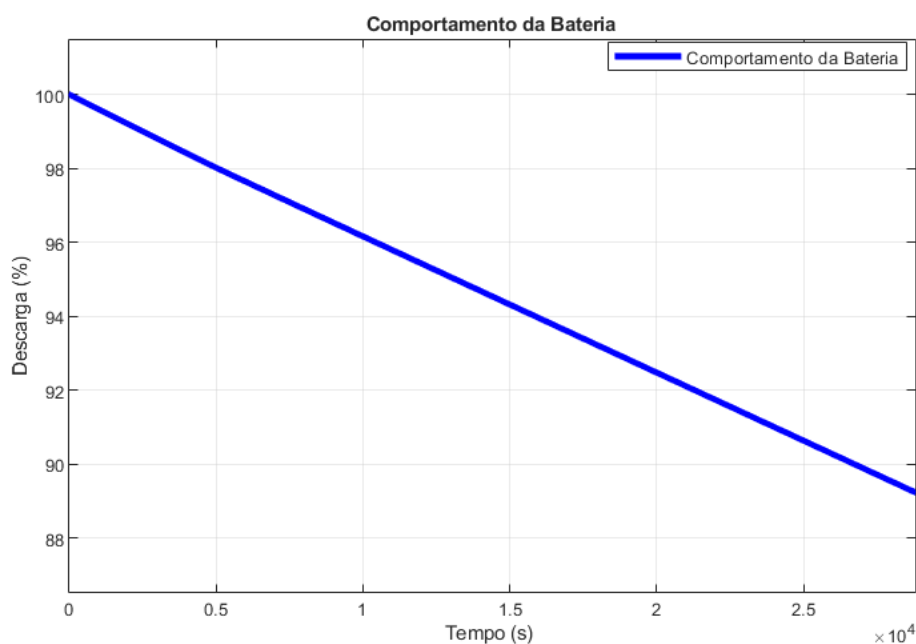


Fonte: Autor.

A Figura 4.25 foi simulada durante 28 800 s, o que caracteriza 8,0 *hrs* de operação de uma máquina em uma indústria. Com a ferramenta da régua do *Simulink*, observa-se que durante este tempo, a bateria descarregou aproximadamente 12,52 %, ou seja, desta maneira, a bateria levaria cerca de 63,89 *hrs* para descarregar 100 %.

Ao adicionar o circuito proposto para o aproveitamento da energia de vibração e realizar a simulação durante as 8,0 *hrs*, o resultado pode ser observado na Figura 4.26.

Figura 4.26 Descarga da Bateria com o circuito de colheita de energia

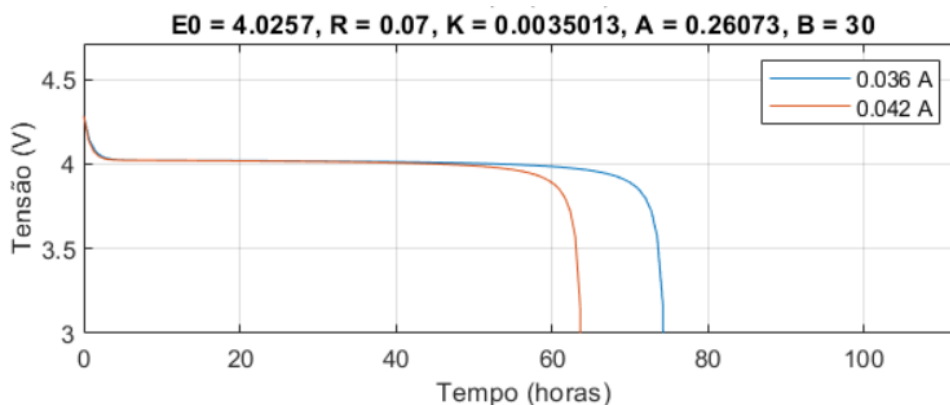


Fonte: Autor.

Ao utilizar a ferramenta da régua do *Simulink*, tem-se pela Figura 4.26 que a bateria descarrega 10,75 %. Dessa forma, a bateria levaria 74,41 *hrs* para descarregar completamente. Portanto, ao adicionar o circuito de aproveitamento de energia à bateria obteve-se um aumento de 10,51 *hrs* em sua autonomia, o que representa 16% adicionais.

Ao realizar a relação entre a capacidade de tensão nominal da bateria, em Ampère horas, e o tempo, em horas, que a mesma demoraria para descarregar quando o circuito é conectado ao comparador de tensão, tem-se uma corrente equivalente de 0,036 A, ou seja, foi simulado a descarga da bateria considerando uma corrente de carga menor para incorporar o ganho obtido pelo aproveitamento da energia de vibração. A Figura 4.27, apresenta esta diferença na autonomia da bateria.

Figura 4.27 Comparação da autonomia da bateria com e sem o circuito de colheita de energia



Fonte: Autor.

Em vermelho é representada a autonomia da bateria com a placa *wireless* conectada, sem o comparador de tensão. Segundo o Apêndice B, esta placa estando ativa, sua demanda seria de 40 *mA*, em caso de stand-by, o consumo é de 20 *mA*, assim sendo, foi considerado o pior caso, ou seja, que a mesma esteja a todo tempo transferindo dados. Além disso, utilizando o Amplificador-Operacional *LM358*, observa-se que seu consumo é de cerca de 2 *mA*. Dessa forma, utilizou-se uma carga de 42 *mA*. Dependendo da variável de monitoramento no motor, sabe-se que é possível considerar um intervalo entre o envio de um dado e outro, período no qual a placa *wireless* poderia entrar em modo *stand-by*. Em azul é representado o comportamento da bateria quando o circuito é conectado ao circuito de colheita de energia.

É importante mencionar ainda que, no cenário simulado, as formas de onda da vibração são reais (importadas dos resultados com o osciloscópio), entretanto os 16% adicionais nas operas de operação foram obtidos assumindo-se uma intensidade três vezes maior que a obtida pelo motor de 4 cv. Com os níveis reais de vibração, o percentual obtido foi de aproximadamente 2%. Portanto, de forma intuitiva, o aproveitamento da energia mecânica de vibração depende das condições e potência das máquinas rotativas consideradas.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Para que uma indústria opere em seu pleno êxito é necessário o monitoramento constante das máquinas rotativas responsáveis pela força de trabalho. Para isso, pode-se fazer uso de uma das grandes vertentes de recursos naturais. Estas não se restringem, apenas, a grande escala, como usinas hidroelétricas e fazendas solares, mas também, abrangem as matérias não intrínsecas, como a radiação, aquecimento e força mecânica.

Sendo assim a utilização da própria força mecânica de vibração dos motores das fábricas como forma fonte de alimentação secundária para um sistema monitoramento com comunicação sem fio foi avaliada neste trabalho. Para que isso fosse possível utilizou-se os sensores piezoelétricos, que funcionam por meio da pressão neles submetidos. Apesar da colheita de energia parecer simples, essa técnica apresenta muitos desafios.

O sensor circular não apresentou resultados satisfatórios em relação a análise de motores, visto que seu armazenamento de energia dependia de uma vibração exata em seu núcleo, caso contrário, sua captação seria mínima. E este fato foi observado ao realizar análises com motores, por possuírem vibrações em diversas direções. Para esta aplicação, sensores em viga seriam mais indicados.

A utilização do sensor comercial que também utiliza o efeito piezoelétrico possibilitou a realização de ensaios experimentais em motores e validação dos circuitos em simulação pela ferramenta *Simulink*.

O circuito dobrador de tensão com o armazenamento em capacitores somado ao comparador de tensão, apresentaram os resultados esperados. Houve, de fato, o aumento da tensão, como também, o controle deste no sistema, fazendo com a autonomia da bateria fosse aumentada. Entretanto para obter um saldo positivo na autonomia da bateria, é necessário níveis de vibração bastante elevados.

CONCLUSÕES GERAIS

5.1. TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, propõe-se a avaliar a utilização do sensor viga em balanço, aplicado em associação série, justificado por possuir duas camadas piezoelétricas, geometria simples, baixo custo e alto fator de qualidade mecânica, possivelmente realizando maior aproveitamento das vibrações mecânicas. Ainda em relação ao melhor aproveitamento e/ou ganho de tensão gerada, é possível desenvolver um dispositivo de colheita de energia baseado no eletromagnetismo, com ímãs que movimentam devido a vibração induzindo tensão em bobinas, ou seja, um micro gerador. Levando em consideração o espectro de frequência da vibração do sinal estudado, pois dessa forma, é possível selecionar o tipo de sensor piezoelétrico a ser utilizado.

Além disso, pode-se citar como trabalho futuro a aplicação destes sensores em motores de maior potência, visto que neste trabalho, os motores utilizados foram na ordem de 0,5 cv a 4,0 cv. Dependendo dos motores maiores que possam ser estudados, como, por exemplo, um grupo motor gerador, e uma devida escolha do ponto de análise, a vibração capturada pode gerar uma tensão consideravelmente alta. Uma outra possibilidade é realizar uma investigação em outros tipos de motores. Como se sabe, o motor de relutância chaveada é caracterizado por apresentar níveis de vibração maiores que outros motores, o que para a aplicação proposta pode ser vantajoso.

Nessa perspectiva, utilizando um sensor adequado, circuitos integrados de aplicação específica (CIAEs) também podem ser implementados, como por exemplo o conversor CC/CC boost, como por exemplo, a utilização do componente BQ25504 (vide Apêndice D), que consiste num conversor Boost utilizado especificamente para a finalidade de coleta de energia.

Por fim, tem-se ainda a possibilidade de integrar outras fontes provedoras de energia, como no caso da energia térmica.

6. REFERÊNCIAS

- [1] W. Gou, S. Fan and L. Geng, "Vibration Energy Harvesting System with MPPT for IoT Applications," 2018 1st Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia), 2018, pp. 320-323, doi: 10.1109/WiPDAAsia.2018.8734594.
- [2] V. Vetiska, O. Hyncica, C. Ondrusek and Z. Hadas, "Autonomous monitoring unit of fault condition with vibration energy harvester," 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015, pp. 980-985, doi: 10.1109/EEEIC.2015.7165297.
- [3] D. He and B. Fahimi, "Power management of a self-powered multi-parameter wireless sensor for IoT application," 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2018, pp. 1380-1385, doi: 10.1109/APEC.2018.8341197.
- [4] COVACI, Corina ; GONTEAN, Aurel. Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review. *Sensors*, v. 20, n. 12, p. 3512, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3512/htm>>. Acesso em: 25 Jun. 2021..
- [5] SILAS. Série triboelétrica. Brasil Escola. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/fisica/serie-triboeletrica.htm>>. Acesso em: 25 Jun. 2021.
- [6] Q. Wang, C. Shen, K. Zhang and L. Zheng, "Super-capacitor and Li-polymer battery hybrid energy storage for kinetic energy harvesting applications," 2017 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), 2017, pp. 73-77, doi: 10.1109/CENCON.2017.8262461..
- [7] Snehalika and M. U. Bhasker, "Piezoelectric Energy harvesting from shoes of Soldier," 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853116.
- [8] PIEFORT, Vincent. Finite Element Modelling of Piezoelectric Active Structures. [s.l.]: , 2000. Disponível em: <<https://scmero.ulb.ac.be/Publications/Thesis/Piefort01.pdf>>.

REFERÊNCIAS

-
- [9] ROBERTO, Roberto; MARGRAF, Margraf; VINICIUS, Vinicius; et al. Materiais Piezoel Piezoel é é tricos tricos e e Piezoeletricidade Piezoeletricidade. [s.l.]: , [s.d.]. Disponível em: <https://professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_UFSC/Materiais_EEL_7051/7_Materiais_Piezoeletricos.pdf>.
- [10] GEOVANNAL, C. Piezoeletricidade, 2010. Disponível em: <www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem1_2007/GeovannaL_Cotta_RF1.pdf>. Acesso em: 5 Maio 2015.
- [11] Conceitos básicos da tecnologia piezocerâmica. Ceramtec.com.br. Disponível em: <<https://www.ceramtec.com.br/materiais-ceramicos/piezoceramicos/basicos/>>. Acesso em: 25 Jun. 2021.
- [12] Single crystal | crystallography | Britannica. In: Encyclopædia Britannica. [s.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/single-crystal>>. Acesso em: 25 Jun. 2021.
- [13] Perovskita: material é a grande promessa da tecnologia fotovoltaica - eCycle. eCycle - Sua pegada mais leve. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/perovskita/>>. Acesso em: 25 Jun. 2021.
- [14] Progress in engineering high strain lead-free piezoelectric ceramics. Science and Technology of Advanced Materials. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1088/1468-6996/11/4/044302>>. Acesso em: 25 Jun. 2021.
- [15] LUIZ FERNANDO SUZARTE SILVA FERREIRA SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA VIA SENSORES PIEZOELÉTRICOS. [s.l.]: , 2017. Disponível em: <<https://repositorio.uniceub.br/jspui/bitstream/235/11425/1/21316943.pdf>>.
- [16] E. A. Grace, S. E. Rajan and A. A. C. Asis, "Performance evaluation of different rectifiers for Piezo-electric energy harvesting applications," 2011 INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCEMENTS IN ELECTRICAL, ELECTRONICS AND CONTROL ENGINEERING, 2011, pp. 248-252, doi: 10.1109/ICONRAEECE.2011.6129810.

REFERÊNCIAS

-
- [17] Rashid, Muhammad H. *Eletrônica de potência : circuitos, dispositivos e aplicações*/Muhammad H. Rashid ; tradução Carlos Alberto Favato; revisão técnica Antonio Pertence Júnior. - São Paulo : Makron Books, 1999.
- [18] W. Gou, S. Fan and L. Geng, "Vibration Energy Harvesting System with MPPT for IoT Applications," 2018 1st Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia), 2018, pp. 320-323, doi: 10.1109/WiPDAAsia.2018.8734594.
- [19] Y. Kushino and H. Koizumi, "Piezoelectric energy harvesting circuit using full-wave voltage doubler rectifier and switched inductor," 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014, pp. 2310-2315, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953711.
- [20] Chapman, Stephen J., *Fundamentos de máquinas elétricas [recurso eletrônico] / Stephen J. Chapman ; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : AMGH, 2013.*
- [21] T. de Carvalho Batista, B. A. Luciano, R. C. S. Freire and S. Y. C. Catunda, "Current transformer with nanocrystalline alloy core for measurement," 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/IMTC.2011.5944192.
- [22] T. Shimanouchi, O. Toyoda and F. Nakazawa, "A wireless motor-condition, precise analysis system using a highly efficient vibration-energy harvester," *2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 2013, pp. 402-407
- [23] *Eletrônica de Garagem: Amplificador Operacional - Comparadores. Eletrônica de Garagem.* Disponível em: <<https://eletronicagaragem.blogspot.com/2018/07/amplificador-operacional-comparadores.html>>. Acesso em: 25 Jun. 2021.
- [24] LALLART, M.; GUYOMAR, D. "An optimized self-powered switching circuit for non-linear energy harvesting with low voltage output." *Smart Mater. Struct.* 2008, 17, 035030.
- [25] *Electronic Surplus. Electronicsurplus.com.* Disponível em: <<https://www.electronicsurplus.com/search/pcb+piezotronics+inc+348a+accelerometer>>. Acesso em: 25 Jun. 2021.

REFERÊNCIAS

-
- [26] PCB Piezotronics 482C05 Four-Channel Multi-Purpose Signal Conditioner. Artisantg.com. Disponível em: <<https://www.artisantg.com/TestMeasurement/59814-1/PCB-Piezotronics-482C05-Four-Channel-Multi-Purpose-Signal-Conditioner>>. Acesso em: 25 Jun. 2021.
- [27] Adhesives | PCB Piezotronics. Pcb.com. Disponível em: <<https://www.pcb.com/sensors-for-test-measurement/accelerometers/accessories/adhesives>>. Acesso em: 25 Jun. 2021.
- [28] PCB Piezotronics. Pcbpiezotronics.com.br. Disponível em: <<https://www.pcbpiezotronics.com.br/>>. Acesso em: 25 Jun. 2021.
- [29] PROF.MÁRCIO CÓ "MOTORES DE INDUÇÃO", Apostila. Em: CENTRO FERDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO ESPIRÍTO SANTO, VITORIA, ES.
- [30] ZIGBIT 2.4GHZ WIRELESS MODULES. [s.l.]: , [s.d.]. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-8226-zigbit-2.4ghz-wireless-modules-atzb-24-a2b0_datasheet.pdf>. Acesso em: 28 Jun. 2021.
- [31] MATLAB M. The language of technical computing. The MathWorks, Inc, 2012. Disponível em: <http://www.mathworks.com>.
- [32] C.M. DUARTE PORCIUNCUA, "Aplicação de Modelos Elétricos de Bateria na Predição do Tempo de Vida de Dispositivos Móveis", Dissertação. Em: UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, UNIJUI, RS, 2012.
- [33] Lithium-ion Battery DATA SHEET Battery Model : LIR18650 2600mAh. [s.l.]: , [s.d.]. Disponível em: <<https://www.ineltro.ch/media/downloads/SAAItem/45/45958/36e3e7f3-2049-4adb-a2a7-79c654d92915.pdf>>
- [34] BQ25504 Ultra Low-Power Boost Converter With Battery Management For Energy Harvester Applications. Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf>>. Acesso em: 27 de Jun. 2021.

7. APÊNDICE A-MODELOS DE SIMULAÇÃO

```
%Criando um vetor tempo

tempo1 = 0:0.001:(0.001*600-0.001)

%Salvando os valores de vibracao em outra variavel

vib1 = nome_do_documento(:,2)

%Plotar todo o grafico
plot(nome_do_documento(:,1),nome_do_documento(:,2))
plot(nome_do_documento(:,1)+distancia_necessaria,nome_do_documento(:,2))

%Analisar o Espectro da frequencia do sinal de vibração

y = fft(vib1);
fs = 1/(0.02e-03);
L = 600;
f = (fs*(0:L/2))/L;

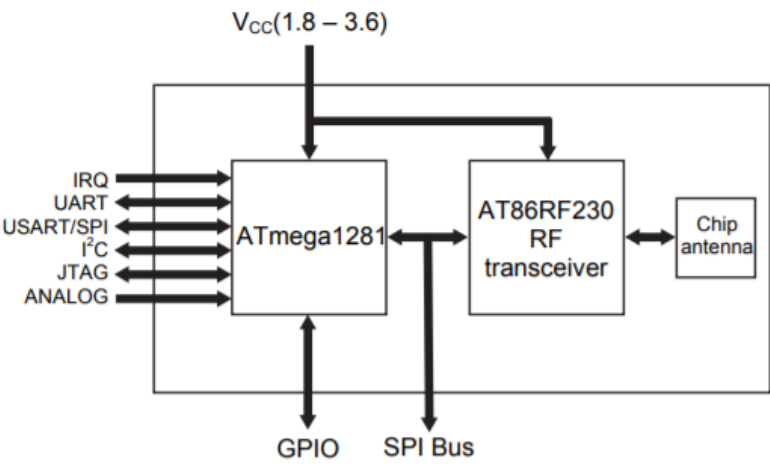
P2 = abs(y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);

plot(f,P1)
```

7. APÊNDICE B- PLACA WIRELESS - ZIGBIT 2.4GHZ

Esta placa wireless caracteriza-se por ser ultracompacta, possuir baixo consumo de energia e alta sensibilidade. Dentre suas aplicações estão o monitoramento industrial, dentre os parâmetros monitorados estão a temperatura, vibração e pressão [30]. A representação desta placa é feita pela Figura 7.1.

Figura 7.1 Diagrama de Bloco da Placa Wireless.



Fonte [30].

Dentre suas características está o fato de que quando a mesma está em estado *online*, ou seja, transmitindo dados, a corrente necessária para a manter é de 40 *mA*. Além disso, é necessário que a tensão aplicada nesta placa seja entre 1,8 *V* a 3,6 *V*, características que constam na Figura 7.2.

Figura 7.2 Característica da Placa ZIGBIT 2.4GHZ

Parameter	Range	Unit
Supply voltage, V_{CC} ⁽²⁾	1.8 to 3.6	V
Current consumption: RX mode	21.8	mA
Current consumption: TX mode ⁽¹⁾	20.8	mA
Current consumption: Radio is turned off, MCU is active 50% of the time ⁽¹⁾	3.5	mA
Current consumption: Power-save mode ⁽¹⁾	6	μA

Fonte [30].

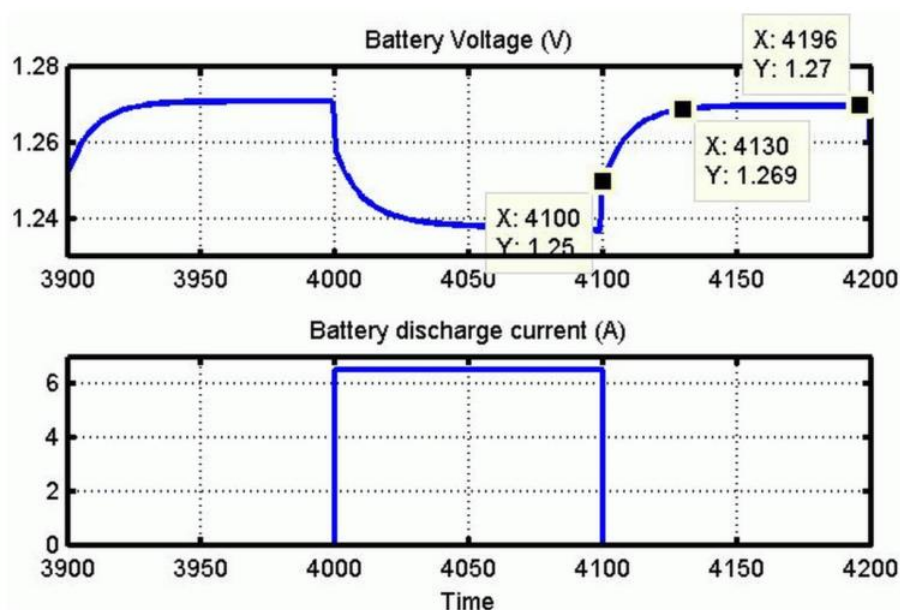
7. APÊNDICE C - COMPORTAMENTO DO BLOCO DA BATERIA E PARÂMETROS INSERIDOS

Ao configurar o bloco Bateria do *Simulink*, deve-se inserir os seguintes parâmetros:

- ✓ Tipo de bateria: esta pode ser de Chumbo ácido, Íon-lítio (padrão), Níquel-Cádmio e Níquel-Metal-Hidreto;
- ✓ Tensão Nominal (V): A tensão nominal representa o fim da zona linear das características de descarga [31];
- ✓ Capacidade típica (Ah): é a capacidade mínima efetiva da bateria [31];
- ✓ Estado de carga inicial – SOC (%): quando o estado inicial de carga da bateria é 100%, isto indica que a bateria está totalmente carregada, porém, quando esta porcentagem é 0, a bateria está sem carga [31];
- ✓ Tempo de resposta da bateria (s): O tempo de resposta da bateria (a 95% do valor final). O padrão é 30. Este valor representa a dinâmica da tensão e pode ser observado quando uma etapa de corrente é aplicada [31];
- ✓ Máxima capacidade (Ah): é a capacidade, Q , quando ocorre uma descontinuidade na tensão da bateria. Geralmente, este valor costuma ser 105% da capacidade típica [31];
- ✓ Tensão Cut-off (V): A tensão mínima permitida da bateria em V. Esta tensão representa o fim das características de descarga. Na tensão de corte, a bateria está totalmente descarregada [31];
- ✓ Tensão totalmente carregada (V): A tensão totalmente carregada, V_{full} , para uma dada corrente de descarga. A tensão totalmente carregada não é a tensão sem carga [31];

- ✓ Corrente nominal de descarga (A): A corrente de descarga nominal, para a qual a curva de descarga foi medida. Geralmente, possui o valor de 20% da capacidade típica [31];
- ✓ Resistência Interna (Ω): é supostamente constante durante a carga e descarga e não sofre variação com a amplitude da corrente. Pode ser considerada como 1% do produto entre a tensão nominal e a capacidade típica da bateria [31];
- ✓ Capacidade na tensão nominal (Ah): A capacidade, Q_{nom} , extraída da bateria até que a tensão caia abaixo da tensão nominal [31];
- ✓ Zona exponencial (tensão e capacidade): correspondem ao final da zona exponencial. A tensão deve ser entre a tensão nominal e a tensão da bateria carregada. A capacidade deve ser entre 0 e a capacidade nominal [31];
- ✓ Corrente de descarga [$i_1, i_2, i_3, \dots$](A): Permite especificar diferentes valores de corrente de descarga. As características de descarga para essas correntes são apresentadas na segunda parte do gráfico da Figura 7.3. O padrão é [6,5 13 32,5] [31].

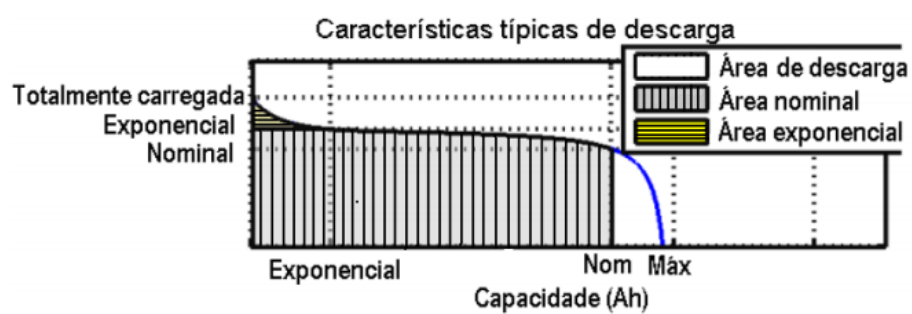
Figura 7.3 Comportamento da Bateria durante 30 s.



Fonte [31].

A partir destes parâmetros apresentados, pode-se compreender, com maior propriedade, o comportamento da bateria, Figura 7.4.

Figura 7.4 Comportamento da Bateria.



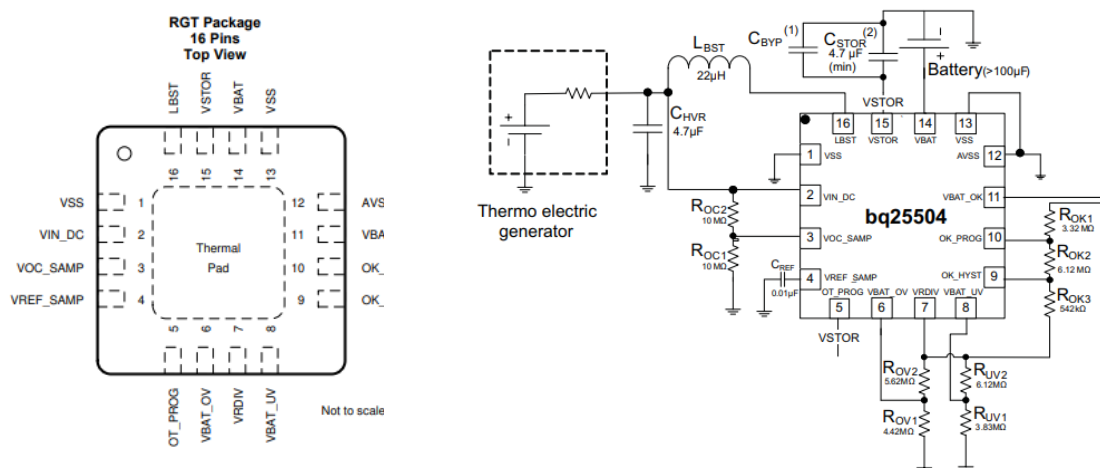
Fonte [32].

7. APÊNDICE D – CI BQ25504

Ultra Low-Power Boost Converter With Battery Management For Energy Harvester Applications

Esta placa é formada pelo conversor Boost e uma bateria. Sua aplicação, entre tantas, é a coleta de energia, bem como, conexão em sensores wireless [34]. Sua representação é realizada pela Figura 7.5.

Figura 7.5 Componente BQ25504.



Fonte [34].