



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Análise de uma Piezoestrutura (PZT) Multifrequência para
Geração, Extração e Armazenamento de Energia**

Fernando Henrique de Oliveira Camara

Orientador: Prof. Dr. João Antonio Pereira

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

Ilha Solteira – SP
Dezembro/2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

- | | |
|-------|---|
| C172a | <p>Camara, Fernando Henrique de Oliveira.</p> <p>Análise de uma piezoestrutura (PZT) multifrequência para geração, extração e armazenamento de energia / Fernando Henrique de Oliveira Camara. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2012</p> <p>101 f. : il.</p> <p>Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2012</p> <p>Orientador: João Antônio Pereira</p> <p>1. Piezoestrutura multifrequência. 2. Energy Harvesting. 3. Sistema Autônomo.</p> |
|-------|---|



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

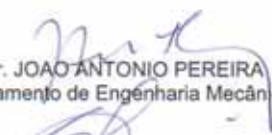
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Utilização de uma Piezoestrutura (PZT) multifrequência para extração e armazenamento de energia

AUTOR: FERNANDO HENRIQUE DE OLIVEIRA CAMARA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOAO ANTONIO PEREIRA

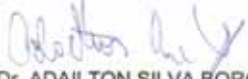
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,
Área: MECANICA DOS SÓLIDOS, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOAO ANTONIO PEREIRA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. SAMUEL DA SILVA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ADAILTON SILVA BORGES

Universidade Tecnológica Federal do Paraná / Campus Cornélio Procopio

Data da realização: 14 de dezembro de 2012.

Dedico este trabalho a minha noiva Andréia, aos meus pais Jair e Marili e minhas irmãs.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar forças, pela sabedoria e pelo conhecimento adquiridos dia a dia durante este período de minha vida, e também pelas oportunidades e objetivos conquistados.

Ao Professor João Antônio Pereira, que além de um grande orientador se tornou um grande amigo, um agradecimento especial. Por toda sua competência, disposição e atenção dispendida, estando sempre presente em todos os momentos ajudando a tornar possível este trabalho.

Aos professores Antonio Eduardo Turra, Gilberto Pechoto de Melo e Samuel da Silva pelas sugestões dadas. Também aos demais professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica.

Aos grandes companheiros e amigos Thiago Galbiati Lagoin, Danilo Damasceno Sabino, João Artur Fiuza Mazarini, Fernando Ribeiro Alves, Vitor Suman Guirao, Marcos Vinicius Alves Oliveira, Jose Camilo Carranza Lopes, Luiz Eduardo Zampar Filho, Felipe Carmo Carvalho, Marcelo Maesta e tantos outros amigos que conviveram em momentos de trabalho e descontração tão importantes durante este período.

A todos os amigos e colegas que tive contato e que me ajudaram de alguma forma durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da Banca Examinadora pelas sugestões e comentários.

A CAPES pelo apoio financeiro que possibilitou a execução deste trabalho com dedicação exclusiva.

“Aprendamos a sonhar, senhores, pois então talvez nos apercebamos da verdade.”

Augusto Kekulé, 1865

RESUMO

A utilização de materiais piezelétricos para transformação de energia mecânica proveniente das vibrações em energia elétrica tem aumentado na última década para tentar suprir a necessidade por fontes alternativas de energia na alimentação de sistemas de monitoramento da condição estrutural (SHM) e dispositivos de aeronaves não tripuladas, tornando estes dispositivos autônomos. Como a energia produzida através da piezoestrutura não é suficiente para alimentar os dispositivos eletrônicos diretamente, técnicas de extração e armazenamento são utilizadas para que a energia produzida seja acumulada até um nível utilizável. Neste sentido, este trabalho apresenta um estudo sobre uma configuração de piezoestrutura capaz de produzir um alto nível de energia mesmo que a frequência de excitação apresente variações. A piezoestrutura proposta é do tipo multifrequência aumentando a largura de banda de operação e podendo produzir um alto nível de energia mesmo que a frequência de excitação apresente alterações. A piezoestrutura multifrequência foi modelada por elementos finitos através do programa ANSYS[®] e posteriormente comparada com resultados experimentais. Em seguida, a tensão produzida foi extraída através dos circuitos retificador de onda completa em ponte e do dobrador de tensão buscando avaliar o desempenho de ambos na extração da energia produzida para armazenamento em um supercapacitor. Finalmente, a energia armazenada no supercapacitor foi utilizada para alimentar um sistema de monitoramento da temperatura de um ambiente de modo que o sistema passe a operar como um sistema autônomo.

Palavras-chave: Piezoestrutura multifrequência. Energy harvesting. Sistema autônomo.

ABSTRACT

The use of piezoelectric materials to transform mechanical energy from the vibrations into electrical energy has increased in the last decade trying to meet the need for alternative sources of energy to power up SHM systems and Unmanned Air Vehicle devices, making these standalone devices. This work presents a study on a configuration of a piezostructure being able to produce a higher energy even if the excitation frequency undergoes changes, and then evaluate two electronic circuit topology as simple interface for extracting the maximum energy produced and store it in a supercapacitor to power a sensor system that monitors the temperature in a room. Initially a brief review of the basics and fundamentals of energy harvesting was presented for better understanding of the development of this work. The proposal is a multifrequency piezostructure type that increases the bandwidth of operation and could produce a high energy value even if the excitation frequency undergoes alterations. The multifrequency piezostructure was modeled by finite element software ANSYS[®] and then compared with experimental results showing a good correlation between the numerical and experimental models. Then, a parametric study was conducted to determine which geometric parameter from the piezostructure should be varied so that the piezo-beams had their natural frequencies within the specified operating range. The voltage produced was extracted through two types of circuits (full wave rectifier and voltage doubler) trying to evaluate which one is able to extract the maximum possible energy produced for storage in a supercapacitor. Finally, the energy stored in the supercapacitor was used to power a system for monitoring the temperature of an environment so that the system operates as a standalone system.

Keywords: Multifrequency piezostructure. Energy harvesting. Autonomous system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição básica de um sistema autônomo de extração e armazenamento de energia.	16
Figura 2 - Forma de polarização do elemento piezelétrico	27
Figura 3 - Cubo piezelétrico com o sistema de coordenadas para análise tridimensional	28
Figura 4 - Modos de operação 33 e 31	29
Figura 5 - Modelos elétricos equivalentes do elemento piezelétrico	30
Figura 6 - Diagrama esquemático do elemento piezelétrico em conjunto com o circuito extrator	31
Figura 7 - Condições para a máxima transferência de potencia para uma carga.....	32
Figura 8 - Circuito com as impedâncias interna e dos circuitos extrator e de carga.	33
Figura 9: Funcionamento do retificador e formas de onda da corrente e tensão.....	34
Figura 10: Circuito retificador dobrador de tensão.	37
Figura 11 - Piezo-viga central da piezoestrutura multifrequência.....	42
Figura 12 - Piezoestrutura modelada por elementos finitos.	43
Figura 13 – Tensão elétrica obtida pela simulação da piezoestrutura.	44
Figura 14 – Identificação do fator de amortecimento pelo método da banda de meia potência.	45
Figura 15 – Tensões produzidas através da varredura de frequências.	46
Figura 16 – Diagrama esquemático do setup experimental de validação dos resultados.....	48
Figura 17 - Setup experimental de validação dos resultados.....	48
Figura 18 – Tensão elétrica produzida experimentalmente.....	49
Figura 19 – Piezoestrutura com larguras diferentes para cada viga.	51
Figura 20 – Piezoestrutura com comprimentos diferentes.	52
Figura 21 – FRF das tensões produzidas de acordo com o comprimento do elemento piezelétrico.	54
Figura 22 – Tensão produzida de acordo com o comprimento do elemento piezelétrico.	54
Figura 23 - Tensão produzida numericamente pelas vigas com o comprimento do PZT de 20mm.....	55
Figura 24 - Tensão produzida numericamente pelas vigas com o comprimento do PZT de 60mm.....	56

Figura 25 - Potência produzida numericamente pelas vigas com o comprimento do PZT de 20mm.	56
Figura 26 - Potência produzida numericamente pelas vigas com o comprimento do PZT de 60mm.	57
Figura 27 - Tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 1 ($f_n = 32\text{Hz}$).	58
Figura 28 - Tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n = 30\text{Hz}$).	58
Figura 29 - Tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 3 ($f_n = 28\text{Hz}$).	59
Figura 30 - Potência no elemento piezelétrico em função de uma carga resistiva da piezo-viga 1 ($f_n = 32\text{Hz}$).	59
Figura 31 - Potência no elemento piezelétrico em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n = 30\text{Hz}$).	60
Figura 32 - Potência no elemento piezelétrico em função de uma carga resistiva da piezo-viga 3 ($f_n = 28\text{Hz}$).	60
Figura 33 - Configuração final da piezoestrutura multifrequência.	62
Figura 34 - Diagrama esquemático para simulação do circuito retificador de onda completa.	64
Figura 35 - Correntes da piezoestrutura multifrequência para o circuito retificador de onda completa.	65
Figura 36 - Diagrama esquemático do circuito dobrador de tensão.	66
Figura 37 - Correntes de cada uma das piezo-vigas e a tensão armazenada no capacitor.	66
Figura 38 - Curvas de carregamento do supercapacitor para o comprimento do PZT de 20mm.	67
Figura 39 - Curvas de carregamento do supercapacitor para o comprimento do PZT de 60mm.	68
Figura 40 - Potência disponível no elemento piezelétrico para retificador em ponte em função de uma carga resistiva da piezo-viga 3 ($f_n = 28\text{Hz}$).	69
Figura 41 - Potência disponível no elemento piezelétrico para retificador em ponte em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n = 30\text{Hz}$).	69
Figura 42 - Potência extraída pelo retificador em ponte em função de uma carga resistiva da piezo-viga 3 ($f_n = 28\text{Hz}$).	70
Figura 43 - Potência extraída pelo retificador em ponte em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n = 30\text{Hz}$).	70
Figura 44 - Potência disponível no elemento piezelétrico para dobrador de tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 3 ($f_n = 28\text{Hz}$).	71

Figura 45 - Potência disponível no elemento piezelétrico para dobrador de tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n=30\text{Hz}$).....	71
Figura 46 - Potência extraída pelo dobrador de tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 1 ($f_n=32\text{Hz}$).	72
Figura 47 - Potência extraída pelo dobrador de tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n=30\text{Hz}$).	72
Figura 48 - Diagrama dos componentes básicos de um sistema autônomo	75
Figura 49 - Fluxograma de funcionamento do microcontrolador.....	80
Figura 50 - Diagrama de conexão do sensor com o microcontrolador.....	81
Figura 51 - Sistema de monitoramento de temperatura.....	83
Figura 52 - Temperatura ao longo de um período de 24 horas.....	84
Figura 53 - Tensão armazenada no supercapacitor de acordo com o tempo	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Dimensões e propriedades de uma das vigas da piezoestrutura.....	42
Tabela 2 –	Frequências naturais do modelo.....	43
Tabela 3 –	Varredura de tensões da primeira viga.....	45
Tabela 4 –	Resultados obtidos pelos dois métodos e a diferença entre eles.	49
Tabela 5 –	Valores comerciais de espessura de placas de acrílico.	50
Tabela 6 –	Frequências naturais de cada viga variando-se a largura.	51
Tabela 7 –	Frequências naturais de cada viga com variação do comprimento.	52
Tabela 8 –	Frequências naturais de cada viga com variação do comprimento do PZT.....	53
Tabela 9 –	Configurações geométricas de cada piezo-viga.	61
Tabela 10 –	Tensões produzidas por cada piezo-viga em cada uma das frequências.....	73
Tabela 11 –	Características de alimentação dos microcontroladores.....	77
Tabela 12 –	Características adicionais dos microcontroladores	78
Tabela 13 –	Características de funcionamento dos sensores LM35 e MCP9700	81

NOMENCLATURA

Letras latinas

C_{uu}	Matriz de amortecimento mecânico
$C_{\varphi\varphi}$	Matriz de amortecimento elétrico (capacitância)
C_P	Capacitância interna do elemento piezelétrico
D	Deslocamento do campo elétrico
d	Coeficiente piezelétrico da carga/ permissividade elástica;
E	Campo elétrico
K_{uu}	Matriz da rigidez mecânica
$K_{u\varphi}$	Matriz do acoplamento piezelétrico
$K_{\varphi\varphi}$	Matriz dos coeficientes de permissividade dielétrica
K_3^T	Constante dielétrica relativa
$Q_{P,CP}$	Carga perdida no capacitor interno do elemento piezelétrico
$Q_{P,RP}$	Carga perdida na resistência interna do elemento piezelétrico
Q_D	Carga disponível na saída do elemento piezelétrico
Q_{Ret}	Carga retificada
P_{Ret}	Potência retificada
V_{Ret}	Tensão elétrica retificada
S	Deformação mecânica;
t_p	Espessura do elemento piezelétrico
t_v	Espessura da viga hospedeira
T	Tensão mecânica;
Y	Módulo de Young;

Letras gregas

- α Coeficiente multiplicador da matriz de massa; constante adimensional de tempo do sistema.
- β Coeficiente multiplicador da matriz de rigidez para amortecimento proporcional.
- ε Constante dielétrica do material piezelétrico (permissividade elétrica);
- ω Frequência angular
- θ Termo de acoplamento eletromecânico
- ζ Permissividade do piezelétrico
- κ Fração de um semi-ciclo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO.....	18
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
-----------------------------------	-----------

CAPÍTULO 3

CONCEITOS BÁSICOS E FUNDAMENTOS DE ENERGY HARVESTING POR VIBRAÇÃO	26
3.1 EFEITO PIEZELÉTRICO	27
3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉTRICO DE UMA ESTRUTURA PIEZELÉTRICA	30
3.3 TEOREMA DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA	31
3.4 CIRCUITOS DE EXTRAÇÃO DE ENERGIA	34
3.4.1 CIRCUITO RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA	34
3.4.2 CIRCUITO DOBRADOR DE TENSÃO.....	37
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38

CAPÍTULO 4

PIEZOESTRUTURA MULTIFREQUÊNCIA	39
4.1 MODELO POR ELEMENTOS FINITOS	39
4.2 PIEZOESTRUTURA MULTIFREQUÊNCIA	40
4.2.1 Definição da faixa de frequências	44

CAPÍTULO 5

COMPARAÇÃO DO MODELO E ESTUDO PARAMÉTRICO DA PIEZOESTRUTURA MULTIFREQUÊNCIA	47
5.1 COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO	47
5.2 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS NA LARGURA DE BANDA DA PIEZOESTRUTURA	50

CAPÍTULO 6

COMPARAÇÃO DO MODELO E ESTUDO PARAMÉTRICO DA PIEZOESTRUTURA

MULTIFREQUÊNCIA	63
6.1 CIRCUITO RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA	63
6.2 CIRCUITO DOBRADOR DE TENSÃO.....	65
6.3 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL.....	67

CAPÍTULO 7

SISTEMA AUTÔNOMO	75
7.1 SISTEMAS AUTOALIMENTADOS.....	75
7.2 DETERMINAÇÃO DE UM MICROCONTROLADOR DE BAIXO CONSUMO	76
7.3 FORMA DE ARMAZENAMENTO E INTERVALO DE AQUISIÇÃO	78

CAPÍTULO 8.....	86
------------------------	-----------

CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS.....	86
--	-----------

REFERÊNCIAS	89
--------------------------	-----------

ANEXO A – PROGRAMA EM LINGUAGEM C.....	93
---	-----------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento no interesse por sustentabilidade o desenvolvimento de sistemas autônomos e a busca por fontes renováveis de energia vêm ganhando importância. Nesta última década vários estudos foram e ainda estão sendo desenvolvidos nesta área sendo que a literatura sobre o tema da conversão de energia do ambiente (solar, vibração, eletromagnética) em energia elétrica aumentou drasticamente.

A energia presente no ambiente e que é desperdiçada pelos sistemas dinâmicos industriais, por exemplo, através de vibrações, calor ou em ondas eletromagnéticas, pode ser reaproveitada através da conversão em energia elétrica utilizando materiais inteligentes que possuam capacidades piezelétricas ou piroelétricas, por exemplo. Esta forma de converter energia perdida de um sistema em energia elétrica é conhecida como *extração e armazenamento de energia (energy harvesting)*.

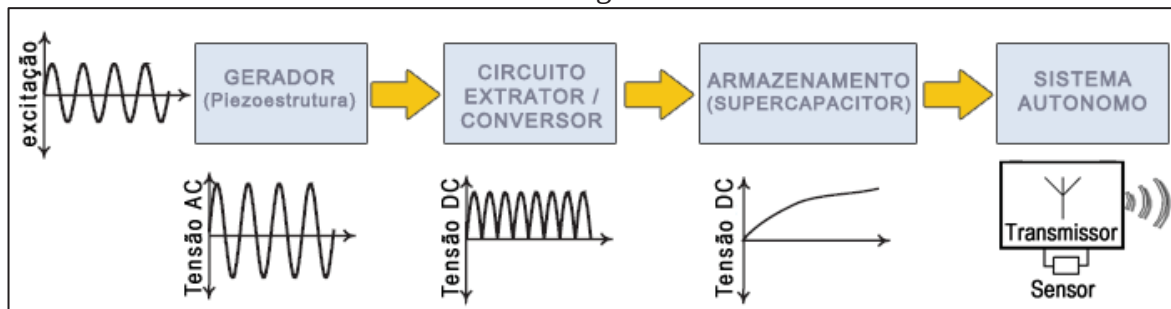
Dentre as várias áreas de pesquisa do processo de geração e armazenamento de energia elétrica a partir de fontes renováveis, a energia mecânica de vibrações tem assumido um papel importante, principalmente, devido ao desenvolvimento dos materiais piezelétricos que apresentam uma grande capacidade de gerar eletricidade ao se deformarem (ANTON; SODANO, 2007).

Uma aplicação prática de interesse envolve sistemas de monitoramento da integridade estrutural (Structural Health Monitoring - SHM), que são instalados em regiões de difícil acesso como pontes, oleodutos e gasodutos, ou mesmo veículos autônomos (como aeronaves UAVs - Unmanned Aerial Vehicles - e veículos terrestres). Estes sistemas são alimentados por baterias. A substituição periódica destas baterias presentes nos sistemas de SHM e veículos autônomos se faz necessária, porém a dificuldade no acesso, ou o fato de não ser possível substituir a bateria durante a operação, no caso de veículos autônomos, faz com que outras fontes de alimentação possam ser utilizadas. A possibilidade de alimentar componentes eletrônicos de baixo consumo destes sistemas, recarregar suas baterias ou até mesmo torná-los autônomos energeticamente, é a principal motivação para a investigação da extração e conversão de energia mecânica, provenientes das vibrações existentes no ambiente, em energia elétrica.

Seguindo este ideal, grandes esforços estão sendo feitos no estudo e desenvolvimento de técnicas de *extração e armazenamento de energia* de modo a aumentar o potencial elétrico produzido pelas piezoestruturas, que é o conjunto composto por uma viga com o elemento piezelétrico acoplado em sua superfície (ADACHI; TANAKA, 2009; AJITSARIA et al., 2007), bem como minimizar o potencial perdido pela conversão AC/DC (LEFREUVE, 2006; RAMADASS, 2010; SOUZA, 2011). Há, também, estudos sendo realizados na busca pelo desenvolvimento de sistemas autônomos (FERRARI et al., 2009; JOHNSON, 2006).

Um sistema autônomo de *extração e armazenamento de energia* utilizando elemento piezoelétrico pode ser basicamente dividido em quatro partes: a fonte de energia, o circuito extrator/coletor, um dispositivo de armazenamento e o sistema que é alimentado pela energia produzida e armazenada, conforme pode ser visto na Figura 1.

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



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Alguns autores do Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes (GMSINT) apresentaram trabalhos que mostram a metodologia para conversão da energia proveniente das vibrações em energia elétrica (LAGOIN, 2011) e utilizá-la na alimentação de um sistema de monitoramento da temperatura de um ambiente (SOUZA, 2011).

O maior foco deste trabalho está no lado da geração de energia, portanto, buscando produzir mais energia. No desenvolvimento do piezo-gerador, um dos desafios na corrida por maior eficiência na geração de energia é com relação ao fator de qualidade mecânica do elemento piezelétrico, Q_m , que tem influência direta no valor de energia produzida. Um alto valor do fator Q_m resulta em uma grande amplificação nas vibrações, que produz um alto valor de tensão elétrica, porém um pico bastante estreito, fazendo com que a resposta decaia rapidamente quando se afasta da frequência de ressonância. Como o fator Q_m determina a amplitude de vibração da estrutura em torno da ressonância, para uma viga em flexão, a deformação está diretamente relacionada com a vibração e é a deformação que determina a

energia produzida pelo elemento piezelétrico. Assim, quanto maior o fator Q_m maior será a energia produzida para uma dada entrada (DuTOIT, 2005). Entretanto, um alto valor do fator Q_m , também implica em um pico de resposta bastante estreito, fazendo com que a tensão produzida diminua drasticamente quando a frequência de excitação se distancia da frequência de ressonância da piezoestrutura (DuTOIT, 2005).

Para minimizar a influência do fator Q_m na largura de banda é possível incorporar um mecanismo para “sintonizar” a frequência de ressonância do conversor. Uma possibilidade é utilizar um capacitor variável (SENTURIA, 2000), porém a principal desvantagem deste sistema é seu consumo de energia.

Este trabalho tem como meta o estudo de uma configuração de piezoestrutura multifrequência que seja capaz de produzir um alto valor de energia mesmo que a frequência de excitação apresente oscilações dentro de uma faixa pré-estabelecida, bem como em uma avaliação de duas topologias básicas de circuitos eletrônicos empregados na conversão AC/DC buscando extrair o máximo da energia disponível no gerador piezelétrico para ser armazenada. O sistema de armazenamento utilizado neste trabalho é um supercapacitor, uma vez que, apesar de armazenar uma quantidade menor de energia que uma bateria recarregável, possui vida útil maior que as baterias, pois enquanto houver energia alimentando o supercapacitor, este permanecerá funcionando. Além disso, o descarte das baterias recarregáveis é um grande problema ambiental.

Desta forma, este trabalho propõe uma piezoestrutura multifrequência composta por três vigas do tipo engastada-livre com um elemento piezelétrico de cerâmica do tipo PZT-5H4E acoplado próximo ao engaste sendo excitada através de uma aceleração de sua base com amplitude de 1g (9,8 m/s²). A energia produzida pela piezoestrutura será extraída através de duas topologias de circuitos eletrônicos extratores (retificador de onda completa em ponte e dobrador de tensão), e então armazenada em um supercapacitor que alimenta um sistema de monitoramento de temperatura. Neste trabalho os termos piezoestrutura e piezo-viga referem-se à estrutura multifrequência composta por três piezo-vigas e à apenas uma viga hospedeira com um elemento piezelétrico acoplado, respectivamente.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma piezoestrutura multifrequência que seja capaz de produzir um alto valor de energia mesmo que a frequência de excitação sofra oscilações, através do aumento da largura de banda de frequências de operação utilizando mais de uma piezo-viga, visando maior geração, extração e armazenamento da energia proveniente das vibrações, e posterior utilização da energia armazenada.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho esta dividido em seis capítulos organizados da seguinte forma:

Capítulo 1: Apresenta uma introdução e a revisão bibliográfica com uma visão geral sobre a utilização de várias configurações de piezoestruturas para captura de energia proveniente das vibrações, sendo assim, uma alternativa aos sistemas convencionais (pilhas ou baterias) para alimentar sistemas autônomos.

Capítulo 2: Neste capítulo é apresentada a fundamentação sobre sistemas de *extração e armazenamento de energia* contemplando os conceitos básicos sobre o efeito piezelétrico, a modelagem de circuitos equivalentes elétricos e o teorema da máxima transferência de potência.

Capítulo 3: Apresenta a metodologia utilizada para desenvolver a piezoestrutura multifrequência e o modelo de elementos finitos, apresentando uma configuração estrutural candidata a suprir a perda na geração de energia com as variações na frequência de excitação.

Capítulo 4: Apresenta uma avaliação paramétrica e experimental sobre a piezoestrutura multifrequência buscando avaliar quais parâmetros da piezoestrutura possuem maior influência na largura de banda e uma comparação entre o modelo experimental e o modelo numérico desenvolvido no capítulo anterior.

Capítulo 5: Apresenta o funcionamento de dois tipos de circuitos básicos utilizados para extrair/converter energia: ponte retificadora de onda completa e dobrador de tensão, que pode aumentar a energia extraída, fazendo uma comparação entre a eficiência deles. Ao final, apresenta os resultados experimentais obtidos.

Capítulo 6: Apresenta a aplicação da energia armazenada em um sistema autônomo e monitora o valor da temperatura em um ambiente durante um período.

Capítulo 7: Apresenta as conclusões e propostas para aplicações em futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o aumento considerável, nesta última década, nas pesquisas envolvendo a conversão de energia mecânica proveniente das vibrações em energia elétrica e também na aplicação desta energia para alimentação de sensores sem fio, esta revisão bibliográfica apresenta estudos sobre os tipos de modelagem mais comuns das piezoestruturas, que foram necessários para o entendimento e modelagem da estrutura inteligente proposta por este trabalho, e também das topologias de circuitos eletrônicos utilizadas na extração/conversão de energia do elemento piezelétrico. Adicionalmente, outros importantes estudos envolvendo a aplicação da energia produzida e armazenada na alimentação de sistemas de sensores são elencados a seguir.

Sodano et al. (2005a) afirmam que os materiais piezelétricos podem ser utilizados para recarga de baterias e faz com que a coleta de energia através de *extração e armazenamento de energia* esteja, significativamente, próximo do mercado comercial, abrindo muitas portas para sua aplicação. Porém, o meio comum utilizado para o armazenamento da energia tem sido os capacitores, mas estes se mostraram ineficientes, pois a alta taxa de descarga dos capacitores não permitem que a saída apresente um sinal contínuo, que é necessário para várias aplicações eletrônicas. Baseando-se nisso, Sodano et al. (2005a) realizaram testes com materiais piezelétricos combinados com baterias recarregáveis, como uma alternativa aos capacitores.

Anton et al. (2007) fizeram uma ampla revisão do uso de materiais piezelétricos em *extração e armazenamento de energia*. Inicialmente faz uma abordagem sobre várias configurações de piezoestrutura propostas por outros autores visando aumentar a eficiência na geração de energia alterando as configurações do material piezoelétrico.

Outros meios de se melhorar a forma de conversão da energia mecânica proveniente das vibrações em energia elétrica são os circuitos de extração/conversão e os métodos de armazenamento da energia gerada. Anton et al. (2007) discutiram vários circuitos extratores propostos por outros autores e concluíram que em sistemas sob condições forçantes constantes, o método síncrono de extração de carga elétrica é mais eficiente que os demais discutidos, já para sistemas excitados por deslocamento constante, os métodos série e paralelo

SSHI (Synchronous Switch Harvesting on Inductor) apresentam maior eficiência quando conectados à carga resistiva correspondente a sua impedância.

O estudo realizado por Anton et al. (2007) também apresenta conceitos sobre a aplicação de *extração e armazenamento de energia* em atividades humanas do cotidiano, bem como de sensores autoalimentados e faz uma análise de desempenho dos materiais piezoelétricos.

Foi possível observar através do trabalho de Anton et al. (2007) que muitas pesquisas foram direcionadas em caracterizar partes (estrutura, circuitos extração/conversão, modos de armazenamento) do conceito de *extração e armazenamento de energia* ao invés de implementar um sistema autoalimentado completo.

Ajitsaria et al. (2007) realizaram uma aproximação analítica baseados na teoria de viga de Euler-Bernoulli e equações de viga de Timoshenko para tensão de saída e geração de energia que é então comparado com dois modelos descritos anteriormente na literatura: circuito equivalente elétrico e método da energia. Os modelos são implementados no ambiente matlab/simulink/simpower e simulado com um circuito conversor de energia AC/DC. Na comparação verificou que o modelo baseado na teoria de viga de Euler-Bernoulli e equações de viga de Timoshenko foi o que melhor se aproximou do resultado experimental.

DuToit et al. (2007) realizaram a validação de modelos para captadores de energia piezoelétricos. Resultados experimentais de um captador piezoelétrico de energia proveniente de vibração foram obtidos e apresentados, focando nas vibrações ressonantes de dispositivos (vigas bimorfes na condição engastada-livre) que podem ser implementados na alimentação de sensores aplicados em sistemas microeletromecânicos (MEMS).

Ferrari et al. (2007) propuseram uma piezoestrutura multifrequência de banda larga composta por três vigas engastada-livre comerciais com massas de teste na extremidade livre. Neste trabalho foi utilizado o circuito dobrador de tensão como circuito de conversão/extração. As piezo-vigas possuem frequências naturais de 113 Hz, 183 Hz e 281Hz, e, excitadas separadamente em suas frequências naturais com uma aceleração de 1g e com a resistência ótima, produziram uma potência de 89 μ W, 57 μ W e 57 μ W, respectivamente. A energia armazenada foi utilizada para alimentar um sensor de temperatura e transmitir via RF.

Liu et al. (2008) desenvolveram um gerador piezoelétrico baseado na tecnologia MEMS, onde um arranjo de elementos piezelétricos apresenta um aumento da faixa de frequência de operação e, também, do potencial elétrico de saída da piezoestrutura. O que indica que o potencial elétrico gerado pode ser aplicado em sistemas de sensores wireless/embarcados.

Liao et al. (2008) descreveram um modelo teórico de um gerador piezoelétrico baseado em um sistema de *extração e armazenamento de energia* que é de simples aplicação e ainda fornece uma predição precisa da energia gerada em torno de um único modo de vibrar. Este modelo permite a otimização dos parâmetros do sistema tal que o desempenho seja o máximo que possa ser conseguido. A acurácia do modelo e os parâmetros ótimos obtidos pelos autores foram validados experimentalmente. Adicionalmente, os autores estudaram os efeitos do acoplamento eletromecânico e da permissividade elétrica na performance do sistema de extração e armazenamento de energia mostrando que uma baixa permissividade e um alto acoplamento eletromecânico levam a uma potência de saída maior.

Adachi et al. (2009) propuseram uma viga na condição engastada-livre para monitoramento de vibração aplicado em máquinas rotativas. O piezo-gerador proposto consiste de um material chamado *Macro-Fiber Composite* (MFC) que é um atuador tipo piezo compósito flexível e durável. A frequência de ressonância da viga piezelétrica bimorfe na condição engastada-livre é ajustada com a velocidade de rotação de um motor de indução de 4-polos da máquina rotativa. Neste caso, o desempenho da geração de energia elétrica do piezo-gerador proposto é avaliado através de simulações numéricas e experimentalmente, quando sujeito a uma entrada de vibração de magnitude de 0,71 (mm/s rms) na frequência de ressonância do piezo-gerador gerada por um *shaker* eletrodinâmico.

Erturk et al. (2009) propuseram uma solução analítica que é aplicada para uma viga bimorfe na condição engastada-livre com configuração das ligações das conexões das camadas piezelétricas em série e paralelo com excitação na base. A excitação da base é assumida de translação na direção transversal com uma pequena rotação sobreposta. A forma-fechada das expressões de resposta para o estado estacionário são obtidas para excitações harmônicas em frequências arbitrárias, que são então reduzidas para expressões de um único modo assumindo excitações modais. As Funções de Resposta em Frequência (FRFs) eletromecânica que relaciona a tensão de saída e a resposta de vibração para acelerações de base translacional e rotacional são identificadas das soluções multimodos e único modo.

A validação experimental do único modo acoplado a tensão de saída e das expressões de resposta de vibração é apresentada para uma viga bimorfe na condição engastada-livre com uma massa na ponta. Foi observado que as FRFs analíticas de único-modo obtidas através da solução analítica pode com sucesso prever o acoplamento de sistemas dinâmicos para um grande intervalo de resistência elétrica da carga. O desempenho do dispositivo bimorph é analisado extensivamente para excitações de frequências de ressonância de curto-circuito e de circuito-aberto. O modelo analítico pode com sucesso prever a variação no acoplamento elétrico e a resposta mecânica da viga bimorfe na condição engastada-livre.

De Marqui et al. (2009) elaborou um modelo matemático por elementos finitos baseado no princípio de Hamilton para corpos eletro-elásticos e nas considerações de Kirchhoff para placas, já que os piezo-gerados são comumente estruturas finas. Neste estudo também são considerados os efeitos dos eletrodos condutores. O modelo foi verificado com a solução analítica de uma viga engastada-livre unimorfe e também com resultados experimentais e analíticos para uma viga bimorfe com uma massa de prova no lado livre. No primeiro caso, foram obtidas as FRF's da tensão elétrica, corrente e potência produzidas em função de uma carga resistiva conectada. O modelo foi capaz de prever com precisão a tensão e potência produzidas quando comparado com o modelo analítico proposto por Inman e Erturk (2008). No segundo caso, onde os resultados foram comparados com os resultados experimentais e analíticos de uma viga bimorfe proposta por Inman e Erturk (2009), a tensão produzida pelo método de elementos finitos, em função de uma excitação pela base de 1g e para diferentes valores de resistência elétrica, apresenta concordância com os valores obtidos pelo modelo apresentado por Inman e Erturk (2009) e pelos resultados experimentais. Após, De Marqui et al. (2009) desenvolveram um gerador piezoelétrico bimorfe para ser aplicado em uma asa de um veículo aéreo não tripulado (UAV) para alimentar sensores sem ultrapassar o limite de peso planejado para a aeronave.

Ramadass et al (2010) realizam uma comparação entre as topologias de circuitos de extração mais utilizadas em sistemas de *extração e armazenamento de energia* (retificador de onda completa em ponte e dobrador de tensão) avaliando a potência elétrica extraída por cada um deles, sendo que a potência extraída por eles, quando o piezo-gerador é excitado em sua ressonância, é de 12,5% considerando-se os diodos empregados como sendo ideais. Adicionalmente, Ramadass et al. (2010) apresentam uma topologia de circuito que é capaz de extrair maior potência do elemento piezoelétrico conhecida como *bias-flip* com indutor

compartilhado podendo extrair até quatro vezes mais potência do que os outros circuitos extratores supracitados.

Kok et al. (2011) apresentam um estudo sobre piezoestrutura multifrequência composta por seis vigas do tipo engastada-livre, onde são verificados dois tipos de configurações: a primeira com comprimentos diferentes e a segunda com larguras diferentes. Na configuração de comprimentos diferentes, foram mantidos constantes os valores da largura em 5mm e espessura 85 μ m, e os comprimentos foram variados de 15 – 20mm produzindo uma faixa de frequência de 240 – 500Hz. Para a outra configuração, os valores do comprimento e da espessura foram mantidos constantes em 20mm e 85 μ m, respectivamente. As larguras de cada viga variaram de 2 – 10mm produzindo uma faixa de frequência de operação de 280 – 350Hz. Também aplicou uma excitação pela base de 5m/s² dentro da faixa de frequências 220Hz a 520Hz, comparando o desempenho da piezoestrutura completa, seis vigas, com o desempenho da mesma à medida que se diminui a quantidade de vigas. Notou-se que a primeira configuração, para uma carga resistiva de 25K Ω , apresenta um aumento na tensão de saída à medida que se diminui a quantidade de vigas. Para a segunda configuração, concluiu-se que a largura apresenta alguma influência na performance da piezoestrutura diminuindo a tensão de saída.

Lagoin (2011) realizou um estudo sobre a utilização de materiais piezelétricos como conversores de energia vibratória em energia elétrica apresentando simulações realizadas no programa ANSYS[®] sendo validado com testes experimentais, apresentando resultado satisfatório, podendo ser possível prever o potencial elétrico produzido por uma piezoestrutura do tipo viga engastada-livre sendo excitada por uma força constante de 1N. Também realizou um estudo paramétrico sobre a interferência das variáveis (largura, espessura e comprimento da viga e do PZT) no potencial elétrico produzido. O potencial elétrico produzido foi então extraído através de um circuito retificador de onda completa e armazenado em um supercapacitor. Foi possível obter uma potência de 12,25 μ W quando a resistência da carga acoplada possuía um valor de 820K Ω .

Souza (2011) apresenta uma comparação entre diversas topologias de circuitos eletrônicos de extração de energia para armazenamento em um supercapacitor tentando verificar qual dos circuitos extrai maior potência do elemento piezelétrico. Adicionalmente, Souza (2011) aplica a energia armazenada no supercapacitor na alimentação de um microcontrolador que armazena os dados de um sensor de temperatura de baixo consumo

mostrando que é possível alimentar o sistema com a energia produzida por uma piezo-viga e ainda armazenar mais energia no supercapacitor.

Com esta revisão foi possível verificar que vários autores desenvolveram diversos modelos para as piezoestruturas utilizadas, indo desde modelos simples, utilizando o sistema massa-mola de parâmetros concentrados (AJITSARIA et al, 2009) até modelos mais elaborados, considerando sistemas contínuos e até modelagem por elementos finitos (De MARQUI, 2009; YANG; TANG, 2009).

Também foi possível observar que além dos circuitos eletrônicos de topologia simples (retificador de onda completa e dobrador de tensão) muitos autores aplicaram seus esforços no desenvolvimento de circuitos eletrônicos de topologias que podem extrair maior energia do gerador piezelétrico, como os circuitos SSHI e SECE. Porém, apesar de estes circuitos extraírem maior energia do que os circuitos simples, necessitam de um circuito de controle auxiliar que são alimentados por outras fontes, e isso é uma desvantagem na utilização destas topologias.

Apesar da grande quantidade de trabalhos realizados na área de *extração e armazenamento de energia*, a sua maioria focaliza no desenvolvimento e métodos de se produzir mais energia ou no desenvolvimento de circuitos de extração para aumentar a quantidade de energia extraída do elemento piezelétrico.

CAPÍTULO 3

CONCEITOS BÁSICOS E FUNDAMENTOS DE ENERGY HARVESTING POR VIBRAÇÃO

Este capítulo descreve brevemente os conceitos básicos e os fundamentos envolvidos no desenvolvimento de um sistema de *extração e armazenamento de energia (energy harvesting)* através das vibrações mecânicas, dando foco principal ao uso de material piezelétrico.

Quando se extrai energia de sistemas mecânicos há uma penalidade importante: esta energia mecânica convertida em energia elétrica tem efeito no movimento mecânico, sendo ele amortecido ou alterado (DuTOIT, 2005).

A extração de energia através das vibrações pode ser realizada em qualquer lugar onde haja movimento (DuTOIT, 2005). Existem três maneiras diferentes de produzir energia utilizando vibrações: eletromagnética, eletrostática e piezelétrica. Utiliza-se um núcleo e uma bobina para extrair energia através de materiais eletromagnéticos. Em sistemas eletrostáticos é utilizada a variação da capacitância do material. Por fim, em conversores piezelétricos, que é o foco deste trabalho, considera-se o efeito piezelétrico, que é a capacidade de o material produzir uma tensão elétrica quando deformado e produzir uma deformação quando aplicada uma tensão elétrica.

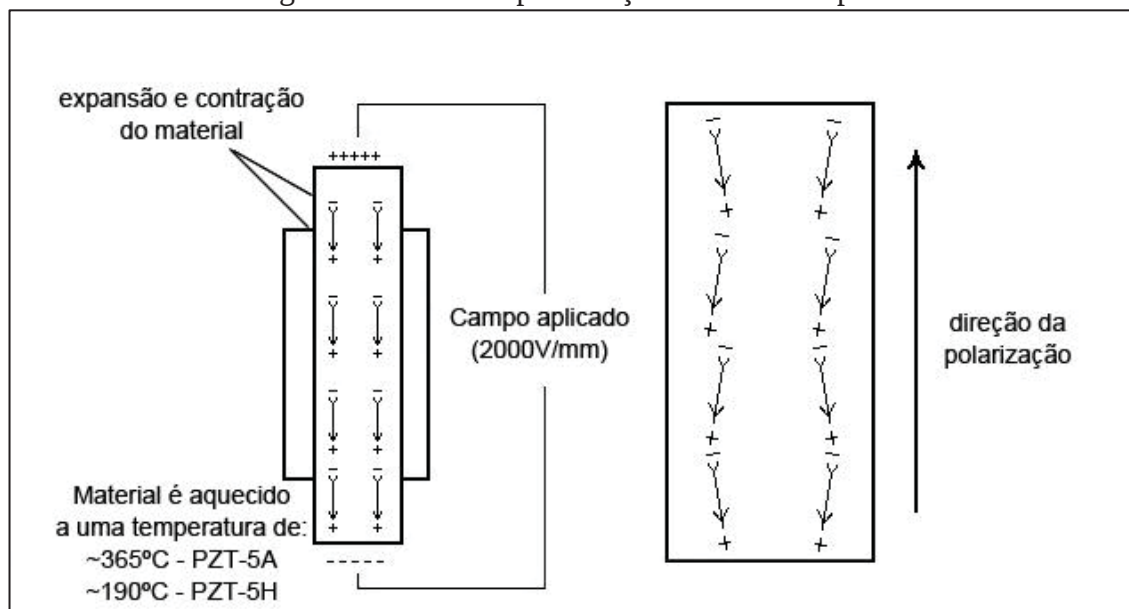
O interesse na aplicação de materiais piezelétricos para converter energia mecânica em energia elétrica teve um aumento drástico nos últimos anos devido ao desenvolvimento de dispositivos eletrônicos cada vez menores implicando em diminuição do sistema de alimentação (bateria), o que leva a menor energia para alimentação, na aplicação de sensores em sistemas de monitoramento da condição estrutural (SHM) e dispositivos de veículos não tripulados, mas também devido à capacidade dos materiais piezelétricos fornecerem energia suficiente para alimentar estes dispositivos eletrônicos. Além disso, é possível desenvolver os piezo-geradores como uma estrutura simples, onde uma simples viga engastada-livre é capaz de produzir até centenas de microwatts, de fácil fabricação (DuTOIT, 2005).

3.1 EFEITO PIEZELÉTRICO

O efeito piezoelétrico é a propriedade do material onde uma deformação mecânica aplicada produz um campo elétrico nos terminais do material (efeito direto) e, inversamente, um campo elétrico aplicado nos terminais do material produz deformações mecânicas (efeito inverso).

Existem vários materiais piezelétricos (polímero PVDF – Poly-Vinilidene Fluoride, compósito MFC – Macro Fiber Composite, cerâmica PZT – Lead Titanate Zirconate). O uso mais comum é o da cerâmica piezelétrica (PEDERSEN, 2011). O material consiste de vários cristais (material dielétrico) com separação de cargas locais (dipolos elétricos) organizados, inicialmente, aleatoriamente e sem o efeito piezelétrico. Após a aplicação de um campo elétrico DC de alta intensidade (2000V/mm) e submetido a temperatura de Curie (PZT-5A e PZT-5H possuem temperatura de Curie de $\sim 365^{\circ}\text{C}$ e $\sim 190^{\circ}\text{C}$, respectivamente (BERLIN COURT et al., 2004)), os cristais são polarizados e alinham a sua orientação, conforme Figura 2. Retirando rapidamente o campo elétrico e resfriando o material, todos os cristais manterão sua orientação criando um dipolo elétrico comum na mesma direção, fazendo com que o material passe a exibir o efeito piezelétrico.

Figura 2 - Forma de polarização do elemento piezelétrico

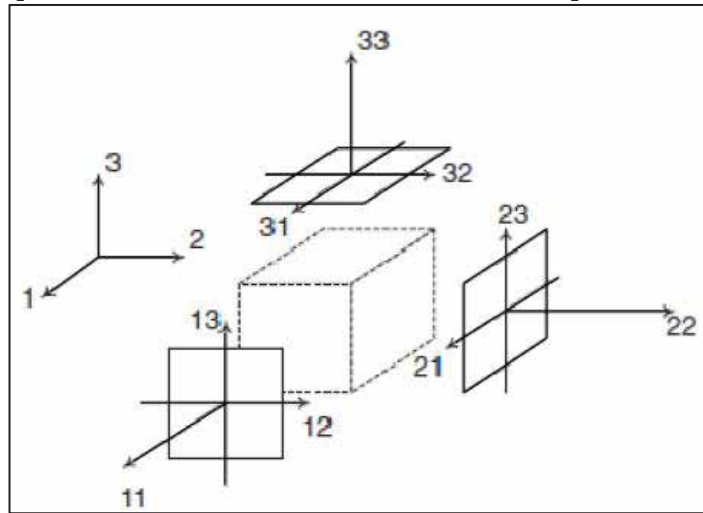


Fonte: Adaptado de Lagoin (2011)

Quando o material é deformado uma carga elétrica é produzida na superfície do material através dos eletrodos. Assim, as propriedades elásticas, piezelétricas e dielétricas do

material piezelétrico são caracterizadas através de um sistema de coordenadas retangulares relativos aos eixos convencionados na cristalografia do elemento piezelétrico, em três direções onde a direção 3 está alinhada na mesma direção da polarização (IEEE, 1987), conforme Figura 3.

Figura 3 - Cubo piezelétrico com o sistema de coordenadas para análise tridimensional



Fonte: Leo (2007)

A conversão piezelétrica da energia mecânica em energia elétrica pode ser descrita por duas equações constitutivas lineares do campo elétrico, derivada das equações de Maxwell, contendo duas variáveis mecânicas e quatro variáveis elétricas (DuTOIT, 2005). A Equação 1 é originada da lei de Gauss, sendo adicionado o termo de acoplamento mecânico, descrevendo o efeito piezelétrico direto. A Equação 2 é originada da lei de Hooke, adicionando o acoplamento piezelétrico que descreve o efeito piezelétrico inverso (ERTURK; INMAN, 2011; ROUNDY, 2003). As equações constitutivas podem ser escritas na forma compacta, abaixo:

$$\mathbf{D} = \mathbf{dS} + \boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{E} \quad (1)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{sT} - \mathbf{dE} \quad (2)$$

onde:

$\mathbf{D}$ = vetor 3x1 do deslocamento elétrico;

$\mathbf{T}$ = vetor 6x1 da tensão mecânica;

$\boldsymbol{\varepsilon}$ = matriz 3x3 da constante dielétrica do material piezelétrico (permissividade elétrica);

$\mathbf{s}$ = matriz 6x6 da compliância elástica;

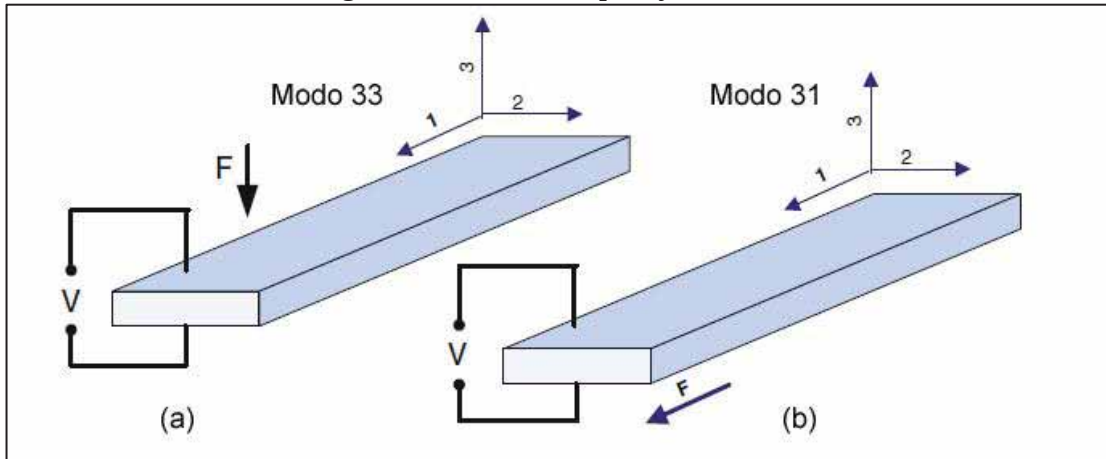
S = vetor 6x1 da deformação mecânica;

d = matriz 3x6 do coeficiente piezelétrico da carga/ permissividade elástica;

E = vetor 3x1 do campo elétrico.

Em aplicações de *extração e armazenamento de energia* o modo de operação do elemento piezelétrico, é definido através do coeficiente piezelétrico, e comumente utiliza-se o d_{33} ou d_{31} . O primeiro índice indica a direção onde o campo elétrico é obtido e o segundo a direção onde as forças são aplicadas. Na Figura 4 são apresentados os dois modos mais utilizados em *extração e armazenamento de energia*.

Figura 4 - Modos de operação 33 e 31



Fonte: Adaptado de Priya (2009).

No modo de operação 33, Figura 4 (a), o elemento piezelétrico é deformado através de uma força perpendicular à superfície na direção 3 e a carga elétrica é produzida nesta mesma superfície, na direção 3. Sendo assim, as Equações 1 e 2 tornam-se:

$$D_3 = d_{33}T_3 + \varepsilon_{33}E_3 \quad (3)$$

$$S_3 = s_{33}T_3 - d_{33}E_3 \quad (4)$$

Neste trabalho será utilizado o modo de operação 31, ou seja, quando é aplicada uma vibração em sua base, na direção 1, a carga elétrica é gerada na superfície da direção 3. Dessa forma as equações constitutivas, Equações 1 e 2, são reduzidas para a Equação 5 e Equação 6:

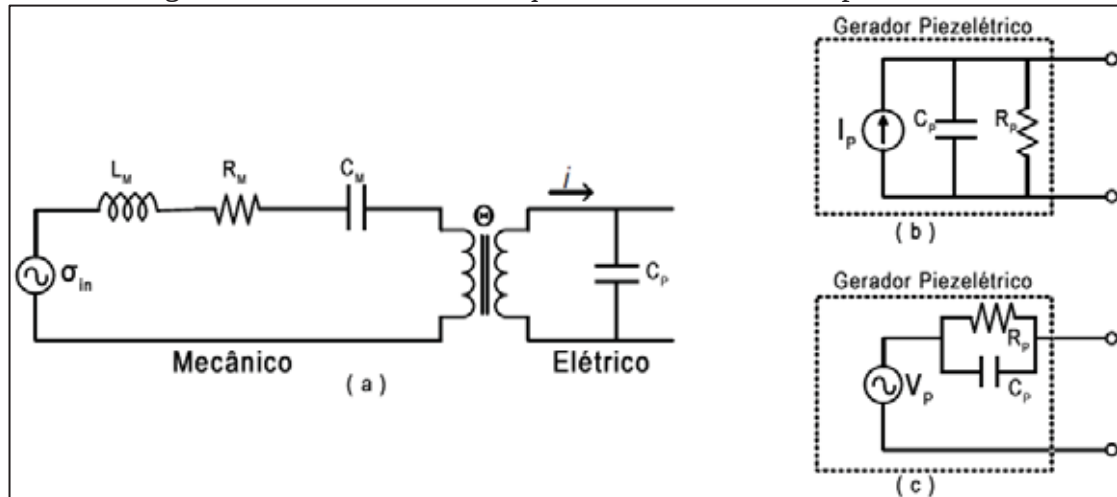
$$D_3 = d_{31}T_1 + \varepsilon_{33}E_3 \quad (5)$$

$$S_1 = s_{11}T_1 - d_{31}E_3 \quad (6)$$

3.2 CIRCUITO EQUIVALENTE ELÉTRICO DE UMA ESTRUTURA PIEZELÉTRICA

Para simulações computacionais do comportamento elétrico e obtenção dos valores teóricos de correntes, tensão elétrica armazenada e potência produzida e extraída do gerador piezelétrico, é necessário a utilização de um circuito equivalente elétrico que represente o elemento piezoelétrico. Diversos modelos são utilizados na literatura especializada, alguns dos mais utilizados são apresentados abaixo na Figura 5. Os modelos levam em consideração apenas os parâmetros concentrados do sistema mecânico.

Figura 5 - Modelos elétricos equivalentes do elemento piezelétrico



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Pode-se observar na Figura 5 (a) que este modelo envolve as partes mecânicas do sistema, sendo representados no domínio elétrico através de uma indutância, uma resistência e uma capacitância em série. Estes componentes são proporcionais à massa ($L_m = M$), ao amortecimento ($R_m = D$) e inversamente proporcional à rigidez ($C_m = 1/K$) do sistema mecânico, respectivamente. A deflexão da viga σ_{in} gera uma carga que flui no lado mecânico até o transformador θ , que corresponde ao acoplamento eletromecânico. Quando a piezoestrutura é excitada em sua ressonância, o circuito pode ser simplificado e ser modelado apenas pela parte elétrica (RAMADASS, 2010), conforme a Figura 5 (b), onde o elemento piezelétrico é representado por uma fonte de corrente em paralelo com a capacitância e a resistência interna, e Figura 5 (c), onde o elemento piezelétrico é representado através de uma fonte de tensão em série com a resistência interna em paralelo com a capacitância interna do piezo-gerador. A capacitância interna pode ser calculada através da Equação 7:

$$C_p = \frac{\zeta w_P l_P}{h_P} \quad (7)$$

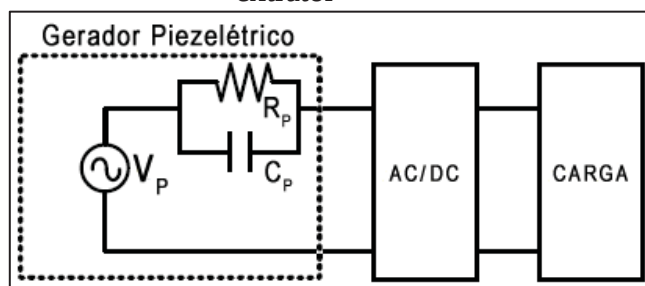
onde, l_P , w_P e h_P são o comprimento, largura e espessura do elemento piezelétrico. A permissividade do piezelétrico é dada por: $\zeta = K_3^T \varepsilon_0$. Para um elemento piezelétrico do tipo 5H4E a constante dielétrica relativa, $K_3^T = 3800$, e a permissividade do vácuo, $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$.

3.3 TEOREMA DA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA

Ao contrário das fontes de alimentação e das baterias, que possuem baixa impedância interna (sendo medida em $m\Omega$), a impedância do elemento piezelétrico é bastante elevada (sendo medida em $M\Omega$). Dessa forma, a alta impedância interna restringe a corrente de saída do PZT na faixa de microampères (RAMADASS, 2010).

O elemento piezelétrico produz corrente alternada em sua saída, sendo necessária a retificação desta para armazenamento ou utilização imediata, e isso é realizado através de um circuito conversor/retificador (ponte completa e dobrador), Figura 6. Após a retificação a corrente alimenta um supercapacitor, e dependendo da corrente o supercapacitor será carregado mais rapidamente ou mais lentamente. Uma das formas de se obter uma corrente alta e alimentar o supercapacitor mais rapidamente é obtendo o máximo da potência disponível do piezo-gerador, e para isso acontecer é necessário que o sistema atenda ao *Teorema da Máxima Transferência de Potência*.

Figura 6 - Diagrama esquemático do elemento piezelétrico em conjunto com o circuito extrator



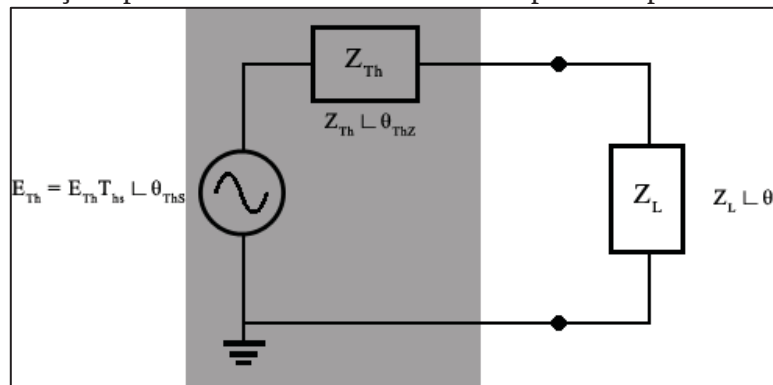
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A máxima transferência de potencia ocorre quando: “A potência fornecida por uma fonte a uma carga é máxima quando a impedância da carga é o complexo conjugado da impedância de Thévenin entre os terminais da fonte” (BOYLESTAD, 2004, p. 561).

Assim, nas aplicações de *extração e armazenamento de energia*, onde se tem um circuito de extração/retificação antes do armazenamento, a carga descrita pelo teorema será o circuito enxergado pela fonte, que neste caso é o circuito de extração. Dessa forma, é necessário que a impedância deste circuito seja o complexo conjugado da impedância entre os terminais da fonte. Caso um dispositivo, um sensor por exemplo, seja acoplado ao sistema de armazenamento, a carga descrita pelo teorema passa a ser a soma das impedâncias do circuito e do dispositivo acoplado.

O circuito para aplicação do teorema é apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Condições para a máxima transferência de potencia para uma carga.



Fonte: Adaptado de Boylestad (2004)

Para o circuito acima, a máxima transferência de potencia para a carga ocorre quando

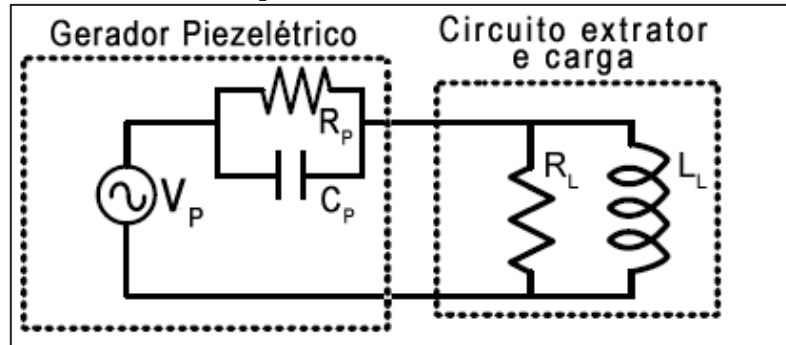
$$Z_L = Z_{Th} e \theta_L = -\theta_{ThZ} \quad (8)$$

Ou em forma retangular:

$$R_L = R_{Th} e \pm jX_{carga} = \mp jX_{Th} \quad (9)$$

Para sistemas piezelétricos, a impedância interna é determinada através da resistência interna e da reatância capacitiva. Sendo assim, para que ocorra a máxima transferência de potência é necessário que a impedância do circuito de extração e do circuito de carga seja o complexo conjugado da impedância do piezo-gerador, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Circuito com as impedâncias interna e dos circuitos extrator e de carga.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Desta maneira, fazendo o casamento de impedância:

$$Z_T = (R_P - jX_C) + (R_L + jX_L) \quad (10)$$

Na Equação 10, acima, os complexos conjugados se anulam, restando apenas a parte real, ou seja, o circuito se torna puramente resistivo. Assim, seu fator de potência, na condição de potência máxima, é igual a 1.

Caso esta condição seja satisfeita, então a máxima potência teórica que pode ser extraída do elemento piezelétrico é dada pela Equação 11:

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{Q_P^2 V_P^2}{8R_P} \quad (11)$$

Onde Q_P e V_P são o fator Q e a tensão de circuito aberto nos terminais do PZT, respectivamente, e são dados por:

$$V_P = \frac{I_P}{\omega_P C_P} \quad (12)$$

$$Q_P = \omega_P R_P C_P \quad (13)$$

Sendo a corrente de saída do PZT dada por:

$$I_P = \omega_P U_m \Theta \quad (14)$$

Com R_P , C_P , ω_P , U_m e Θ sendo a resistência interna, capacitância interna, frequência de excitação da viga, deflexão máxima da viga e coeficiente de acoplamento eletromecânico, respectivamente.

Após esta revisão dos conceitos básicos sobre sistemas de *extração e armazenamento de energia* se torna mais fácil o entendimento e aplicação dos conceitos no desenvolvimento

da piezoestrutura proposta e dos circuitos eletrônicos para a extração da energia disponível no elemento piezelétrico para armazenamento e alimentação de um sensor.

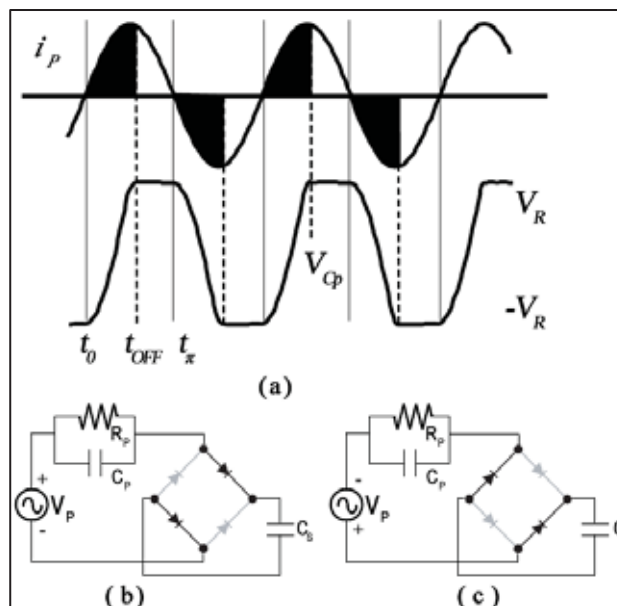
3.4 CIRCUITOS DE EXTRAÇÃO DE ENERGIA

Neste tópico são apresentados e discutidos o funcionamento dos circuitos básicos para extração de energia bem como o modelamento matemático para obter a potência extraída por cada um dos circuitos.

3.4.1 CIRCUITO RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

Os retificadores de onda completa são amplamente utilizados na literatura especializada, e consiste de quatro diodos produzindo um sinal retificado de tensão sendo armazenado em um capacitor. A cada meio ciclo da tensão de entrada, a forma de onda da corrente produzida pode ser dividida em duas regiões: no intervalo entre t_0 e t_{OFF} e no intervalo entre t_{OFF} e V_{Cp} . No primeiro intervalo, a corrente i_p flui, internamente, carregando o capacitor interno do elemento piezelétrico. Neste intervalo, todos os diodos estão reversamente polarizados e nenhuma corrente flui para o capacitor de armazenamento, C_s . Isto ocorre até que a tensão no capacitor interno, V_{Cp} , seja igual à tensão de saída, V_R . Quando isso ocorre, os diodos D_1 e D_4 são polarizados diretamente, Figura 9 (b), e começam a conduzir a corrente i_p pra saída e este intervalo dura até que a corrente mude de direção.

Figura 9: Funcionamento do retificador e formas de onda da corrente e tensão.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

No semi ciclo negativo, este processo se repete. Porém, os diodos D_2 e D_3 , Figura 9 (c), é que são polarizados diretamente quando a tensão no capacitor interno, V_{CP} , seja igual á tensão de saída $-V_R$. Na Figura 9 (a), acima, os formatos de onda da corrente e da tensão para o retificador de onda completa, onde é possível observar que a parte sombreada representa a quantidade de carga que não é liberada para a saída em cada semi-ciclo. Nos cálculos a seguir são considerados diodos não ideais, ou seja, são consideradas as quedas de tensão em cima de cada diodo presente em cada ciclo, bem como a resistência interna do elemento piezelétrico, R_P .

Assim, a carga perdida em cada semi-ciclo é dividida em duas partes:

- Carga perdida no carregamento e descarregamento do capacitor interno.
- Carga perdida devido a corrente na resistência interna.

A perda de carga devido ao capacitor interno, C_P , em cada semi-ciclo é dada por:

$$Q_{P,CP} = C_P(V_F - V_I) \quad (15)$$

Sendo, $V_I = -(V_{Ret} + 2V_D)$ e $V_F = V_{Ret} + 2V_D$, com V_D sendo a queda de tensão do diodo.

Na resistência interna, a perda de carga pode ser derivada considerando que o semi-ciclo está dividido em dois períodos: 0 a t_1 e t_1 a t_π . A tensão v_P é dada por:

$$v_P = V_I + V_P(1 - \cos\omega_P t) \quad (16)$$

onde, a amplitude da tensão de circuito aberto da saída do piezelétrico é dada por, $V_P = I_P/\omega_P C_P$. O tempo t_1 para que v_P alcance V_F é dado por:

$$\omega_P t_1 = \cos^{-1} \left(1 - \frac{V_F - V_I}{V_P} \right) \quad (17)$$

Dado t_1 , encontra-se a perda de carga no resistor interno no intervalo entre 0 e t_1 como sendo:

$$Q_{1P,Rp} = \frac{V_I + V_P}{R_P} t_1 - \frac{V_P \sin\omega_P t_1}{\omega_P R_P} \quad (18)$$

No intervalo de tempo entre t_1 e t_π , a corrente através de R_P é constante em V_F/R_P . Assim, a perda de carga devido à resistência interna no intervalo t_1 e t_π pode ser descrito como:

$$Q_{2P,Rp} = \frac{V_F(t_\pi - t_1)}{R_P} \quad (19)$$

A carga total perdida em R_P durante todo o semi-ciclo é:

$$Q_{P,Rp} = \frac{(V_I + V_P)t_1}{R_P} - \frac{V_P \sin \omega_P t_1}{\omega_P R_P} + \frac{V_F(t_\pi - t_1)}{R_P} \quad (20)$$

Considerando uma corrente constante V_F/R_P através da resistência interna por uma fração κ do semi-ciclo, tem-se:

$$\frac{\kappa V_F}{R_P} t_\pi = \frac{(V_I + V_P)t_1}{R_P} - \frac{V_P \sin \omega_P t_1}{\omega_P R_P} + \frac{V_F(t_\pi - t_1)}{R_P} \quad (21)$$

Fazendo $\omega_P t_\pi = \pi$ e multiplicando-se em ambos os lados, κ é dado por:

$$\kappa = \frac{(V_I + V_P)\omega_P t_1}{\pi V_F} - \frac{V_P \sin \omega_P t_1}{\pi V_F} + \frac{\pi - \omega_P t_1}{\pi} \quad (22)$$

Deste modo, a carga total perdida em cada semi-ciclo é dada por:

$$Q_{TP} = C_P(V_F - V_I) + \frac{\pi \kappa V_F}{\omega_P R_P} \quad (23)$$

A carga disponível na saída do piezelétrico em cada semi-ciclo é descrita como:

$$Q_D = 2C_P V_P \quad (24)$$

Assim, a carga obtida na saída do retificador ao final de cada semi-ciclo é:

$$Q_{Ret} = 2C_P V_P - C_P(V_F - V_I) - \frac{\pi \kappa V_F}{\omega_P R_P} \quad (25)$$

A potência é então obtida através da Equação 26, abaixo:

$$P_{Ret} = 2C_P V_{Ret} f_P (2V_P - (V_F - V_I)) - \frac{\pi \kappa V_F}{Q_P} \quad (26)$$

com $Q_P = \omega_P C_P R_P$ que é o fator Q do piezo-gerador.

Substituindo os valores de V_I e V_F , a Equação 26 torna-se:

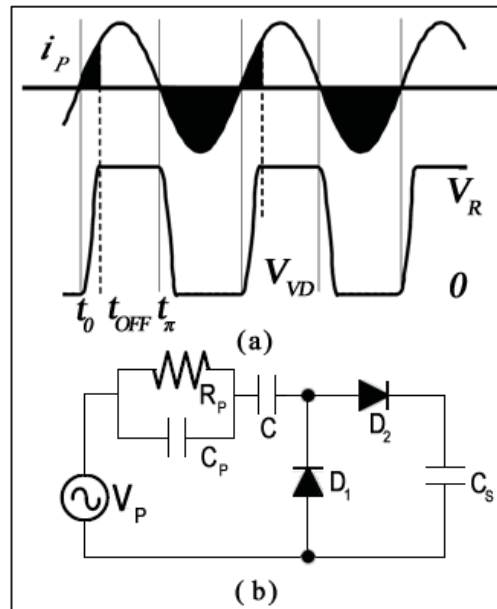
$$P_{Ret} = 2C_P V_{Ret} f_P (2V_P - (2V_{Ret} + 4V_D)) - \frac{\pi \kappa (V_{Ret} + 2V_D)}{Q_P} \quad (27)$$

3.4.2 CIRCUITO DOBRADOR DE TENSÃO

Os circuitos multiplicadores de tensão, mais especificamente o dobrador de tensão, são empregados para manterem uma tensão de pico de entrada relativamente pequena, enquanto multiplica a tensão de pico de saída, num caso ideal onde as perdas são desprezadas, a tensão retificada de saída produzida é duas vezes o valor da tensão de entrada senoidal. (BOYLESTAD e NASHELSKY, 1998)

Na Figura 10, são apresentados o sinal da corrente e da tensão do piezelétrico conectado ao circuito dobrador de tensão e topologia deste circuito.

Figura 10: Circuito retificador dobrador de tensão.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Para entender o funcionamento do circuito, será realizada uma análise detalhada durante sucessivos semi-ciclos da tensão AC de entrada, em apenas uma das vigas da piezoestrutura:

- I. Durante o primeiro semi-ciclo negativo o diodo D_1 será polarizado diretamente carregando o capacitor C com uma tensão igual à tensão de pico (V_p).
- II. Durante o semi-ciclo positivo seguinte, D_1 será polarizado reversamente e não conduzirá corrente. A tensão armazenada em C será somada com a tensão de saída do PZT, fazendo com que se obtenha uma tensão de $2V_p$ no anodo de D_2 . Uma vez que o capacitor C_S não está totalmente carregado, ele polarizará diretamente D_2 e permite com que a tensão armazenada em C seja aplicada em C_S , que carregará

conforme C descarrega até que nenhum dos dois capacitores possa polarizar o diodo D_1 .

- III. No próximo semi-ciclo negativo, o capacitor C será novamente carregado até a tensão de pico através do diodo D_1 . Caso não haja carga para descarregar C_S , sua tensão permanecerá em $+V_p$.
- IV. No segundo semi-ciclo positivo, C_S ainda estará carregado com $+V_p$, enquanto a tensão no anodo do diodo D_1 será novamente $+2V_p$. Assim, o capacitor C transfere parte de sua carga para o capacitor C_S , porém será interrompida quando o capacitor C_S estiver carregado com uma tensão de $+1.5V_p$.
- V. Esta ação continua, ciclo por ciclo, com o capacitor C sendo totalmente carregado pela tensão V_p a cada semi-ciclo negativo, e então carregará C_S .

A potência extraída por esta topologia é dada pela Equação 28. Observa-se que é bastante semelhante à Equação 27 para retificador de ponte completa, a diferença ocorre pois no retificador de ponte completa, há os dois semi-ciclos (positivo e negativo) enquanto que no dobrador de tensão só ocorre o semi-ciclo positivo.

$$P_{Ret} = C_P V_{Ret} f_P (2V_P - (V_F - V_I) - \frac{\pi \kappa V_F}{Q_P}) \quad (28)$$

onde, $V_I = -V_D$ e $V_F = V_{Ret} + V_D$, com V_D sendo a queda de tensão no diodo. Assim, a Equação 28 torna-se:

$$P_{Ret} = C_P V_{Ret} f_P (2V_P - (V_{Ret} + 2V_D) - \frac{\pi \kappa (V_{Ret} + V_D)}{Q_P}) \quad (29)$$

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir de uma análise teórica sobre os dois circuitos retificadores percebe-se que a potência extraída através do circuito dobrador de tensão é maior que a potência extraída pelo circuito retificador de onda completa. Porém, quando o foco é minimizar o tempo de carregamento do sistema de armazenamento de energia o circuito retificador de onda completa carrega o sistema de armazenamento em um intervalo de tempo menor já que a sua corrente média extraída é maior que a corrente média extraída pelo circuito dobrador de tensão. Espera-se que os resultados experimentais no próximo capítulo confirmem estas afirmações e que outras conclusões possam ser elaboradas.

CAPÍTULO 4

PIEZOESTRUTURA MULTIFREQUÊNCIA

Neste capítulo são apresentados a modelagem da piezoestrutura multifrequência utilizando elementos finitos através do ANSYS® e o desenvolvimento de uma das piezo-vigas, além da determinação da faixa de frequências de operação desejada.

Inicialmente é apresentada uma breve formulação do modelo de elementos finitos na forma em que é modelado através do software de elementos finitos ANSYS®. Apesar de a piezoestrutura ser composta por três vigas, elas podem ser modeladas separadamente, uma a uma, e obter o resultado simulado da tensão produzida por cada piezo-viga.

Em um segundo momento são apresentadas a piezoestrutura multifrequência e as considerações, como a possibilidade de aplicação prática em ambientes industriais, envolvidas no desenvolvimento desta, de forma clara e concisa.

Finalmente, visando minimizar as perdas na geração de energia quando a frequência de excitação varia, é apresentado o conceito do método da banda de meia potência sendo aplicado para determinar a faixa de frequências em que a piezoestrutura deve operar.

4.1 MODELO POR ELEMENTOS FINITOS

Apesar de os diversos modelos utilizando parâmetros concentrados presentes na literatura serem capazes de prever a energia produzida pela piezoestrutura, alguns problemas são observados nestes modelos (ERTURK; INMAN, 2008b). Modelos supersimplificados e considerações físicas incorretas além de problemas na formulação do acoplamento piezoelétrico, uso de modelos com baixa fidelidade com o fenômeno físico, modelagem incorreta do movimento da base e o uso de expressões estáticas em problemas fundamentalmente dinâmicos (ERTURK; INMAN, 2008b) são os principais problemas encontrados nos modelos desenvolvidos até então.

Pensando em apresentar um modelo mais fiel e capaz de prever a tensão elétrica produzida com maior precisão, o presente trabalho utiliza um modelo utilizando o software de elementos finitos ANSYS®.

A equação do sistema eletromecânico acoplado foi obtida através da aplicação do princípio variacional e da discretização por elementos finitos (ALLIK, 1970). Em forma matricial, a equação acoplada de elementos finitos derivada para o modelo é:

$$\begin{bmatrix} [M_{uu}] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{\phi}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{uu}] & [0] \\ [0] & -[C_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{\phi}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{uu}] & [K_{u\phi}] \\ [K_{u\phi}]^t & -[K_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{\phi\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix} \quad (30)$$

Sendo, u o deslocamento mecânico que descreve o movimento em cada elemento estrutural e ϕ os graus de liberdade elétricos que descrevem o potencial elétrico nos nós estruturais. Com $[M_{uu}]$ sendo a matriz elementar de massa, $[K_{uu}]$ a matriz elementar de rigidez. $[K_{\phi\phi}]$ é a matriz elementar dos coeficientes de permissividade dielétrica, $[C_{\phi\phi}]$ é a matriz elementar do amortecimento dielétrico (capacitância), $\{Q\}$ é o vetor das cargas nodais, da superfície e do corpo, $[K_{u\phi}]$ é a matriz do acoplamento piezoeletrico, $\{F\}$ é o vetor das forças nodais e de superfície que são aplicadas no sistema. O amortecimento neste caso é considerado como sendo proporcional às matrizes de massa e rigidez, $[C_{uu}]$:

$$[C_{uu}] = \alpha[M_{uu}] + \beta[K_{uu}] \quad (31)$$

onde α e β são coeficientes de proporcionalidade variando da ordem de 10^{-2} e 10^{-4} , respectivamente.

4.2 PIEZOESTRUTURA MULTIFREQUÊNCIA

Neste tópico são apresentadas as considerações em torno da piezoestrutura multifrequência, aplicando a modelagem desenvolvida no tópico anterior através do software de elementos finitos ANSYS®.

Como o fator de qualidade do elemento piezoeletrico é comumente alto (KOK et al., 2011), pequenas variações na frequência de excitação podem causar grandes perdas na energia produzida, considerando apenas o sistema como sendo linear. Dessa forma, uma maneira de produzir um alto valor de energia mesmo que a frequência de excitação sofra variações é o desenvolvimento de uma piezoestrutura multifrequência trabalhando dentro da faixa de frequências da excitação de entrada. Alguns autores realizaram experimentos e

desenvolveram piezoestruturas multifrequência (Broadband – FERRARI et al., 2007; Narrowband – KOK et al., 2011) que demonstram a sua eficiência e versatilidade, tornando possível a geração de energia sem perdas drásticas provocadas por pequenas variações na frequência de excitação.

Outra consideração adotada neste trabalho se refere à aplicação prática em ambientes industriais da tecnologia de *extração e armazenamento de energia*. Sabendo-se que a maior geração de energia é obtida quando a piezoestrutura é excitada em sua frequência natural, ou seja, operando na ressonância. Assim sendo, é necessário desenvolver uma piezoestrutura que possa ser operada por uma frequência presente neste ambiente.

No meio industrial há vários equipamentos importantes para o processo e que são monitorados periodicamente através de manutenção preventiva e/ou preditiva. Entretanto, há alguns equipamentos que são vitais para o funcionamento principal da planta, como os exaustores e sopradores da caldeira em uma usina sucroalcooleira, e o sistema de bombeamento dos mancais guias de geradores em usinas hidrelétricas, por exemplo.

Considerando que a piezoestrutura esteja acoplada em um motor de quatro polos presente em um determinado conjunto de equipamentos, e que este motor opere em uma velocidade de rotação de 1800 rpm, sua frequência de operação será 30Hz.

Apesar da piezoestrutura multifrequência ser composta por três piezo-vigas, é possível modelar cada piezo-viga separadamente. Desta forma, em um primeiro momento, apenas uma das vigas foi desenvolvida. Assumindo as considerações realizadas acima, esta piezo-viga deve possuir a frequência natural do seu primeiro modo igual a 30Hz, para ser operada na ressonância. Na Figura 11, pode-se observar a primeira das piezo-vigas com suas dimensões.

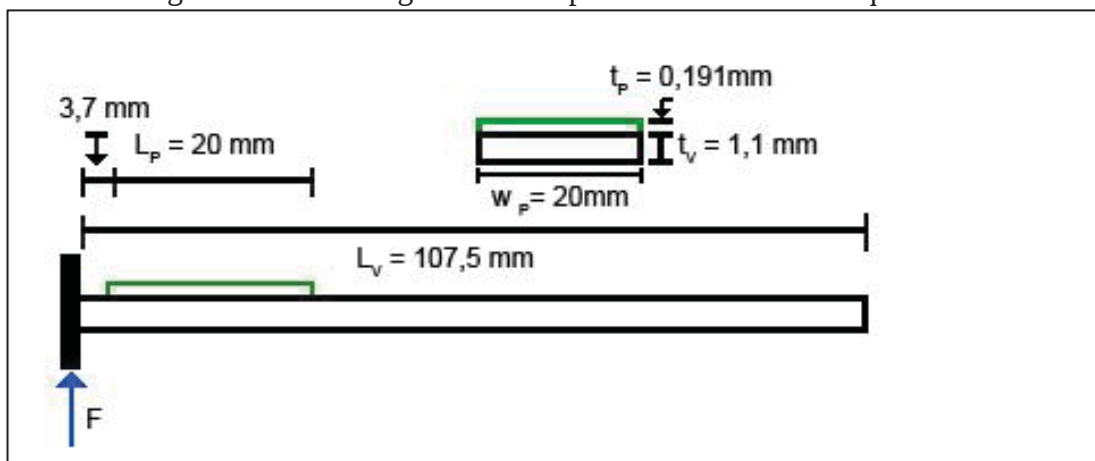
O material utilizado para a viga hospedeira foi o acrílico devido ao seu baixo valor do módulo de Young, o que faz com que a viga seja bastante flexível. Suas propriedades físicas e piezelétricas (retiradas do site do fabricante), além das características geométricas são apresentadas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Dimensões e propriedades de uma das vigas da piezoestrutura

Propriedades da Viga	Valor	Propriedades do PZT	Valor
Comprimento (mm)	107.5	Comprimento (mm)	20
Espessura (mm)	1.1	Largura (mm)	20
Largura (mm)	20	Espessura (mm)	0.191
Módulo de Young (GPa)	2.9	Módulo de Young Y_1^E (GPa)	62
Densidade (kg/mm ³)	1150	Módulo de Young Y_3^E (GPa)	50
		Constante piezoeétrica d_{33} (m/V)	650e-12
		Constante piezoeétrica d_{31} (m/V)	-320e-12
		Constante dielétrica relativa K_3^T	3800
		Coeficiente Acoplamento k_{31}	0,44
		Densidade (kg/mm ³)	7800

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

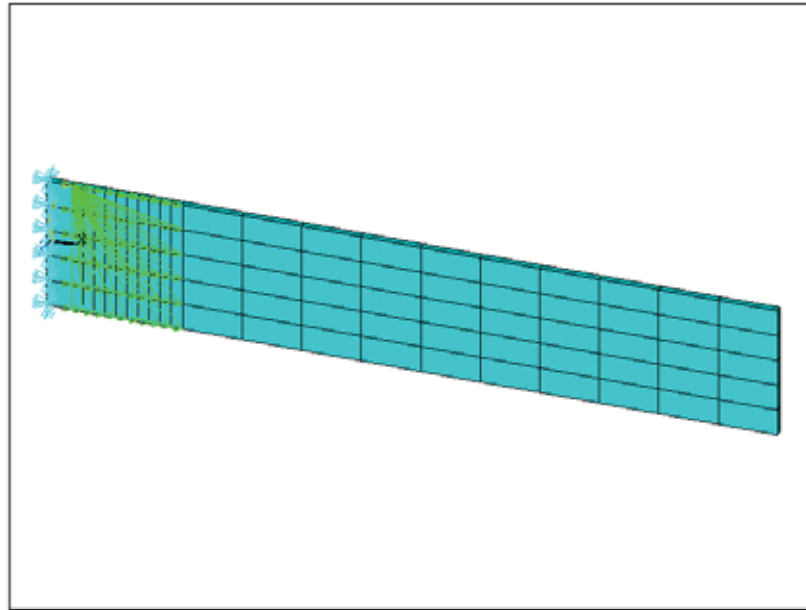
Figura 11 - Piezo-viga central da piezoestrutura multifrequência.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O modelo da piezoestrutura, Figura 12 abaixo, foi idealizado utilizando o método de elementos finitos através do programa ANSYS[®]. A viga foi discretizada em 105 elementos sólidos de 8 nós, com graus de liberdade de deslocamento nas direções x , y e z , elemento SOLID45 e o PZT foi discretizado em 100 elementos sólidos de 8 nós com graus de liberdade de deslocamento nas direções x , y e z e potencial elétrico, elemento SOLID5. No presente trabalho a piezoestrutura é uma estrutura unimorfe, ou seja, com apenas um elemento piezoeétrico acoplado à viga hospedeira, e é excitada através de sua base com uma aceleração senoidal de intensidade igual à aceleração da gravidade, ou seja, 1g.

Figura 12 - Piezoestrutura modelada por elementos finitos.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Através de análise modal teórica obteve-se as frequências naturais da estrutura para os quatro primeiros modos de vibrar, conforme pode ser observado na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2 – Frequências naturais do modelo.

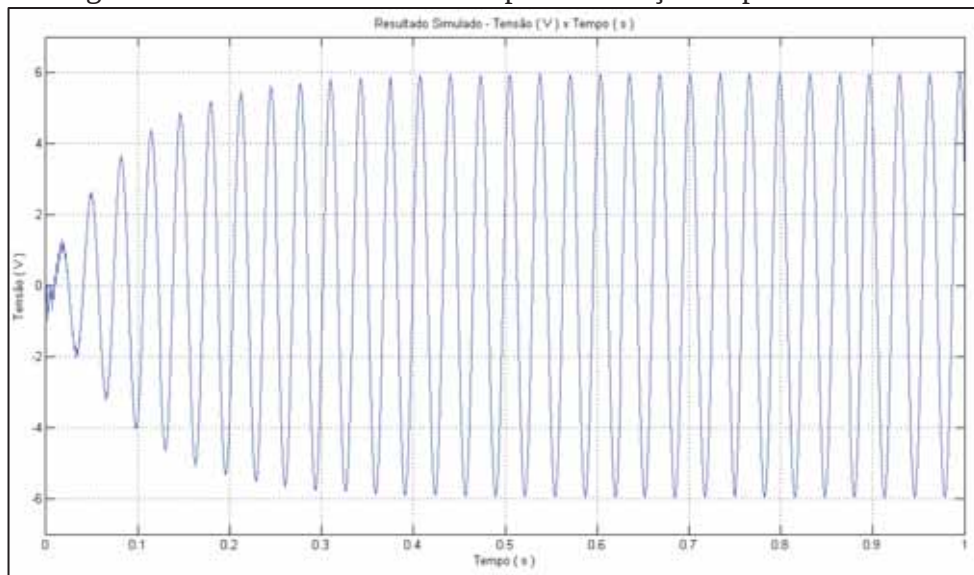
Modos	Frequência f_n (Hz)
1	30,666
2	174,27
3	301,48
4	456,95

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Observa-se que o modelo numérico apresenta a frequência do primeiro modo, de flexão, próxima da primeira frequência natural definida para o funcionamento da piezoestrutura.

O potencial elétrico produzido pela simulação, considerando a aproximação de amortecimento proporcional, com coeficiente α igual 0,7 e coeficiente β igual a 6×10^{-4} , e sendo excitada em sua frequência natural através da sua base com uma aceleração senoidal com amplitude de $1g$ ($1g = 9,81m/s^2$), foi de 11,9 V pico a pico, como pode ser observada na Figura 13.

Figura 13 – Tensão elétrica obtida pela simulação da piezoestrutura.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

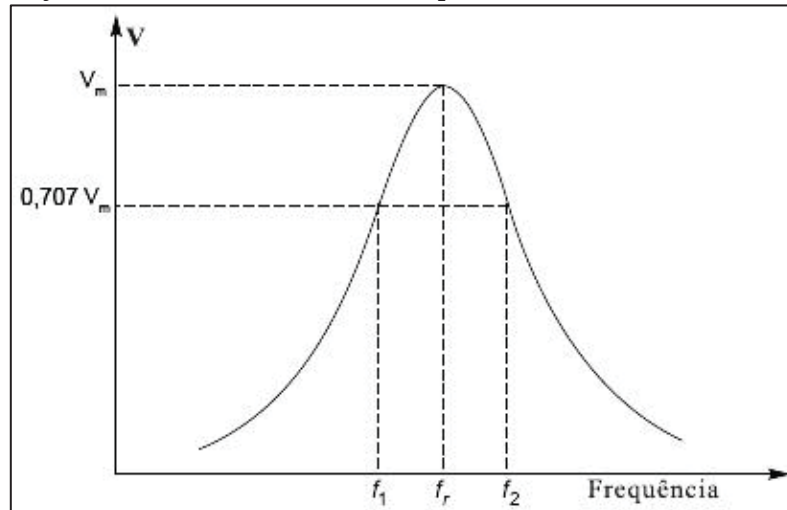
Após realizada a modelagem da piezo-viga central, foi aplicado o método da banda de meia potência visando identificar quais devem ser as frequências naturais do primeiro modo das demais piezo-vigas. Sendo assim, no subtópico a seguir é apresentada a metodologia utilizada.

4.2.1 Definição da faixa de frequências

Como o elemento piezelétrico possui um alto valor do fator Q_m , a largura de banda é muito estreita e com a variação da frequência de excitação, à medida que se distancia da frequência de ressonância, ocorre uma perda muito grande na tensão produzida. Para produzir um alto valor de energia mesmo que a frequência de excitação sofra variações foi proposta uma piezoestrutura multifrequência. De modo a determinar em quais frequências devem operar as demais piezo-vigas foi necessário estipular um valor aceitável para as perdas na geração de energia quando a frequência de excitação oscila. Considerou-se que a tensão elétrica produzida, quando a frequência de excitação se distancia da frequência de ressonância da piezo-viga, deve estar entre 60% a 70% do seu valor quando uma piezo-viga for excitada na sua frequência de ressonância. Com base nisso, o conceito da banda de meia potência foi utilizado para determinar a faixa de frequências que a piezoestrutura deve operar.

O conceito da banda de meia potência é amplamente estudado em vibrações mecânicas quando se quer determinar o fator de amortecimento de uma estrutura, este conceito foi adaptado para a proposta de solução deste trabalho, conforme Figura 14, a seguir.

Figura 14 – Identificação do fator de amortecimento pelo método da banda de meia potência.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Para aplicar o método foi necessário realizar uma varredura nas frequências e as respectivas tensões produzidas pela piezoestrutura e, então, calcular até quais frequências a diminuição no pico de energia produzida está dentro do desejado. A Tabela 3, abaixo apresenta a varredura das tensões produzidas em cada frequência.

Tabela 3 – Varredura de tensões da primeira viga.

Frequência (Hz)	26	27	28	29	30	31	32	33	34
Tensão (V)	6.60	7.84	8.48	10.2	11.5	10.3	8.64	7.6	6.44

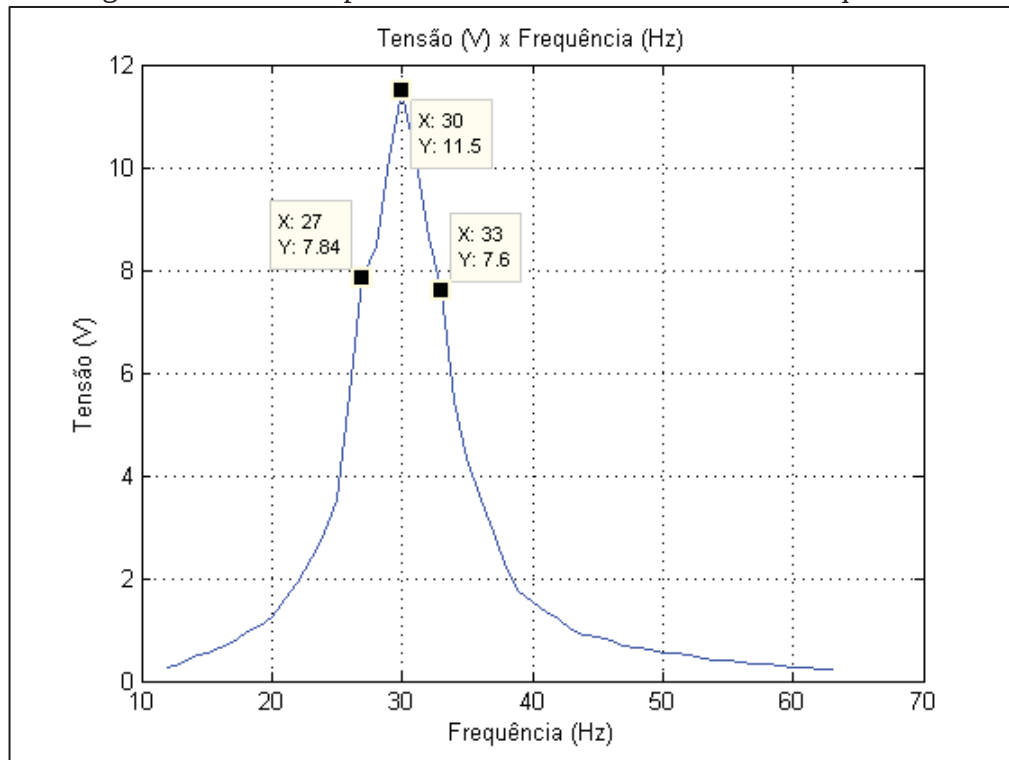
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A partir da Tabela 4, foi possível obter até quais frequências o nível da tensão produzida está dentro do limite aceitável, utilizando-se da Equação 32:

$$dB = 20 * \log_{10}\left(\frac{V}{V_{ref}}\right) \quad (32)$$

onde V_{ref} é a tensão produzida na ressonância, ou seja, em 30 Hz. Assim sendo, obteve-se que nas frequências de 27Hz e 33Hz foi possível produzir 68,17% e 66,08%, respectivamente, da tensão elétrica, conforme a Figura 15. Abaixo de 27 Hz e acima de 33 Hz a tensão produzida diminui drasticamente ficando fora da faixa aceitável pré-determinada. Assim sendo, se faz necessário projetar as demais vigas da piezoestrutura multifrequência para operar nas frequências de 27Hz e 33Hz.

Figura 15 – Tensões produzidas através da varredura de frequências.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Uma vez que as equações governantes do sistema piezelétrico de *extração e armazenamento de energia* proposto foram determinadas pelo modelo de elementos finitos e que a faixa de frequências de operação da piezoestrutura multifrequência foi definida, o próximo passo é verificar se o modelo desenvolvido possui boa correlação com os resultados experimentais e quais parâmetros realizam maior influência na variação das frequências naturais de cada piezo-viga para que estejam dentro da faixa de frequências definida. Assim, no próximo capítulo são realizados a comparação do modelo com os resultados experimentais e um estudo paramétrico da piezoestrutura multifrequência.

CAPÍTULO 5

COMPARAÇÃO DO MODELO E ESTUDO PARAMÉTRICO DA PIEZOESTRUTURA MULTIFREQUÊNCIA

Neste capítulo é apresentada uma comparação entre o modelo simulado e os resultados experimentais. Além disso, é realizado um estudo paramétrico de modo a identificar qual a faixa de frequências que a piezoestrutura multifrequência deve operar.

Inicialmente o modelo proposto é comparado com os resultados experimentais utilizando as mesmas condições aplicadas nas simulações. A tensão elétrica obtida no modelo numérico de elementos finitos é comparada com os resultados experimentais visando encontrar uma boa correlação para que o modelo possa ser usado para estudar o comportamento e tendência de alguns parâmetros no processo de geração de potencial elétrico.

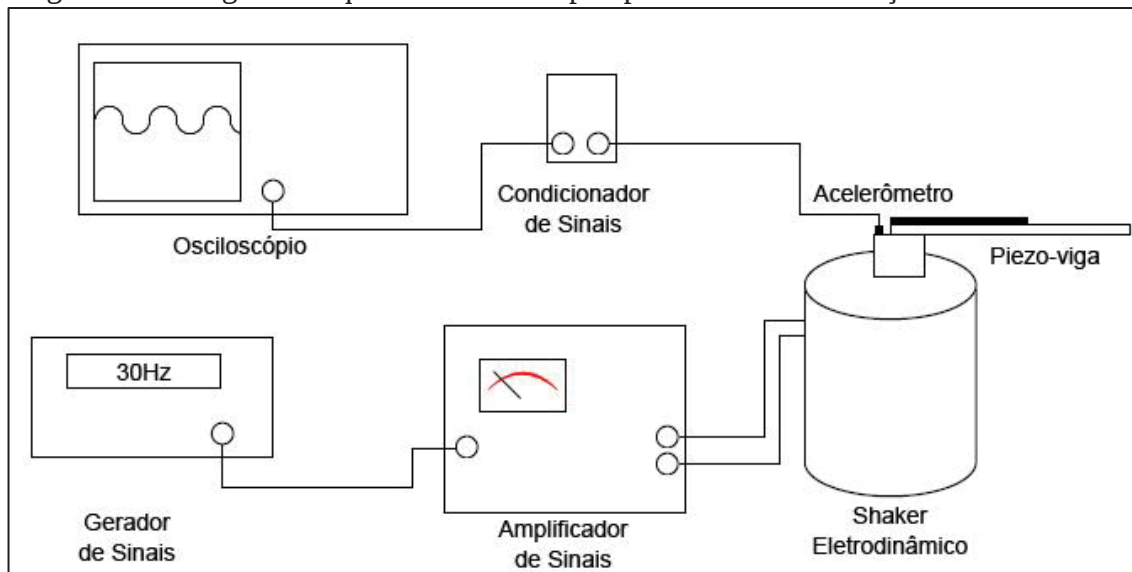
Posteriormente, foi realizado um estudo sobre quais variáveis (largura, comprimento e espessura da viga e comprimento do PZT) apresentam maior influência na variação da frequência natural das piezo-vigas para que elas estejam dentro da faixa de frequências desejada para uma piezoestrutura composta por três vigas do tipo engastada-livre.

5.1 COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL DO MODELO

Para validar o modelo, foi realizado um teste experimental onde a piezo-viga foi excitada com uma frequência de 30Hz e com uma aceleração senoidal de sua base com a mesma amplitude utilizada nas simulações, no valor de 1g, monitorada através de um acelerômetro (PCB Piezotronics Modelo: 352C22 – 10,30 mV/g).

Na Figura 16 é apresentado o diagrama esquemático do setup experimental utilizado para a comparação entre os modelos numéricos e experimental.

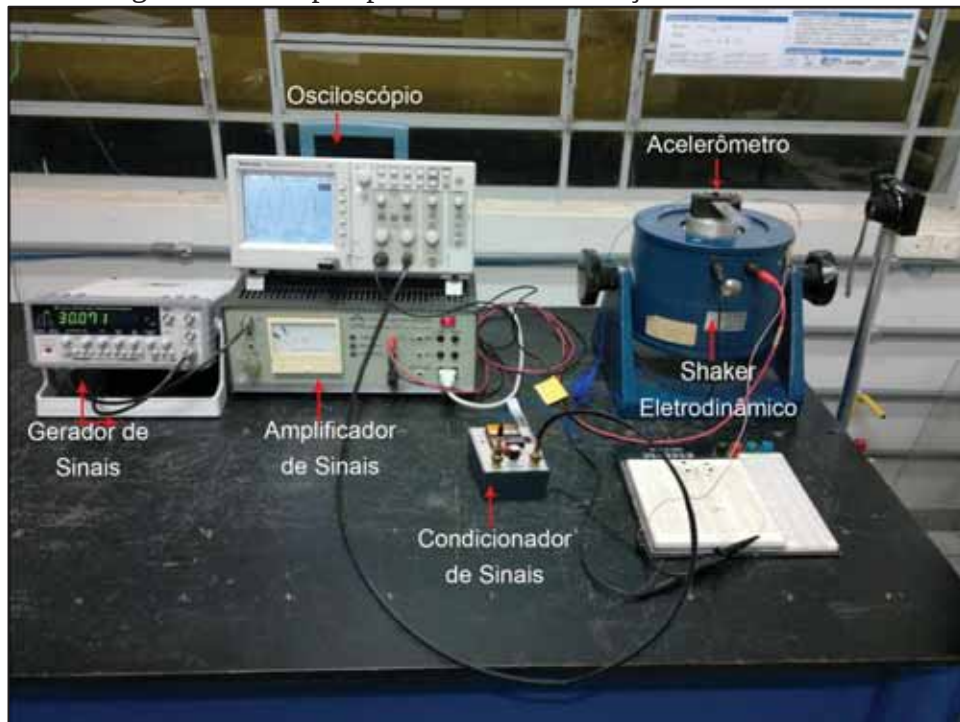
Figura 16 – Diagrama esquemático do setup experimental de validação dos resultados.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Nos testes experimentais foram utilizados um gerador de sinais MINIPA MFG-4220 20MHz, com um amplificador VEB METRA MESS - MMF LV103, um shaker eletrodinâmico, um osciloscópio TEKTRONIX TDS 1012B para medir a tensão produzida pelo PZT, conforme pode ser visto na Figura 17, abaixo.

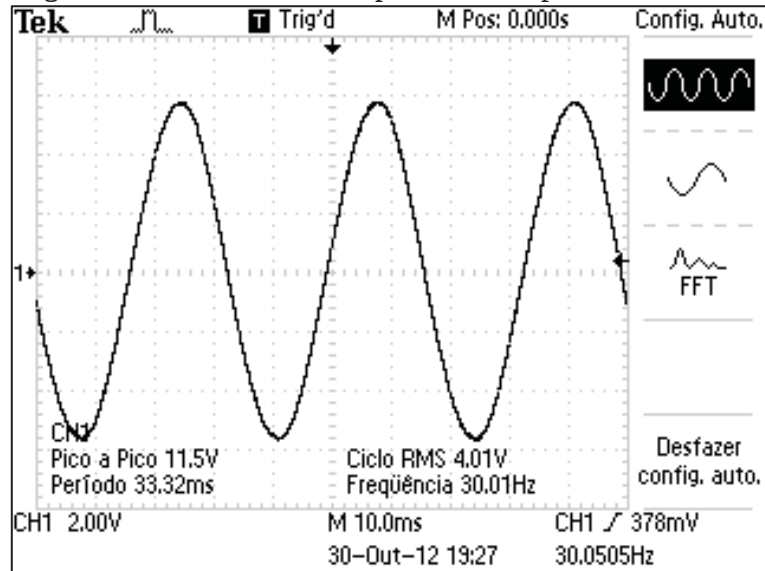
Figura 17 - Setup experimental de validação dos resultados.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O potencial elétrico produzido pela piezoestrutura experimentalmente foi reproduzido no gráfico da Figura 18, abaixo.

Figura 18 – Tensão elétrica produzida experimentalmente.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Comparando o potencial elétrico obtido experimentalmente com o do modelo de elementos finitos é possível observar a representatividade do modelo. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos pelos dois métodos e apresenta a diferença entre eles.

Tabela 4 – Resultados obtidos pelos dois métodos e a diferença entre eles.

Método	Numérico	Experimental	Diferença (%)
Frequência f_n (Hz)	30,666	30,01	2,18
Tensão (V)	11,9	11,5	3,47

$$Diferença = (Experimental - Numérico / Experimental) * 100$$

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Após a validação do modelo da primeira viga, o mesmo foi realizado para as demais vigas componentes de piezoestrutura. Na próxima seção é apresentada a metodologia utilizada para a determinação das frequências naturais das outras vigas engastada-livre.

5.2 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS NA LARGURA DE BANDA DA PIEZOESTRUTURA

Este estudo foi realizado de modo a determinar quais das características geométricas da piezoestrutura tem maior influência na frequência natural de cada uma das vigas. Desta forma, obteve-se a forma final da piezoestrutura. Ao final deste tópico será realizada também uma análise sobre a influência do comprimento do PZT acoplado na viga quanto à potência produzida e na frequência natural da viga.

A primeira variável analisada é a espessura da viga, mantendo todas as outras variáveis, presentes da Tabela 1, iguais. As espessuras da viga foram variadas de acordo com os valores comerciais das placas de acrílico no software ANSYS® obtendo as frequências naturais para cada espessura, conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Valores comerciais de espessura de placas de acrílico.

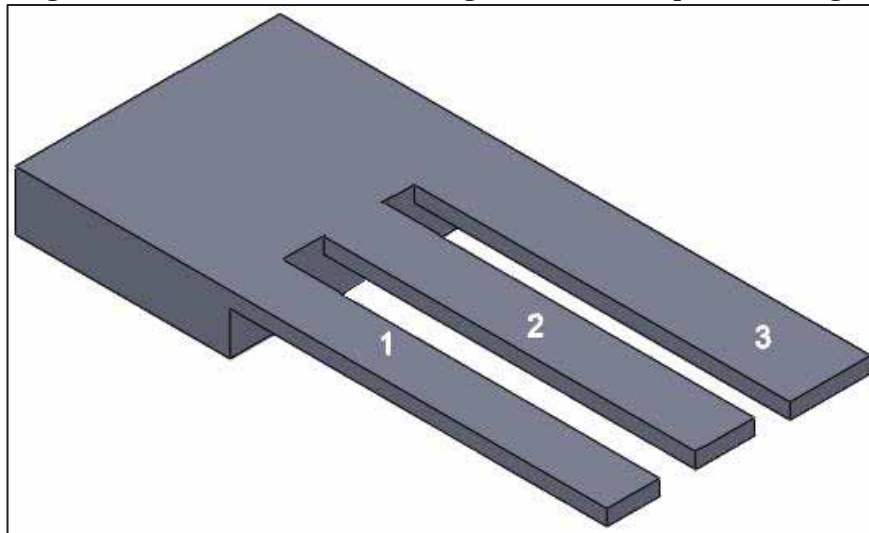
Espessura (mm)	Frequência Natural (Hz)
1.1	30.666
2	54.533
3	80.509

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Observa-se, que a variação da espessura representa grande influência na frequência natural de cada viga, pois à medida que se aumenta a espessura a frequência natural aumenta consideravelmente. Adicionalmente, quanto maior a espessura de cada viga, mais rígida a estrutura se torna, sendo necessário o aumento do comprimento ou largura da viga para que ela possua frequência natural dentro da faixa desejada.

Outras simulações foram realizadas modificando-se a largura de cada viga e mantendo-se as outras propriedades inalteradas. As larguras de cada viga foram variadas em 2mm, conforme Figura 19. O resultado obtido é apresentado na Tabela 6, abaixo.

Figura 19 – Piezoestrutura com larguras diferentes para cada viga.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 6 – Frequências naturais de cada viga variando-se a largura.

Viga	Largura (mm)	Frequência Natural (Hz)
1	18	30.629
2	20	30.666
3	22	30.702

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

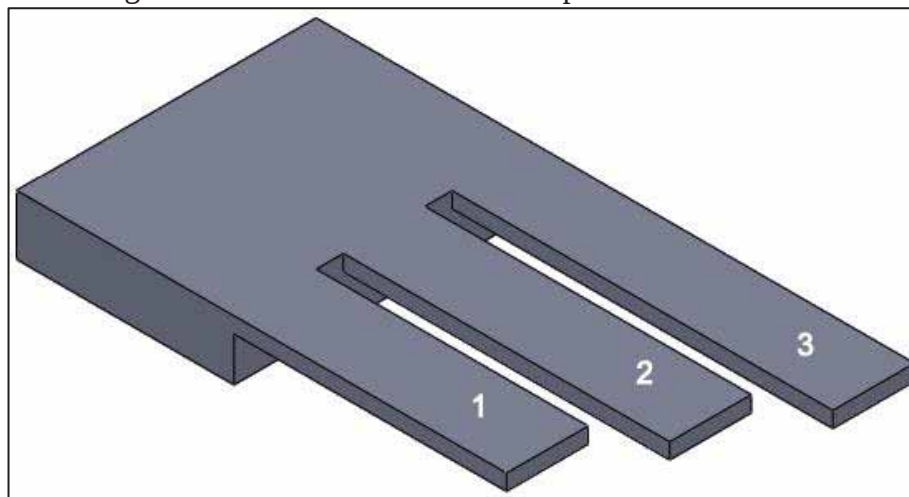
É possível visualizar que a variação da largura apresenta pouca influência na frequência natural de cada viga, fazendo com que cada frequência varie pouco. Assim, não sendo o ideal para a faixa de frequências desejada.

Como as vigas são excitadas no primeiro modo, já se esperava que a largura não representasse grande influência na variação da frequência natural e que a espessura tenha forte variação na frequência natural da viga. Considerando a frequência natural como sendo $f_n = \sqrt{k/m}$, e a rigidez da viga hospedeira como sendo $k = 3EI/L^3$, com E sendo o módulo de elasticidade do material, L sendo o comprimento da viga e I o momento de inércia sendo definido por $I = (bh^3/12)$, onde b é a largura da viga e h a espessura. Dessa forma pequenas variações na espessura causam grandes variações na frequência natural da viga enquanto que o mesmo não acontece na variação da largura.

Finalmente, as vigas tiveram seus comprimentos variados, em 5mm cada, de modo a obter as frequências naturais dentro da faixa desejada. Porém, tentando sempre manter a

piezoestrutura em um tamanho razoavelmente pequeno. A Figura 20, abaixo, apresenta uma configuração onde os comprimentos foram variados.

Figura 20 – Piezoestrutura com comprimentos diferentes.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 7 – Frequências naturais de cada viga com variação do comprimento.

Viga	Comprimento (mm)	Frequência Natural (Hz)
1	102.5	34.029
2	107.5	30.666
3	112.5	27.771

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

É possível observar que a variação do comprimento apresentou um resultado satisfatório, com as vigas tendo frequências naturais dentro da faixa desejada. Para ajustar nas frequências desejadas de 27 Hz e 33 Hz, cada viga teve seus comprimentos iguais a 112,5mm e 103,5mm, respectivamente. Neste momento, a piezoestrutura é composta por três piezo-vigas com espessuras de 1.1mm, larguras de 20mm e comprimentos de 103,5mm, 107,5mm e 112,5mm para as frequências de 33Hz, 30Hz e 27Hz, respectivamente.

Outro fator que influencia na frequência natural de cada viga hospedeira presente na piezoestrutura é o tamanho do elemento piezelétrico, como já foi visualizado previamente a largura e a espessura das vigas hospedeiras são mantidas constantes, desta forma a largura e espessura do PZT também não sofreram alterações, variando-se apenas o comprimento dos mesmos. Esta variação no comprimento do elemento piezelétrico influencia diretamente na frequência natural de cada viga, conforme pode ser observado na Tabela 8 a seguir.

Tabela 8 – Frequências naturais de cada viga com variação do comprimento do PZT.

Comprimento (mm)	Viga 1 f_n (Hz)	Viga 2 f_n (Hz)	Viga 3 f_n (Hz)
20	33,325	30.666	27,771
40	40,968	37.696	34,084
60	43,355	40.499	37,204
80	39,475	37.543	35,234
100	33,422	32.227	30,752

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Com a variação no comprimento do elemento piezelétrico percebe-se que a frequência natural de cada viga é modificada drasticamente, saindo da faixa de frequências desejada. Neste caso, se faz necessário ajustar os comprimentos das vigas hospedeiras para manter as frequências naturais dentro da faixa desejada.

Novas simulações foram realizadas de modo a verificar a influência do comprimento do elemento piezelétrico na geração de energia, pois uma das preocupações deste trabalho está em produzir o máximo de energia possível.

Através de simulações no software ANSYS[®], utilizando os valores da Tabela 8 acima, foi possível observar que a máxima tensão produzida ocorre no comprimento de 60mm e que conforme se aumenta o comprimento, a tensão produzida diminui. Isso ocorre devido ao fato de que o coeficiente de acoplamento piezelétrico varia de acordo com o comprimento do PZT. A piezo-viga foi excitada com uma aceleração de 1g em sua base durante um intervalo de 1 segundo, de onde pode-se verificar que entra em regime permanente após 5 segundos. Nas Figuras 21 e 22 estão os gráficos da FRF das tensões e as tensões de pico para cada comprimento do elemento piezelétrico.

Figura 21 – FRF das tensões produzidas de acordo com o comprimento do elemento piezelétrico.

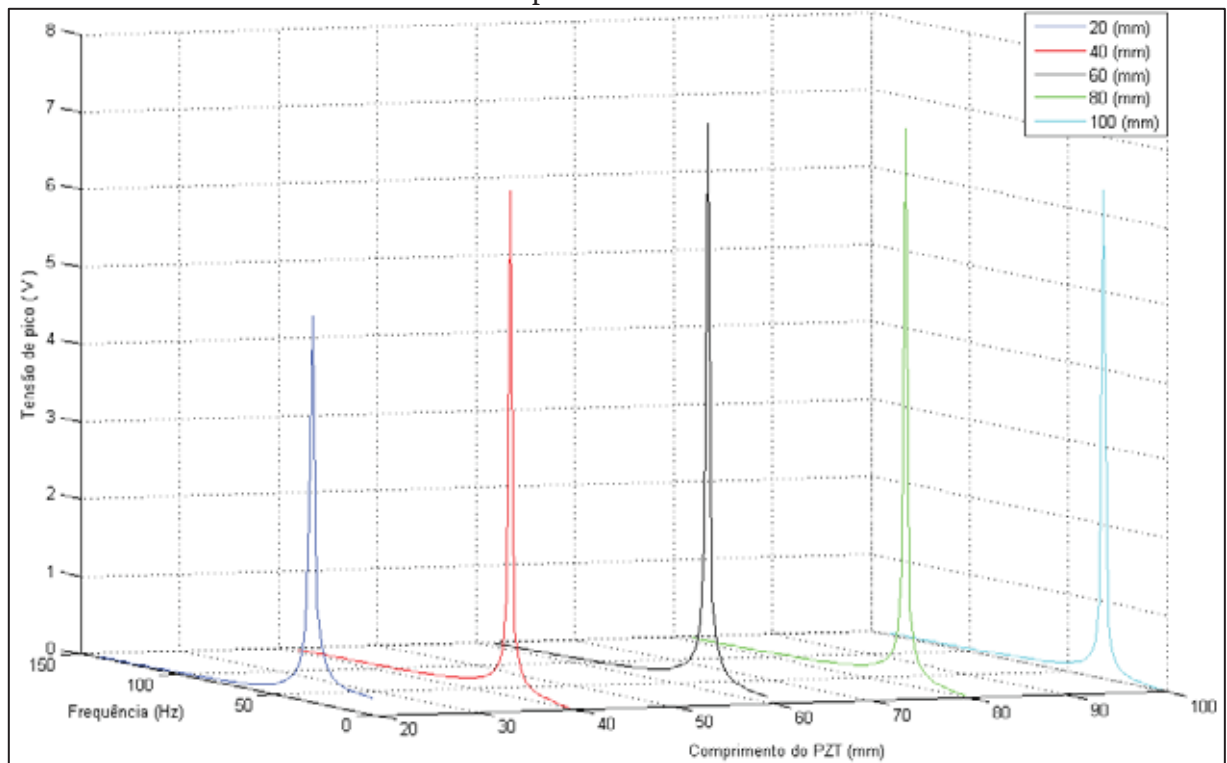
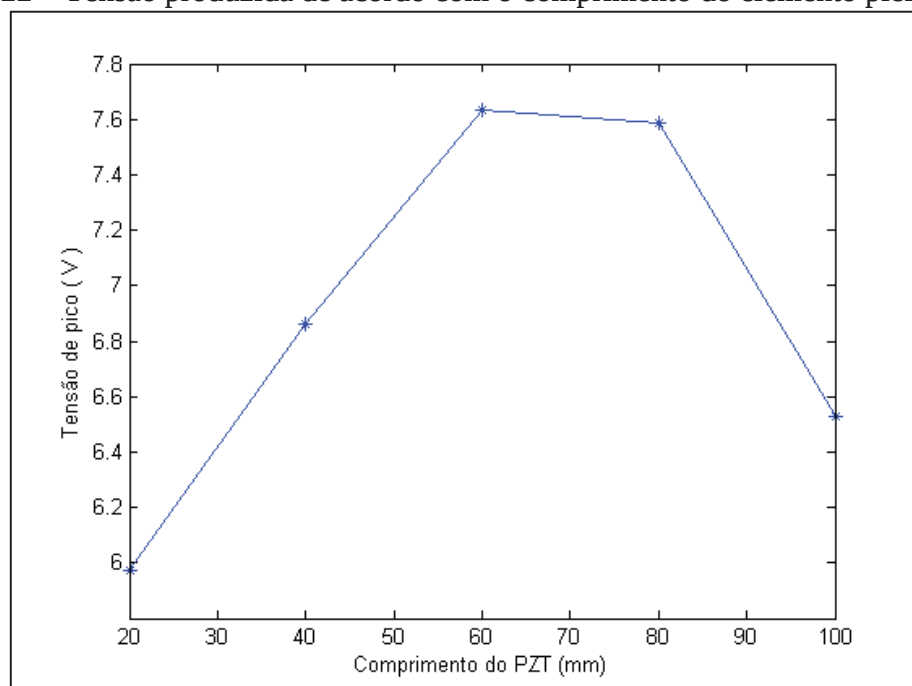


Figura 22 – Tensão produzida de acordo com o comprimento do elemento piezelétrico.

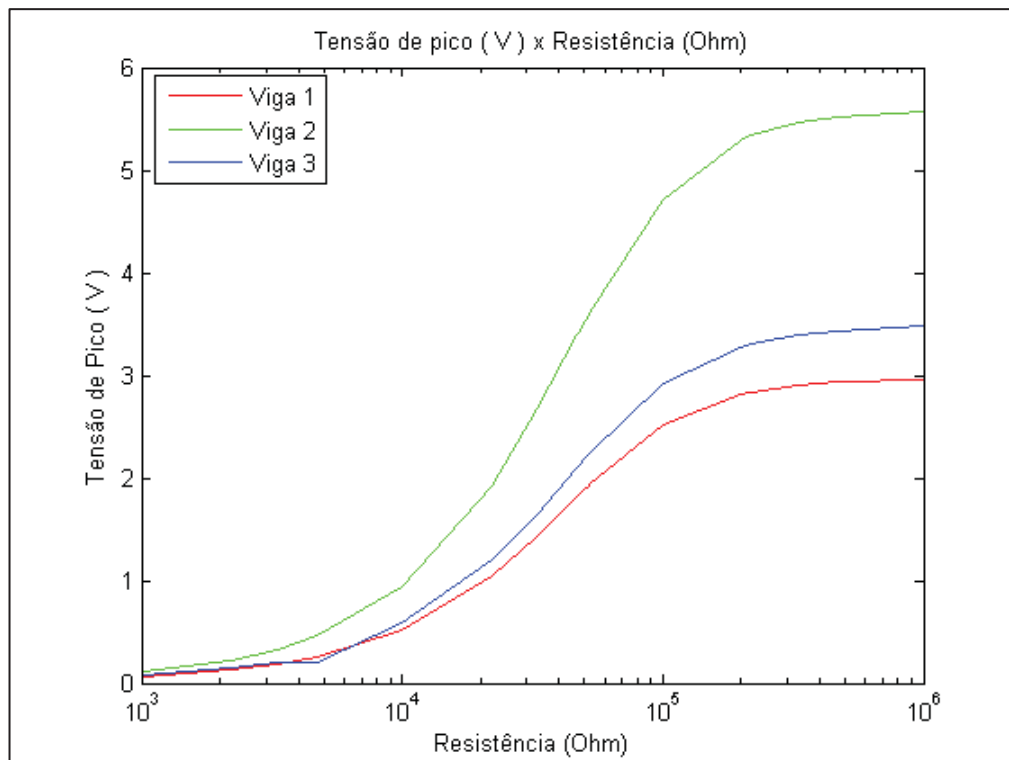


Baseando-se neste resultado, novas simulações foram realizadas onde adicionou-se uma resistência, que varia de $1K\Omega$ até $1M\Omega$ utilizando valores comerciais, para avaliar a potência máxima que cada piezo-viga pode produzir para os valores de comprimento do elemento piezelétrico de 20mm, previamente utilizado no primeiro modelo para validação, e 60mm, que apresentou maior tensão elétrica produzida nas simulações. O resultado pode ser observado nas Figuras 23, 24, 25 e 26, onde as duas primeiras apresentam a tensão de pico pela resistência e as demais apresentam a potência elétrica produzida em função da resistência para cada um dos comprimentos do PZT. As piezo-vigas foram excitadas com uma aceleração de 1g em sua base na frequência de 30Hz, que é a frequência de operação em que serão submetidas nos testes experimentais.

Para o cálculo da potência no elemento piezelétrico em função da resistência foi utilizada a Equação 33, abaixo:

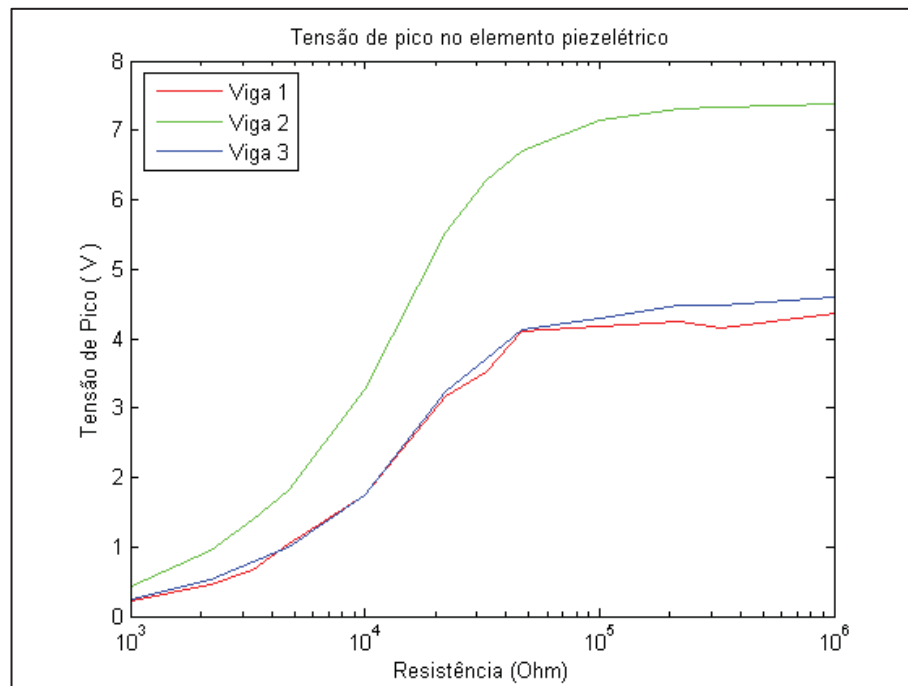
$$P_{PZT} = \frac{V_{PZT}^2}{R} \quad (33)$$

Figura 23 - Tensão produzida numericamente pelas vigas com o comprimento do PZT de 20mm.



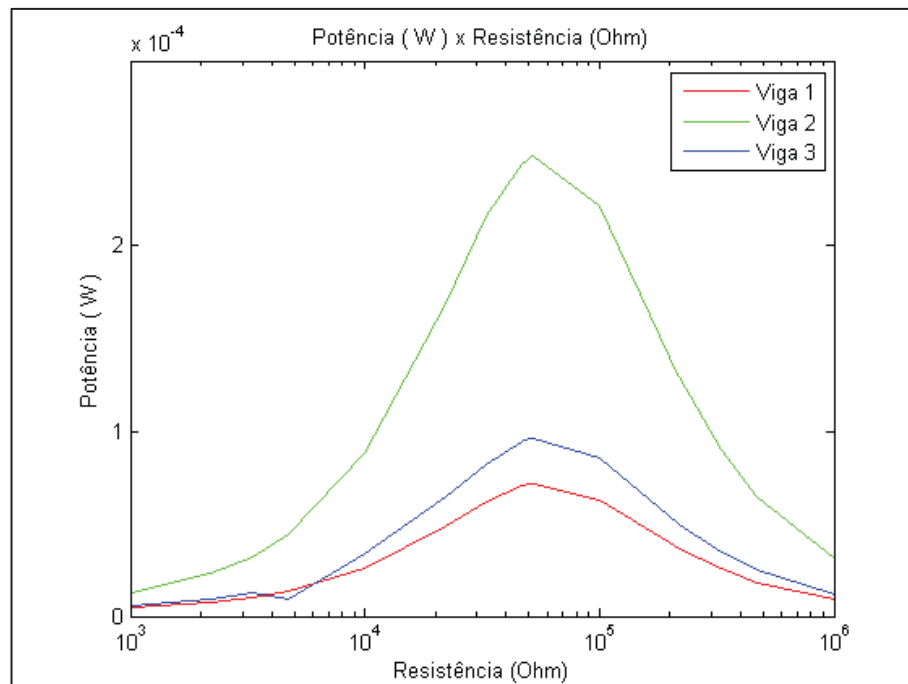
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 24 - Tensão produzida numericamente pelas vigas com o comprimento do PZT de 60mm.



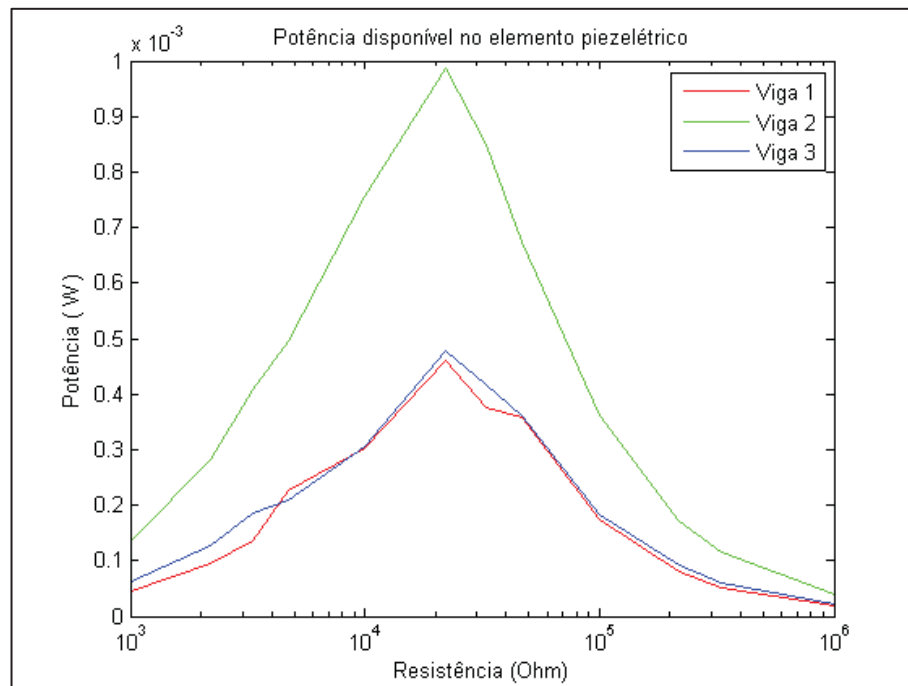
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 25 - Potência produzida numericamente pelas vigas com o comprimento do PZT de 20mm.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

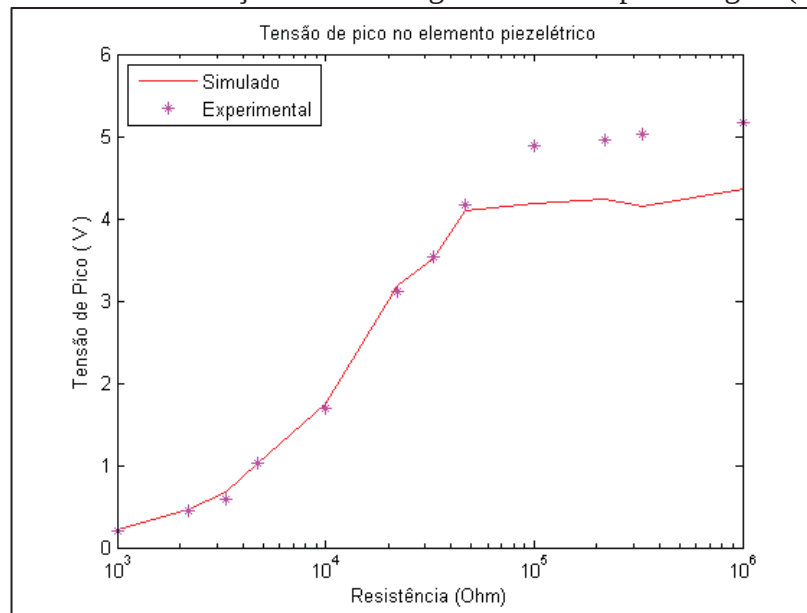
Figura 26 - Potência produzida numericamente pelas vigas com o comprimento do PZT de 60mm.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

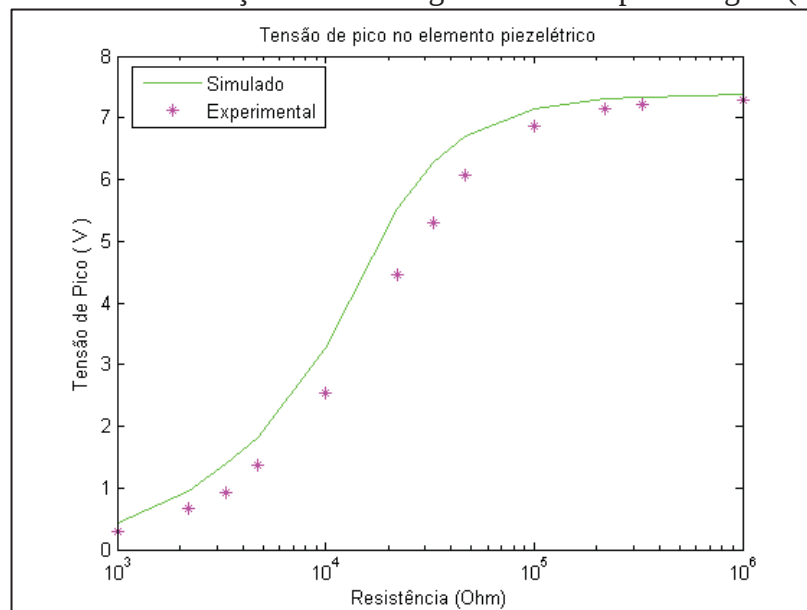
Após as simulações, os resultados foram comparados com os valores obtidos experimentalmente, conectando uma carga resistiva nos terminais de cada uma das piezo-vigas. Nas Figuras 27, 28, 29, 30, 31 e 32 abaixo estão os gráficos com os valores de tensão e potência produzidos experimentalmente por cada piezo-viga, respectivamente. Os valores encontrados são comparados com os valores obtidos através das simulações feitas anteriormente no software ANSYS®, considerando apenas a configuração com elemento piezelétrico de 60mm de comprimento.

Figura 27 - Tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 1 ($f_n = 32\text{Hz}$).



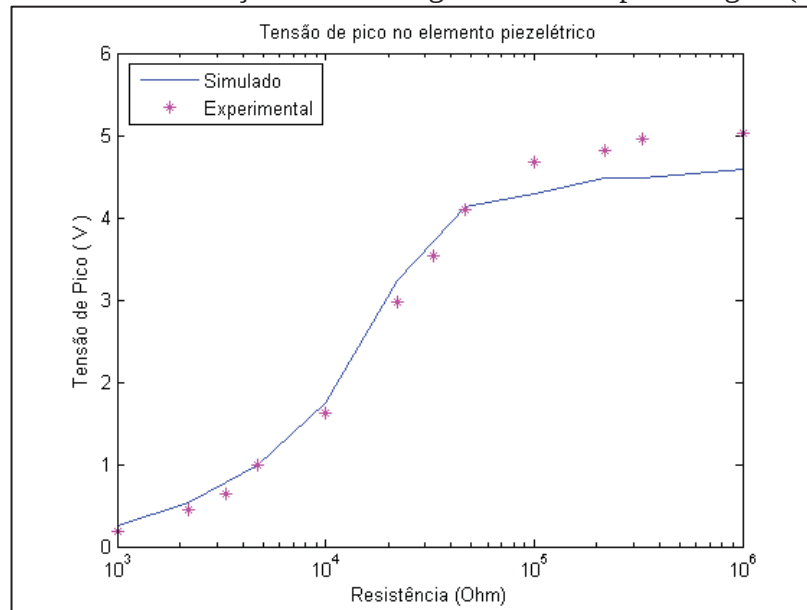
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 28 - Tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n = 30\text{Hz}$).



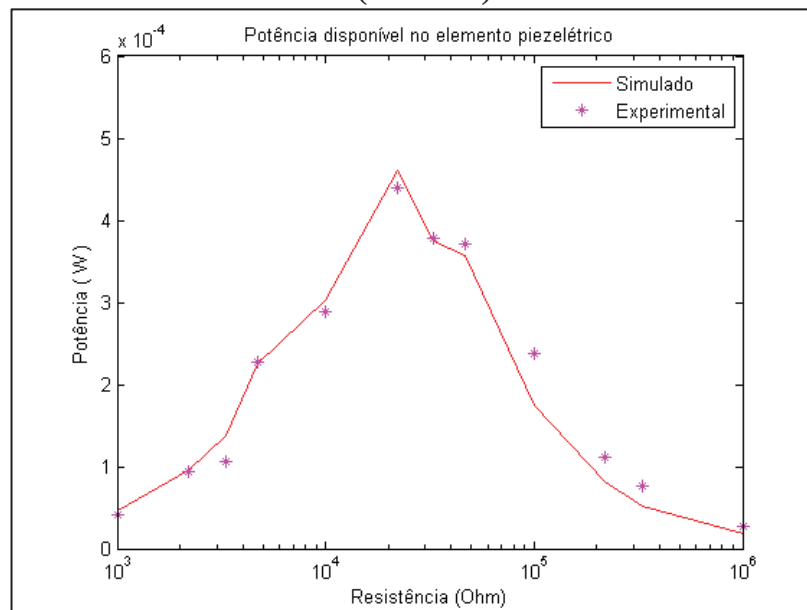
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 29 - Tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 3 ($f_n = 28\text{Hz}$).



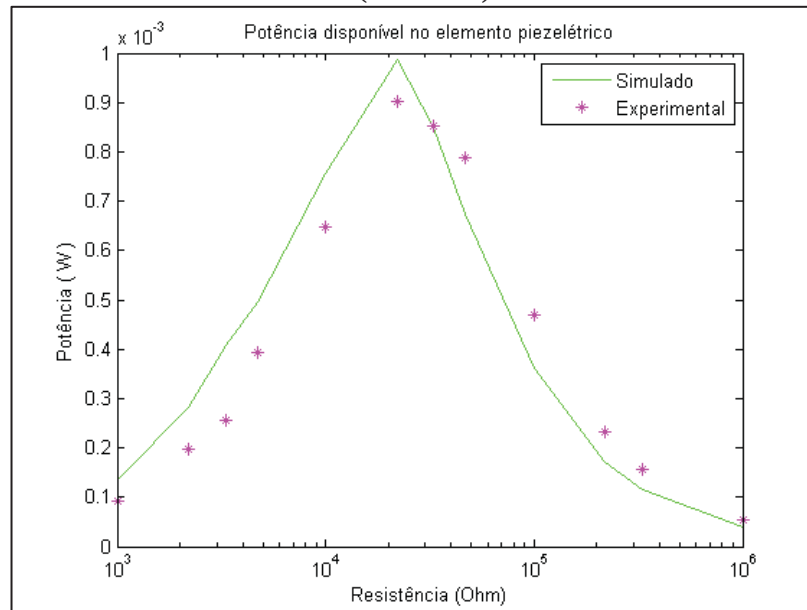
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 30 - Potência no elemento piezoelectrico em função de uma carga resistiva da piezo-viga 1 ($f_n = 32\text{Hz}$).



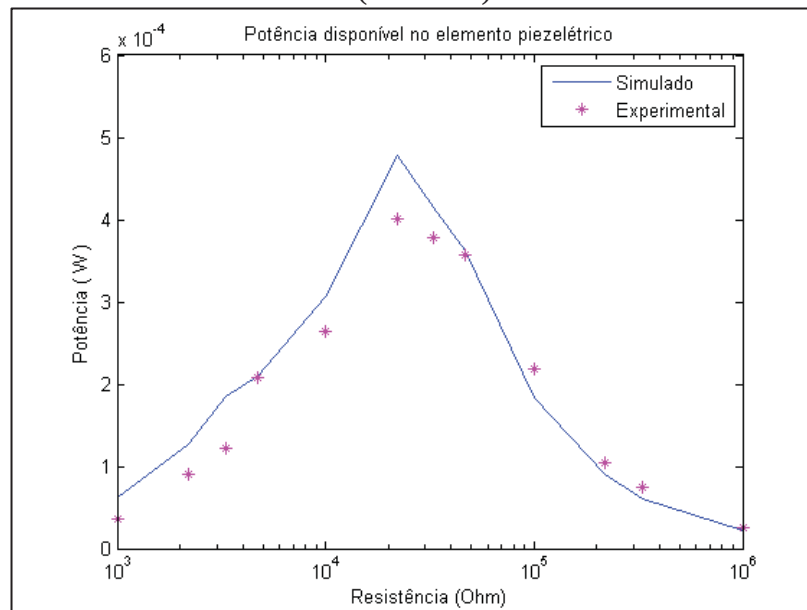
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 31 - Potência no elemento piezelétrico em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n=30\text{Hz}$).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 32 - Potência no elemento piezelétrico em função de uma carga resistiva da piezo-viga 3 ($f_n=28\text{Hz}$).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

É possível observar que os valores obtidos experimentalmente são próximos aos obtidos previamente nas simulações. A maior potência obtida no elemento piezelétrico de 60mm para cada viga foi $P_1 = 400\mu\text{W}$, $P_2 = 902\mu\text{W}$, $P_3 = 440\mu\text{W}$ para uma resistência de $22\text{k}\Omega$.

Com base nos resultados obtidos neste capítulo chegou-se à configuração final da piezoestrutura proposta apresentando uma potência bastante elevada e que se apresenta como uma possível solução para o problema encontrado com referência à perda que ocorre quando a frequência de excitação se distancia em aproximadamente $\pm 3\text{Hz}$ da frequência natural da piezo-viga para um elemento piezelétrico com comprimento de 20mm, e $\pm 2\text{Hz}$ para uma configuração utilizando elemento piezelétrico de comprimento igual a 60mm. Desta forma, para a configuração com o PZT de comprimento igual a 60mm, a piezoestrutura funciona da seguinte maneira: quando a excitação estiver na frequência de 30Hz, a piezo-viga engastada-livre central, cuja frequência natural também é de 30Hz, entra em ressonância e gera uma potência de $902\mu\text{W}$, quando conectada a uma carga resistiva de $22\text{K}\Omega$. Enquanto isso, as demais piezo-vigas, por possuírem frequências naturais próximas da frequência de excitação (28Hz e 32Hz), geram potências menores que a piezo-viga central com valores de $400\mu\text{W}$ e $440\mu\text{W}$, respectivamente, porém bastante elevadas. Com a utilização do elemento piezelétrico de comprimento igual a 60mm, as configurações geométricas de cada piezo-viga foram ajustadas para que as suas frequências naturais do primeiro modo estivessem dentro da faixa de 28Hz a 32Hz, conforme a Tabela 9.

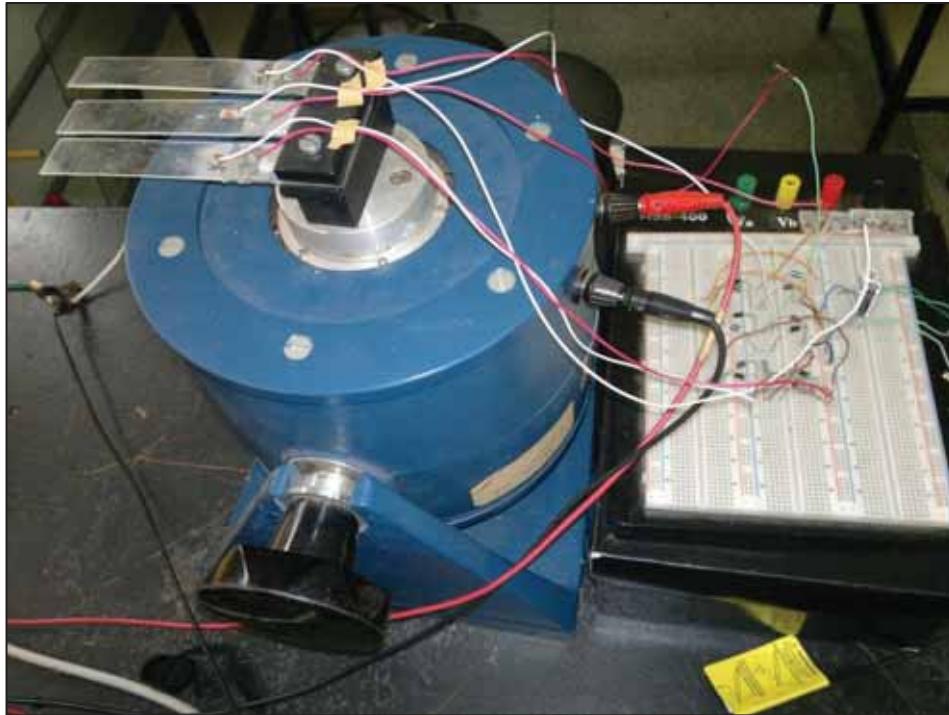
Tabela 9 – Configurações geométricas de cada piezo-viga.

Nº da Viga	$l_v(\text{mm})$	$w_v(\text{mm})$	$t_v(\text{mm})$	$l_p(\text{mm})$	$w_p(\text{mm})$	$t_p(\text{mm})$	$f_n(\text{Hz})$
1	110,5	20	1,1	60	20	0,191	32,473
2	114	20	1,1	60	20	0,191	30,603
3	118	20	1,1	60	20	0,191	28,608

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Na Figura 33 é apresentada a piezoestrutura multifrequência em sua configuração final.

Figura 33 - Configuração final da piezoestrutura multifrequência



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Uma das vantagens desta configuração da piezoestrutura é que caso ocorram pequenas variações na frequência de excitação, no caso de um motor industrial sofrer variação em sua rotação devido a oscilações na carga, por exemplo, ainda é possível se extrair um potencial elétrico elevado, o que não ocorreria em uma piezoestrutura de uma única viga engastada-livre.

CAPÍTULO 6

COMPARAÇÃO DO MODELO E ESTUDO PARAMÉTRICO DA PIEZOESTRUTURA MULTIFREQUÊNCIA

Neste capítulo é apresentada uma comparação entre o modelo simulado e os resultados experimentais. Além disso, é realizado um estudo paramétrico de modo a identificar qual a faixa de frequências que a piezoestrutura multifrequência deve operar.

Inicialmente o modelo proposto é comparado com os resultados experimentais utilizando as mesmas condições aplicadas nas simulações. A tensão elétrica obtida no modelo numérico de elementos finitos é comparada com os resultados experimentais visando encontrar uma boa correlação para que o modelo possa ser usado para estudar o comportamento e tendência de alguns parâmetros no processo de geração de potencial elétrico.

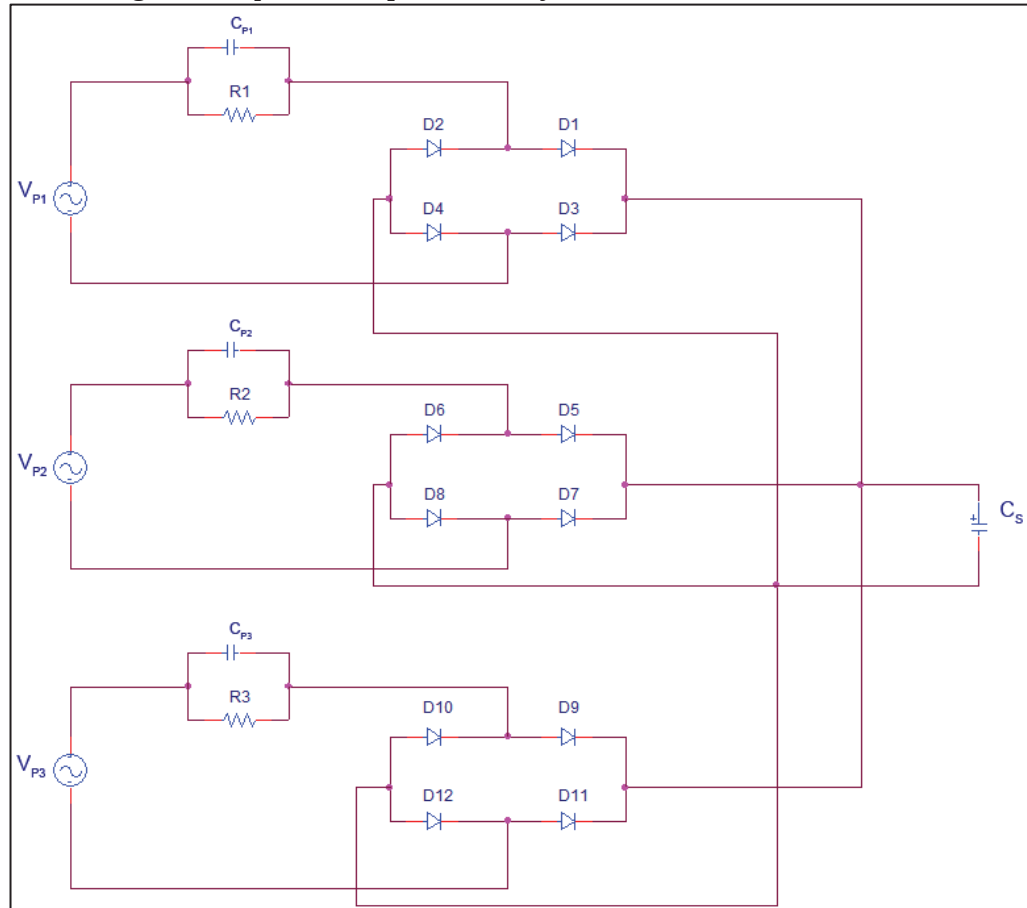
Posteriormente, foi realizado um estudo sobre quais variáveis (largura, comprimento e espessura da viga e comprimento do PZT) apresentam maior influência na variação da frequência natural das piezo-vigas para que elas estejam dentro da faixa de frequências desejada para uma piezoestrutura composta por três vigas do tipo engastada-livre.

6.1 CIRCUITO RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

Para melhor entendimento sobre a funcionalidade deste circuito na *extração e armazenamento de energia* foram realizadas simulações no software ORCAD CAPTURE CIS[®] considerando o elemento piezelétrico como uma fonte de tensão em série com uma resistência interna em paralelo com a capacitância interna. Foram consideradas as três piezo-vigas em funcionamento e com tensões com os valores iguais aos obtidos para as piezo-vigas de com elemento piezelétrico de 60mm de comprimento no Capítulo 4, onde a piezo-viga 1 possui tensão de 15,3V, a piezo-viga 2 possui tensão de 21,6V e a piezo-viga 3 possui tensão de 15,2V. Na Figura 34, é apresentado o diagrama esquemático da simulação do circuito. Na Figura 35 é possível observar o funcionamento do circuito dobrador de tensão quando as três piezo-vigas estão em funcionamento.

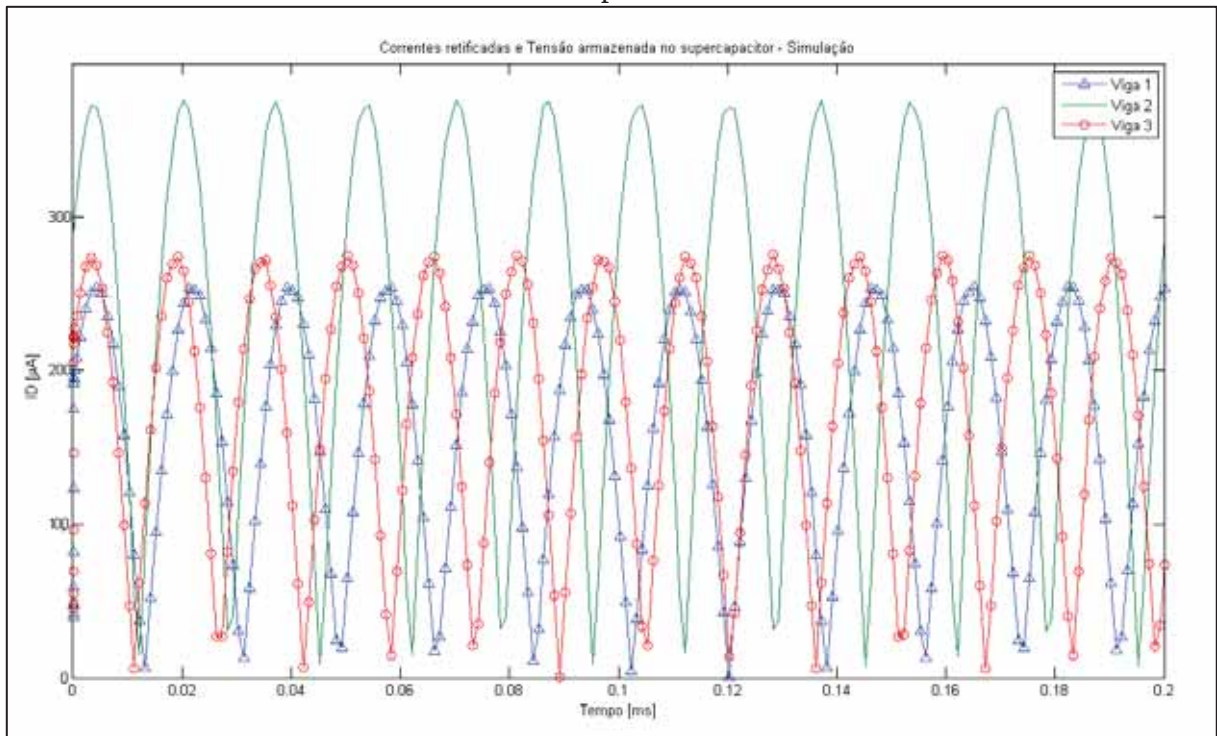
Para as simulações foram considerados $V_1 = 15,2\text{V}$, $V_2 = 21,6\text{V}$ e $V_3 = 15,2\text{V}$, as resistências internas do elemento piezelétrico $R_1 = R_2 = R_3 = 27,5\text{K}\Omega$, as capacitâncias internas do elemento piezelétrico $C_{P1} = C_{P2} = C_{P3} = 211\text{nF}$. Os diodos utilizados foram 1N5817, considerando as suas quedas de tensão como sendo $V_D = 0,75\text{V}$. O capacitor de armazenamento, C_S , foi simulado com o valor de $1,5\text{F}$.

Figura 34 - Diagrama esquemático para simulação do circuito retificador de onda completa.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 35 - Correntes da piezoestrutura multifrequência para o circuito retificador de onda completa.



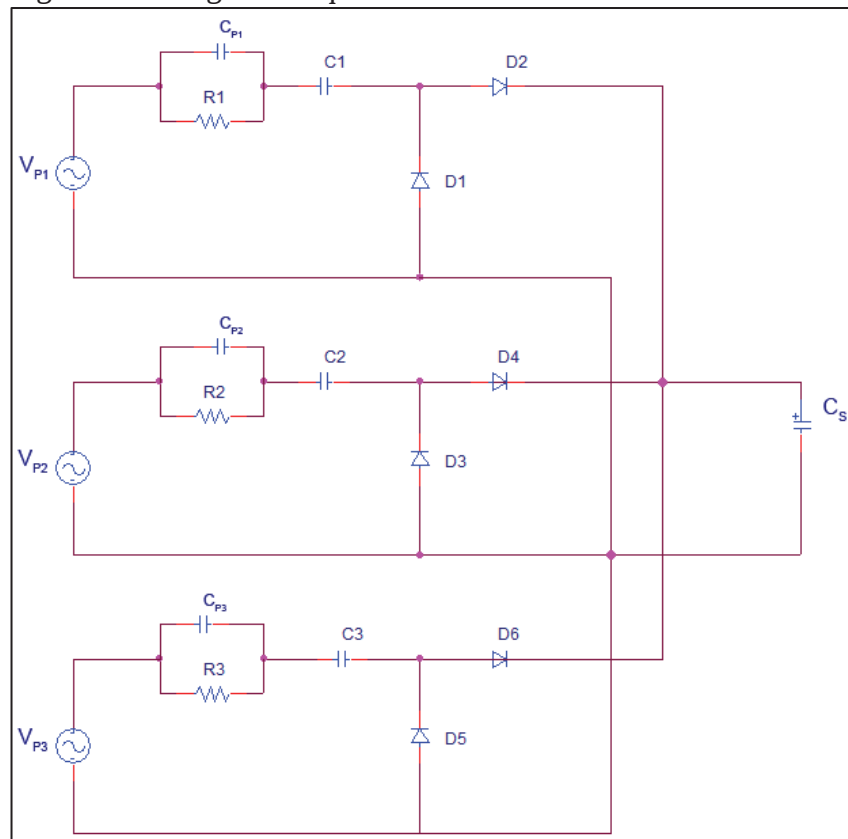
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

6.2 CIRCUITO DOBRADOR DE TENSÃO

Para melhor entendimento sobre a funcionalidade deste circuito na *extração e armazenamento de energia* foram realizadas simulações no software ORCAD CAPTURE CIS[®] considerando o elemento piezelétrico como uma fonte de tensão em série com uma resistência interna em paralelo com a capacitância interna. Foram consideradas as três piezo-vigas em funcionamento e com tensões com os valores iguais aos obtidos no Capítulo 4 para o elemento piezelétrico com comprimento de 60mm, onde a piezo-viga 1 possui tensão de 15,3V, a piezo-viga 2 possui tensão de 21,6V e a piezo-viga 3 possui tensão de 15,2V. Na Figura 36 é apresentado o diagrama esquemático do circuito dobrador de tensão utilizado nas simulações. Na Figura 37, é possível observar o funcionamento do circuito dobrador de tensão quando as três piezo-vigas estão em funcionamento.

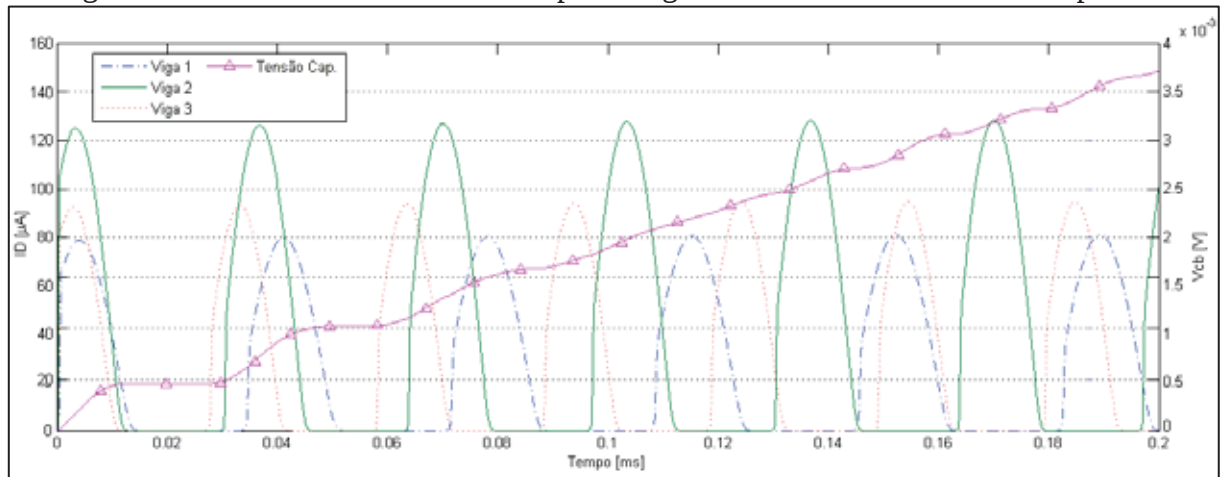
Para as simulações foram considerados $V_{P1} = 15,2V$, $V_{P2} = 21,6V$ e $V_{P3} = 15,2V$, as resistências internas do elemento piezelétrico $R1 = R2 = R3 = 27,5K\Omega$, as capacitâncias internas do elemento piezelétrico $C_{P1} = C_{P2} = C_{P3} = 211nF$. Os capacitores $C1 = C2 = C3 = 1\mu F$. Os diodos utilizados foram 1N4148, considerando as suas quedas de tensão como sendo $V_D = 0,5V$. O capacitor de armazenamento, C_s , foi simulado com o valor de 1,5F.

Figura 36 - Diagrama esquemático do circuito dobrador de tensão.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 37 - Correntes de cada uma das piezo-vigas e a tensão armazenada no capacitor



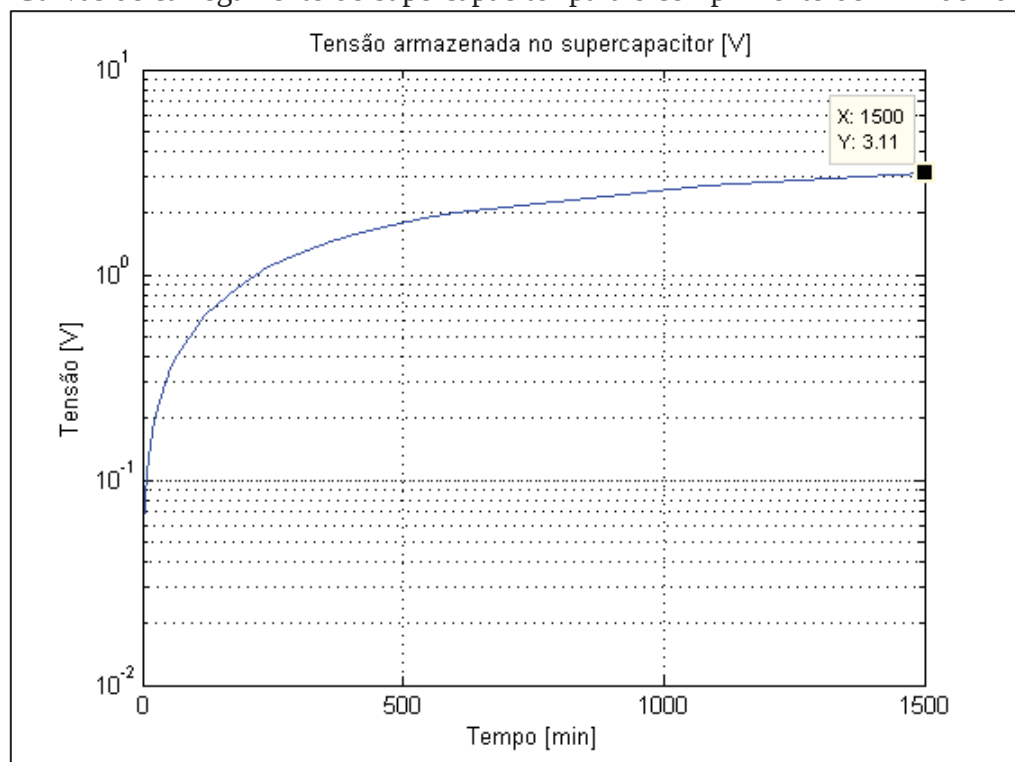
Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Observa-se que a corrente que alimenta o capacitor, que é a somatória das correntes de cada piezo-viga, apresenta maior valor quando as correntes retificadas coincidem, aumentando a tensão armazenada no capacitor, e no instante logo após as correntes coincidirem, ou seja, o máximo de corrente ser alcançado, ocorre um intervalo sem corrente alimentando o capacitor, deixando a tensão armazenada no mesmo valor.

6.3 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

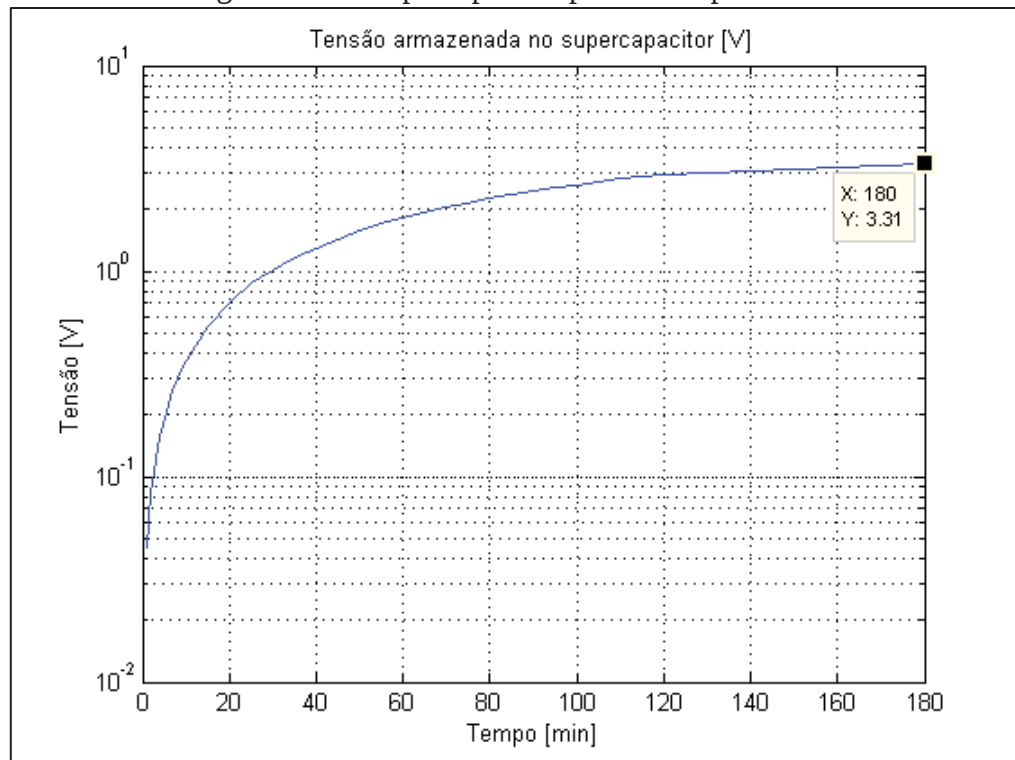
A energia extraída da piezoestrutura é armazenada em um supercapacitor para uso posterior na alimentação de um sistema de monitoramento através de sensores. Para avaliar o comportamento das piezoestruturas utilizando elementos piezelétricos com comprimentos de 20mm e 60mm foram realizados testes experimentais onde um supercapacitor NESSCAP 1,5F/5V foi carregado utilizando as piezoestruturas com PZT de 20mm e 60mm de comprimento, sendo excitadas com a mesma aceleração de 1g em sua base e com as mesmas condições de contorno, para levantar a curva de carregamento e o tempo necessário para armazenar o máximo de energia possível por cada uma das configurações. Para os testes foram utilizados o circuito retificador de onda completa, pois possui uma corrente retificada maior que a do circuito dobrador de tensão, carregando o supercapacitor em um intervalo de tempo menor.

Figura 38 - Curvas de carregamento do supercapacitor para o comprimento do PZT de 20mm.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 39 - Curvas de carregamento do supercapacitor para o comprimento do PZT de 60mm.

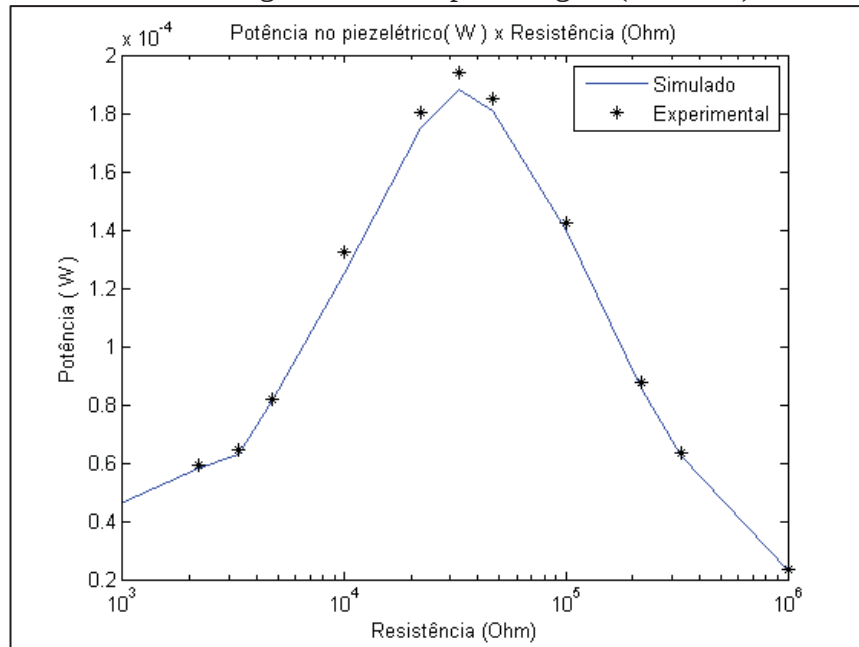


Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Observa-se nas Figuras 38 e 39, acima, que a diferença no tempo de carregamento do supercapacitor entre as duas configurações de piezoestrutura (PZT com 20mm de comprimento e PZT com 60mm de comprimento) é bastante elevada. Isso ocorre devido ao fato de que o total de corrente que alimenta o supercapacitor para o PZT de 60mm é muito maior, que é em torno de $600\mu\text{A}$, que a do PZT de 20mm, que é aproximadamente $180\mu\text{A}$.

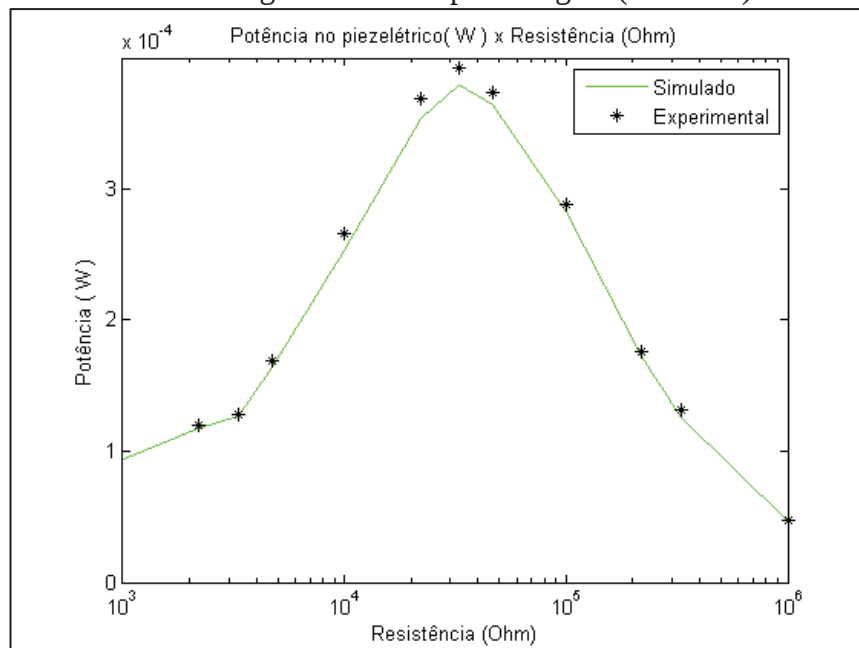
Para avaliação dos resultados, um fator que é de suma importância, é o valor da potência extraída por cada um dos circuitos extratores. Conforme pode ser observado nas Figuras 40 até 47 os valores de tensão e potência para cada uma das vigas utilizando as duas topologias de circuito em função de uma carga resistiva conectada em paralelo com o sistema de armazenamento simulando um circuito sendo alimentado pela energia armazenada no capacitor C_S . As vigas 1 e 3 possuem potência e tensão elétrica semelhantes, e por isso, nas Figuras 40, 42, 44 e 46, são apresentados os resultados da viga 3 porém pode ser entendido da mesma maneira para a viga 1 já que para a excitação com frequência de 30 Hz o comportamento de ambas é bastante parecido.

Figura 40 - Potência disponível no elemento piezelétrico para retificador em ponte em função de uma carga resistiva da piezo-viga 3 ($f_n=28\text{Hz}$).



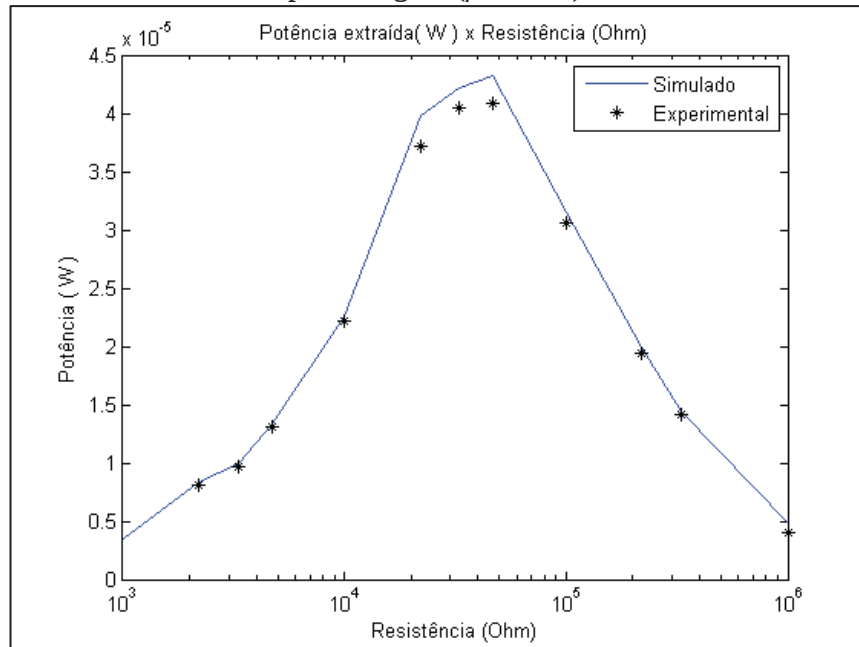
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 41 - Potência disponível no elemento piezelétrico para retificador em ponte em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n=30\text{Hz}$).



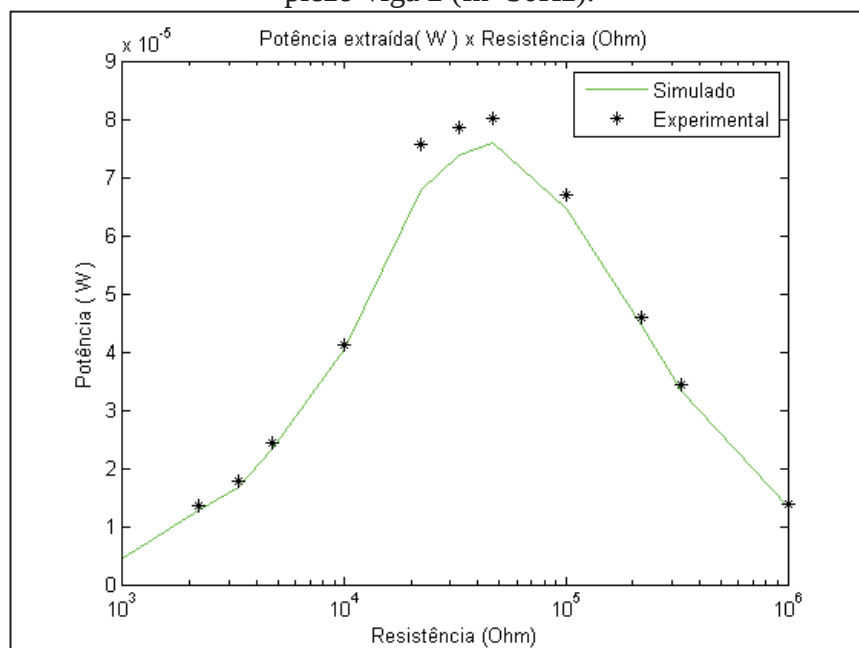
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 42 - Potência extraída pelo retificador em ponte em função de uma carga resistiva da piezo-viga 3 ($f_n=28\text{Hz}$).



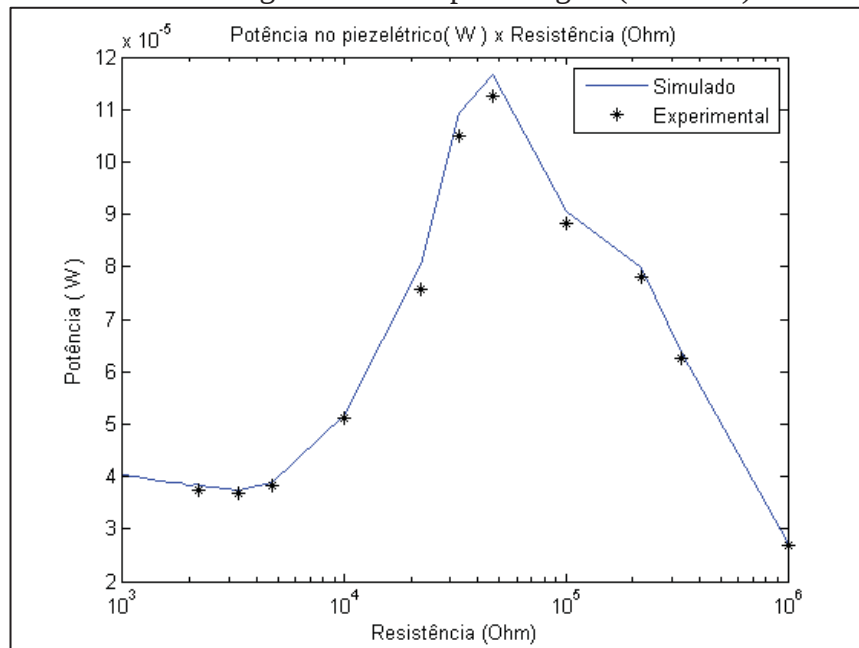
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 43 - Potência extraída pelo retificador em ponte em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n=30\text{Hz}$).



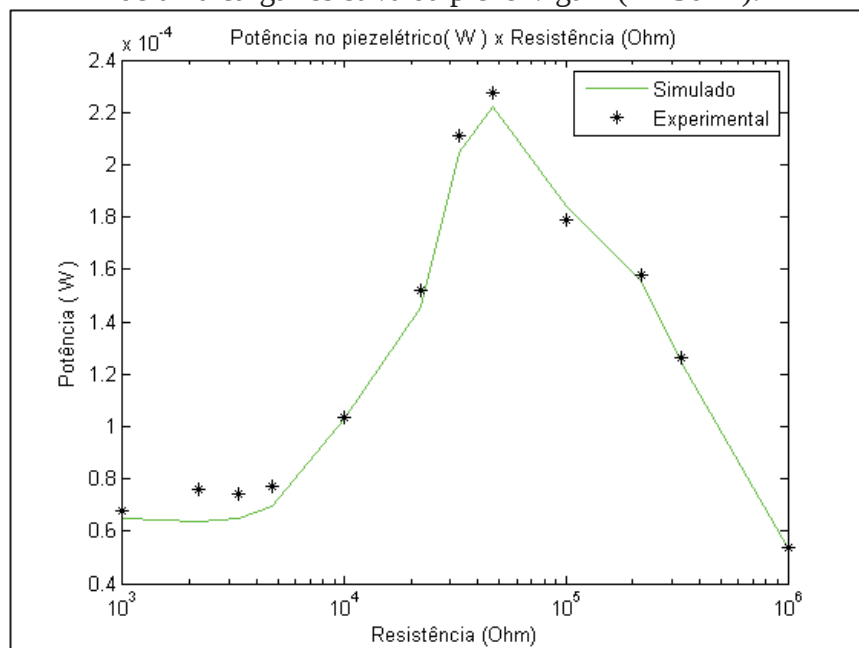
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 44 - Potência disponível no elemento piezelétrico para dobrador de tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 3 ($f_n=28\text{Hz}$).



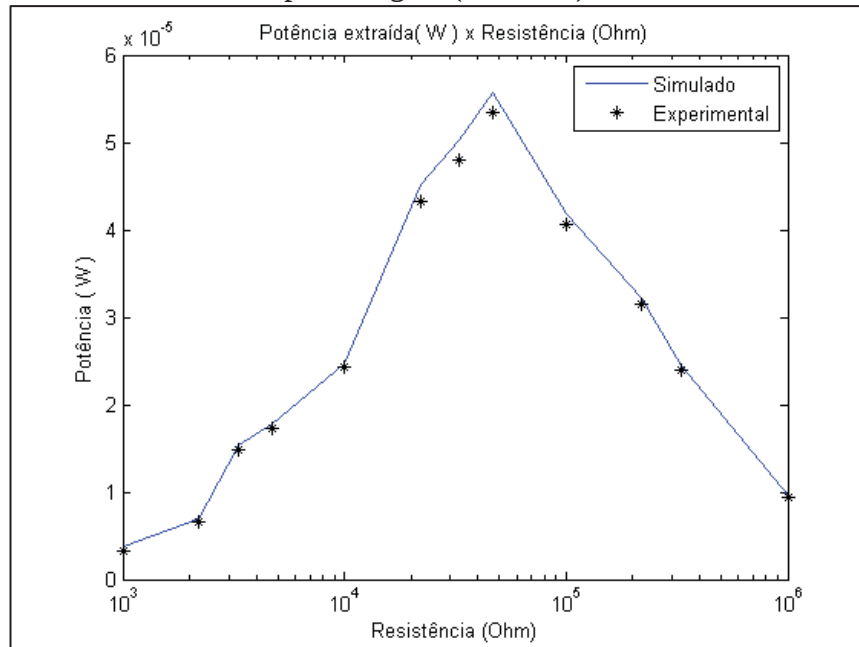
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 45 - Potência disponível no elemento piezelétrico para dobrador de tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n=30\text{Hz}$).



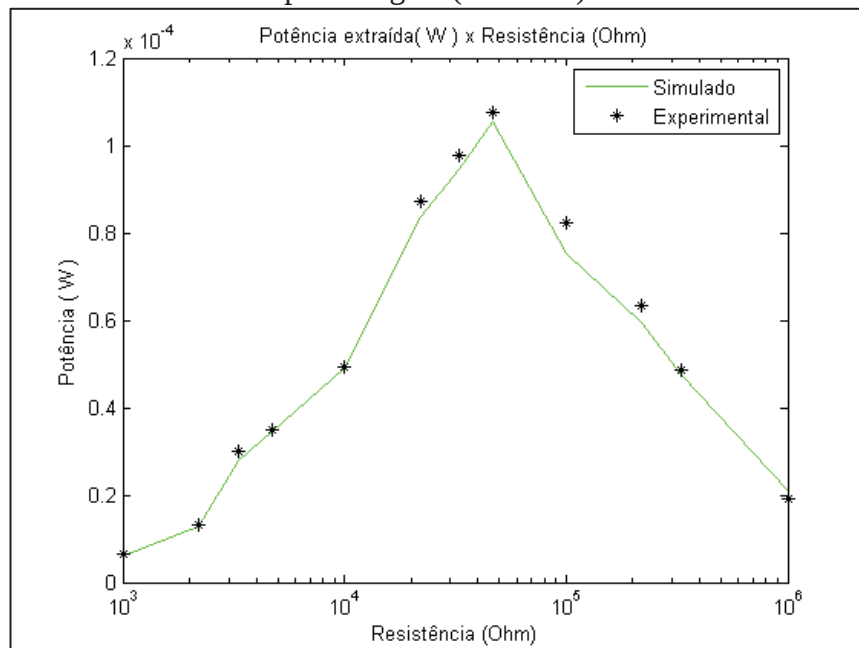
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 46 - Potência extraída pelo dobrador de tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 1 ($f_n=32\text{Hz}$).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Figura 47 - Potência extraída pelo dobrador de tensão em função de uma carga resistiva da piezo-viga 2 ($f_n=30\text{Hz}$).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Observa-se a partir das figuras acima que para a configuração de dobrador de tensão obtém-se uma potência ($107,6\mu\text{W}$) de aproximadamente 30% maior que a extraída através do circuito retificador em ponte ($80\mu\text{W}$) para a viga 2 que está sendo excitada em sua frequência de ressonância, conforme era esperado a partir dos resultados teóricos anteriores.

Outro experimento foi realizado de modo a avaliar o comportamento da piezoestrutura multifrequência sob a influência da variação da frequência de excitação, onde a piezoestrutura foi excitada em cada uma das frequências naturais (28Hz, 30Hz e 32Hz) das piezo-vigas presentes na piezoestrutura, e a tensão produzida por elas foi armazenada em um supercapacitor de 1,5F/5V durante um intervalo de 5 minutos. Dessa forma é possível verificar qual piezo-viga oferece maior contribuição no armazenamento de energia. Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 10 – Tensões produzidas por cada piezo-viga em cada uma das frequências.

	$f_1 = 28\text{Hz}$	$f_2 = 30\text{Hz}$	$f_3 = 32\text{ Hz}$	$f_4 = 28\text{-}32\text{Hz}$
Tensão no Supercapacitor	42mV	38,5mV	35mV	33mV

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Inicialmente a piezoestrutura multifrequência foi excitada com uma aceleração de 1g ($9,8\text{ m/s}^2$) em uma frequência de 32Hz e no intervalo de cinco minutos foi possível armazenar 35mV no supercapacitor, em um segundo momento a mesma piezoestrutura foi excitada com uma aceleração de mesma amplitude porém com frequência de 30Hz, armazenando, ao final de cinco minutos, uma tensão de 38,5mV no supercapacitor. Finalmente, a piezoestrutura foi excitada com as mesmas condições anteriores, porém, com uma frequência de 28Hz e, ao final de cinco minutos, armazenou uma tensão de 42mV no supercapacitor. Percebe-se que quando excitada na menor frequência natural (28Hz) das piezo-vigas, a piezoestrutura é capaz de armazenar maior quantidade de energia em um mesmo intervalo de tempo. Isso ocorre, devido ao fato de a piezoestrutura de menor frequência natural entre as três possuir maior amplitude de vibração, já que esta piezo-viga possui maior comprimento. O comprimento tem influência direta no valor da rigidez do sistema, e esta por sua vez, interfere diretamente na amplitude de vibração, pois quanto maior o comprimento, menor a rigidez da piezoestrutura, e quanto menor a rigidez, maior a amplitude de vibração. Como em sistemas vibratórios quanto maior a vibração, maiores são as deformações, em sistemas de *extração e armazenamento de*

energia utilizando elementos piezelétricos, quanto maior for a deformação, consequentemente maior será a tensão produzida.

Adicionalmente, outro teste foi realizado onde a piezoestrutura multifrequência foi excitada através de sua base por uma aceleração de 1g, porém a frequência da excitação foi variada, aleatoriamente, entre 28Hz e 32Hz durante o mesmo intervalo de tempo. Neste intervalo de tempo foi armazenado 33mV no supercapacitor, um valor inferior aos outros valores armazenados quando a piezoestrutura foi excitada, com uma frequência constante, na frequência de ressonância de cada piezo-viga.

CAPÍTULO 7

SISTEMA AUTÔNOMO

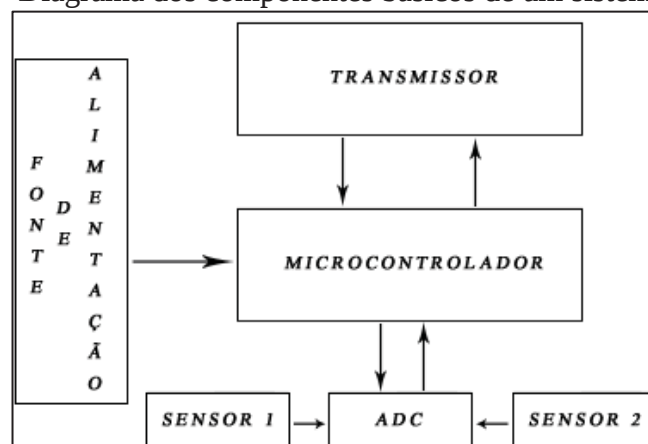
Nos capítulos anteriores foram estudados meios de produzir o máximo de energia possível através das deformações causadas em um elemento piezelétrico devido às vibrações mecânicas, bem como formas de se extrair esta energia e armazená-la para que seja utilizada na alimentação do sistema de sensores, tornando-o, assim, um sistema autônomo.

Neste capítulo é apresentado o conceito do sistema autônomo e suas características. Também é realizado um estudo sobre a possibilidade alimentação de um sistema autônomo através da energia produzida pela piezoestrutura proposta. O programa utilizado no microcontrolador foi desenvolvido por Souza (2011).

7.1 SISTEMAS AUTOALIMENTADOS

O conceito de sistemas autônomos, também chamados de sistemas autoalimentados, consiste de um sistema de sensor(es) que recebe(m) e transmite(m) informações de um sensor monitorando algumas variáveis (temperatura, pressão, vibração, entre outras) sendo alimentado por uma fonte, geralmente uma bateria ou um capacitor. Na Figura 48, abaixo, pode-se observar o diagrama básico dos componentes de um sistema autônomo.

Figura 48 - Diagrama dos componentes básicos de um sistema autônomo



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Devido aos problemas ambientais causados pelo descarte das baterias e também da localização dos sensores, muitas vezes de difícil acesso, a alimentação destes sistemas de sensores através da energia produzida pelas técnicas de *extração e armazenamento de energia* (*energy harvesting*) tem se mostrado uma solução bastante viável. Assim, os sistemas de sensores são capazes de “renovar” sua energia a partir de energia das vibrações ou energia eletromagnética.

Considerando a energia armazenada no supercapacitor através da transformação da energia das vibrações em energia elétrica, foi desenvolvido um sistema de monitoramento de temperatura que pudesse realizar o monitoramento da temperatura de um ambiente utilizando esta energia armazenada. O desenvolvimento apresentado neste capítulo pode ser aplicado em qualquer projeto de sensores autoalimentados.

Atualmente, muitos trabalhos já foram desenvolvidos sobre sensores autoalimentados (BENGHANEM, 2010; FERRARI et al., 2009) e muitos outros estão em progresso nesta área que cresce continua e rapidamente. Neste trabalho é apresentado um protótipo inicial onde as informações são armazenadas no microcontrolador e, após, são transmitidos para o computador via comunicação serial. Apesar de o sistema ser simples, alguns passos e informações são necessários para o seu desenvolvimento, como segue:

- Determinar um microcontrolador de baixo consumo;
- Determinar como os dados são armazenados;
- Determinar o intervalo de tempo com que os dados são coletados.

Neste trabalho, o sistema autônomo desenvolvido monitora a variação da temperatura em um ambiente ao longo do tempo.

7.2 DETERMINAÇÃO DE UM MICROCONTROLADOR DE BAIXO CONSUMO

Quando se pensa em determinar um microcontrolador é necessário comparar diversas características de modelos diferentes. O principal aspecto a ser considerado para aplicação de sensores autoalimentados é que o microcontrolador tenha o menor consumo de energia possível. O maior consumo de energia do microcontrolador é quando ele está no estado ativo. Entretanto, a corrente de “*espera*” também é importante, já que mesmo em modo de baixo consumo o microcontrolador irá drenar energia do sistema de alimentação. Assim, como a

energia não pode ser desperdiçada na operação do microcontrolador, deseja-se que este possua um tempo para que saia do modo de baixo consumo para o modo normal bastante curto, bem como baixa corrente de fuga para conservar a energia. Para evidenciar as características e ajudar na escolha de qual microcontrolador melhor se aplica neste projeto, a Tabela 11 abaixo apresenta alguns dos microcontroladores disponíveis no mercado com características semelhantes.

Tabela 11 – Características de alimentação dos microcontroladores.

Modelo	Corrente Ativa	Corrente de Espera	Despertar	Leakage
Atmega 169	27uA @32kHz	0.2uA	10us	1uA
EM6617	9uA @32kHz	0.6uA standby 0.2uA sleep	ND	ND
MSP430F1122	14uA @32kHz	0.7uA a 0.1uA	6us	50nA
MC9S08G	812uA @1MHz	4.3uA a 25nA	2.4us	25nA
PIC24F16KA101	195uA @1MHz	20nA	1us	50nA
XE88LC01A	10uA @32kHz	1uA hibernating 0.1uA sleep	ND	ND

*ND = Não Disponível no datasheet ou não constante neste modelo.

Para um sensor autoalimentado, o microcontrolador deve possuir um conversor ADC para fazer interface com o sensor, uma saída serial e memória suficiente para armazenar a programação e os dados coletados através do sensor. De modo a comparar de forma completa os microcontroladores, são listados na Tabela 12 outras características pertinentes dos microcontroladores.

Tabela 12 – Características adicionais dos microcontroladores

Modelo	Oscilador	ROM	RAM	EEPROM	ADC	UART	I/O	FLASH
Atmega 169	32kHz	ND	1kB	512Bytes	8 ch 10bit	Serial	53	16kB
EM6617	32kHz	6kB	64x4bit	64x8bit	2ch 8bit	ND	4	ND
MSP430F1122	8MHz	ND	256B	ND	8ch 12bit	2USART	48	4kB
MC9S08G	1MHz	ND	1-4kB	ND	8ch 10bit	ND	34-56	16-60kB
PIC24F16KA101	8MHz	ND	1.5kB	512Bytes	9ch 10bit	2 UART	18	16kB
XE88LC01A	32kHz	22kB	8 bytes	ND	16+10 bit	Serial	24	ND

*ND = Não disponível no datasheet ou não constante neste modelo.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Em termos das características listadas na Tabela 12, todos os microcontroladores possuem as características necessárias para a aplicação desejada. Considerando as características com relação ao consumo da Tabela 11, os microcontroladores MSP430, PIC24F16KA101, EM6617 e XE88LC01A se mostram como favoritos quando se considera a corrente ativa (em torno de 10 μ A). Porém, os modelos EM6617 e XE88LC01A não possuem em seus manuais os valores de corrente de fuga nas portas e nem o tempo de “despertar”. Dessa forma, o PIC24F16KA101, em um modo geral, apresenta grandes vantagens (tensão de operação: 1.8 a 3.6V, funcionamento do RTCC – Real Timer Clock & Calendar – enquanto em modo de baixo consumo) e pela facilidade de encontrar suporte, foi o escolhido.

7.3 FORMA DE ARMAZENAMENTO E INTERVALO DE AQUISIÇÃO

Neste tópico é discutida a forma como os dados são coletados e armazenados no microcontrolador para serem transferidos posteriormente e analisados.

Considerando a variável que será medida pelo sensor autoalimentado, alguns itens devem ser analisados:

- Informação que será coletada;
- Intervalo de tempo entre cada medição.

A informação que será coletada deve conter dados que auxiliem na identificação da variável de interesse. No caso deste trabalho, deseja-se monitorar a condição térmica de um ambiente ao longo de um período, portanto, a variável de interesse é a temperatura e deve ser medida ao longo do período desejado. Desta forma, se considerado um período de 24 horas, é necessário que as informações coletadas sejam armazenadas considerando a data, hora e o valor da temperatura no ambiente naquele instante. Também devem ser consideradas outras informações como se o ambiente possuir um ar condicionado em quais períodos ele permaneceu ligado ou desligado, assim é possível analisar corretamente o valor medido.

O intervalo de tempo entre cada aquisição é vital, pois um intervalo de tempo muito curto pode acarretar um gasto excessivo da energia armazenada no supercapacitor e um intervalo de tempo muito grande entre as aquisições pode resultar em informações incompletas. A temperatura em uma sala não sofre grandes variações instantaneamente, não sendo necessário fazer a sua aquisição segundo a segundo ou minuto a minuto. Porém, se o intervalo de tempo de aquisição for muito grande, os valores medidos e armazenados podem apresentar uma tendência de variação ao longo do dia que não é real. Portanto, o intervalo entre as aquisições é essencial.

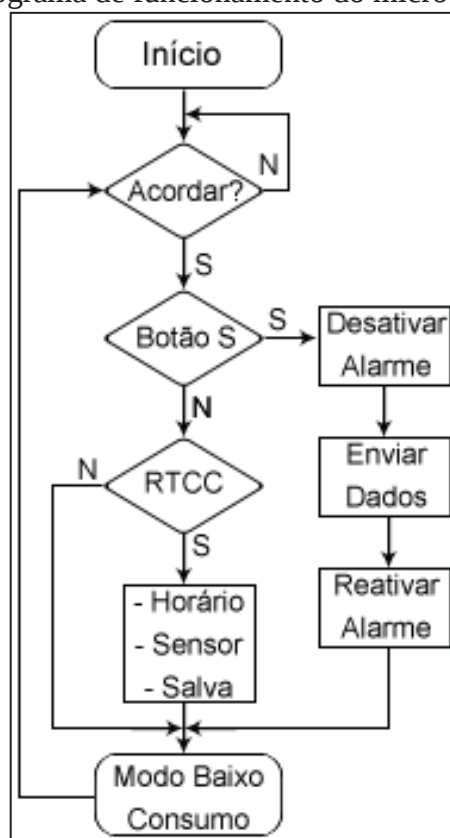
De posse destas informações o sensor autoalimentado foi projetado utilizando um microcontrolador PIC24F16KA101 da Microchip, ficando em modo de baixo consumo durante 10 minutos para economia de energia, apenas com as funcionalidades RTCC, DSWT (Contador Ativo em Baixo Consumo), e a cada 10 minutos o alarme do RTCC dispara fazendo com que o microcontrolador fique ativo, coletando uma amostra da temperatura do ambiente e armazenando o valor juntamente com a data e hora em que a amostra foi coletada em um endereço da memória EEPROM.

A transmissão dos dados armazenados é realizada através de comunicação serial utilizando um cabo USB com o emulador MCP2200 da Microchip. Conforme Figura 49, ao se pressionar o botão S do circuito transmissor, acionando o interruptor INT0, fazendo com que o microcontrolador “ *acorde* ”, desativando o alarme RTCC e alterando a frequência de clock para 8MHz FRC (Fast RC Oscillator) para que os dados sejam transmitidos sem erros. O microcontrolador é alimentado, neste momento, pelo computador através do cabo USB.

Quando o microcontrolador está em funcionamento o fluxograma presente na Figura 49 apresenta o seguinte: no início do funcionamento é realizada uma verificação se o microcontrolador está em estado de baixo consumo ou não, caso não esteja ele entra em

estado de baixo consumo, caso o microcontrolador esteja em estado de baixo consumo, ele é “acordado” e outra verificação é realizada para garantir que o microcontrolador não está transmitindo dados. Como o microcontrolador não está transmitindo dados, o programa faz uma verificação se o tempo programado no alarme foi atingido, caso tenha sido atingido então o microcontrolador habilita o sensor e armazena na memória EEPROM o horário em que foi realizada a medida e o valor medido. Após realizado este procedimento, o microcontrolador entra em estado de baixo consumo novamente e a rotina se repete até que o microcontrolador seja retirado de uso para a transmissão dos dados armazenados para um computador através de uma porta USB.

Figura 49 - Fluxograma de funcionamento do microcontrolador



Fonte: Adaptado de Souza (2011).

A escolha do sensor a ser utilizado também é de suma importância no desenvolvimento de um sensor autoalimentado, pois o sensor deve operar consumindo baixa potência também. Os sensores comerciais mais empregados são o LM35 da Texas Instruments[®] e o MCP9700 da Microchip[®], as características de funcionamento de ambos são apresentadas na Tabela 13.

A piezoestrutura multifrequência gera energia que é extraída através de um circuito de extração de potência armazenando em um supercapacitor que, por sua vez, fornece energia para o sistema de monitoramento, composto por um sensor de temperatura e um microcontrolador.

O sensor é alimentado através da porta 10 do microcontrolador que é controlado através do programa e enquanto o microcontrolador está em modo de baixo consumo o pino não é energizado e, portanto, não alimenta o sensor. Somente após o intervalo de 10 minutos programado, o microcontrolador “acorda” e alimenta o sensor através da porta 10 do microcontrolador e, então, o valor medido pelo sensor é transmitido ao microcontrolador através da porta 15 que é uma das entradas analógicas.

Conhecendo-se o funcionamento do sistema de monitoramento, é possível então obter a potência necessária para alimentá-lo. Abaixo são listadas as correntes em cada um dos modos de funcionamento do microcontrolador e o intervalo de tempo em que cada modo opera, de modo a obter a corrente média consumida pelo sistema.

Modo de Baixo Consumo: o microcontrolador “dorme” durante 10 minutos (600 segundos) e consome uma corrente de $0,5\mu\text{A}$.

Modo Ativo: este modo ocorre em duas etapas, a primeira é quando o microcontrolador “acorda” e acontece durante 0,1 segundo, porém o sensor ainda não foi alimentado e a corrente consumida é $0,6\mu\text{A}$. Na segunda etapa, o sensor é alimentado e, durante um intervalo de 0,1 segundo, consome uma corrente de $15000\mu\text{A}$.

A partir das informações acima, chega-se ao valor médio da corrente (que é a somatória das correntes nos modos de operação dividida pelo intervalo de tempo, dada por $I_m = \sum I / \Delta t$) consumida pelo sistema de monitoramento que é de $25\mu\text{A}$. É possível, então, obter a potência consumida por este sistema através da corrente média e da tensão máxima de operação do microcontrolador. Na Equação 34, abaixo obtém-se a potência consumida pelo sistema.

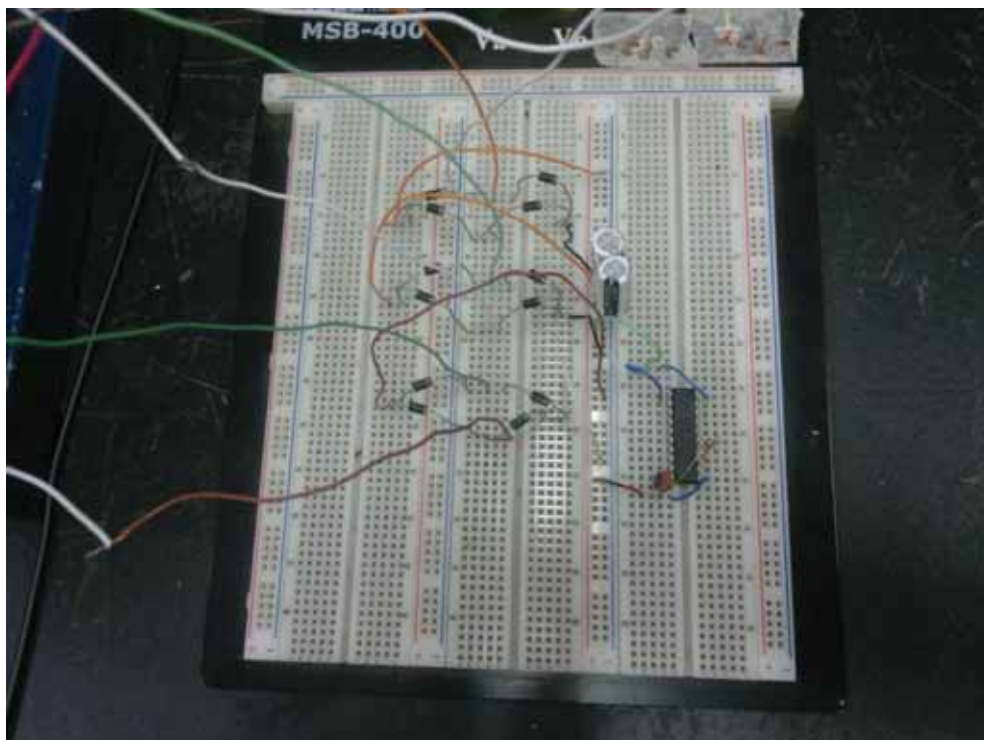
$$P_{SM} = V_{SM} \times I_m \quad (34)$$

Como pôde ser observado nos capítulos anteriores, o valor da potência que a piezoestrutura produz e que é extraído pelos circuitos conversores, $107,6\mu\text{W}$, é muito maior do que a potência consumida pelo sistema de monitoramento, $89,97\mu\text{W}$, comprovando que o

sistema de *extração e armazenamento de energia* proposto é capaz de alimentar um sistema de monitoramento através de sensores, se tornando autônomo.

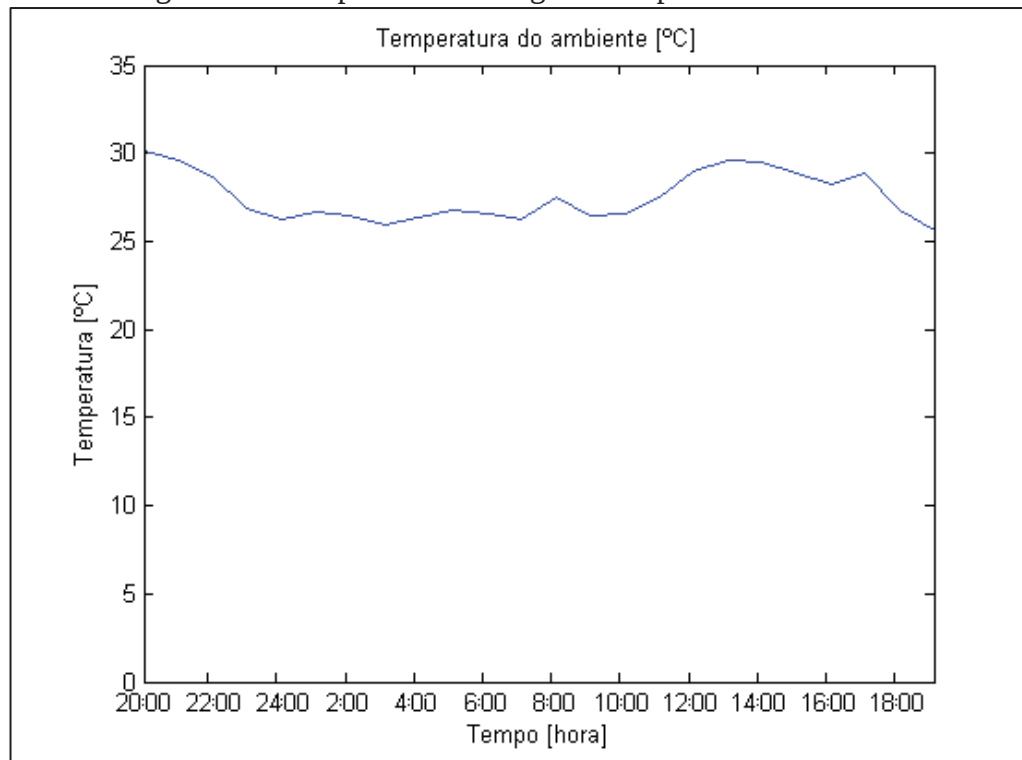
De modo a comprovar a efetividade do sistema de *extração e armazenamento de energia* proposto na alimentação de um sensor, os terminais do supercapacitor foram conectados ao sistema de monitoramento de temperatura, Figura 51, para alimentá-lo e, então, monitorar a temperatura de um ambiente ao longo de um período de 24 horas. Os resultados apresentados foram coletados nos dias 05 e 06 de dezembro de 2012 com início às 20:00 do dia 05 e finalizado às 20:00 do dia 06. O ambiente monitorado foi um dos laboratórios do prédio M3 da Engenharia Mecânica da UNESP de Ilha Solteira. A temperatura foi medida em um intervalo de 10 minutos entre cada medição. Nas Figuras 52 e 53 são apresentados os gráficos com os valores de temperatura ao longo do período medido e a tensão no supercapacitor durante o funcionamento.

Figura 51 - Sistema de monitoramento de temperatura



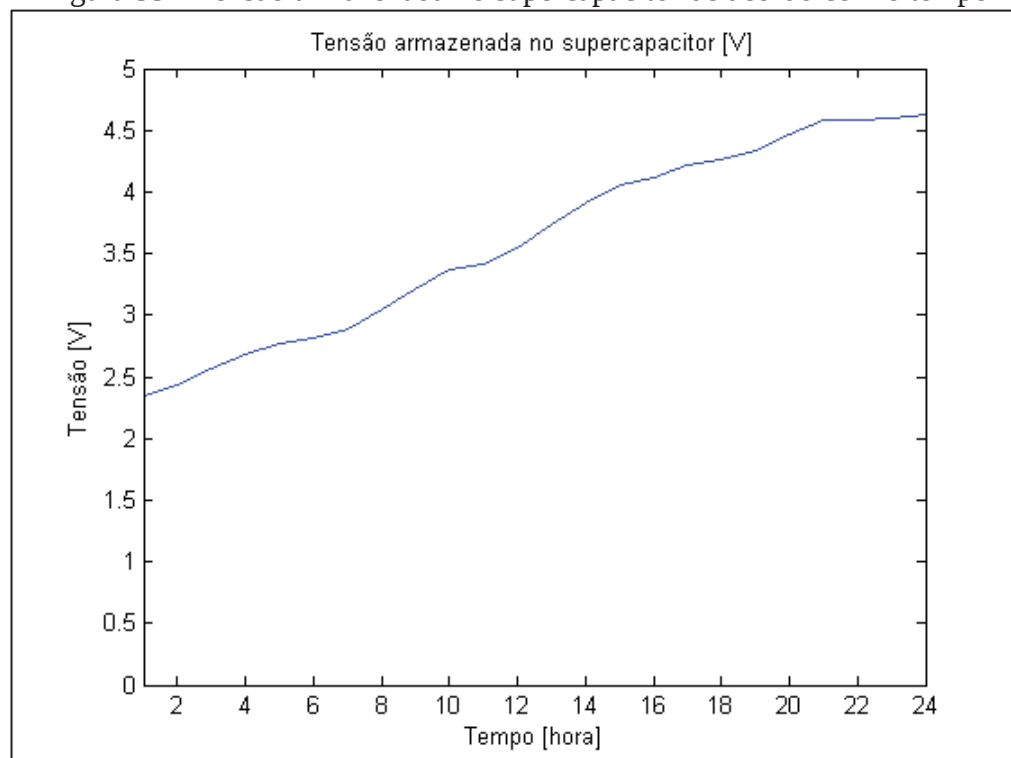
Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Figura 52 - Temperatura ao longo de um período de 24 horas



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Figura 53 - Tensão armazenada no supercapacitor de acordo com o tempo



Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Neste laboratório há um ar condicionado que opera em média no intervalo entre as 9:00 da manhã e as 23:00, por isso é possível observar que nos momentos em que o ar condicionado encontrava-se desligado durante o dia (entre as 12:00 e as 14:00) há um aumento na temperatura, como pode ser observado na Figura 52.

Observa-se, a partir da Figura 53, que a tensão armazenada no supercapacitor no início foi de 2,35V e ao final do período foi de 4,62V, isso mostra que o sistema de *extração e armazenamento de energia* proposto é capaz de alimentar o sensor e o microcontrolador e ainda aumentar o valor da tensão armazenada no supercapacitor, tornando o sistema de monitoramento em um sistema autônomo.

CAPÍTULO 8

CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento e modelagem de uma piezoestrutura multifrequência composta por três piezo-vigas engastada-livre com PZT patch (5H4E), testes experimentais para comparação do modelo numérico com o modelo experimental, um estudo sobre a influência das configurações geométricas na largura de banda da piezoestrutura e uma análise sobre duas topologias de circuitos eletrônicos básicos de extração/conversão para extrair o maior potência possível do elemento piezelétrico. A piezoestrutura multifrequência foi desenvolvida considerando uma aplicação prática, sendo assim, sua frequência natural do primeiro modo foi escolhida para ser a mesma da operação de um motor elétrico industrial de quatro polos.

Cada piezo-viga constante da piezoestrutura foi modelada separadamente através elementos finitos no software ANSYS[®] os resultados obtidos pelas simulações foram comparados com os obtidos experimentalmente e percebeu-se que existe uma boa correlação entre o modelo numérico e o modelo experimental. Inicialmente foi considerada apenas uma piezo-viga e verificou-se, através de uma varredura de frequências, que ao variar a frequência de excitação ocorrem perdas na tensão produzida pelo elemento piezelétrico. A partir desta informação, o conceito da banda de meia potência foi utilizado para a identificação da faixa de frequências onde ocorre uma diminuição da tensão produzida até um limite aceitável (com valores entre 60 e 70% da tensão produzida em ressonância) e então modelar as demais piezo-vigas de modo a terem suas frequências naturais do primeiro modo dentro desta faixa. Observou-se que para este valor determinado, e com o comprimento do elemento piezelétrico igual a 20mm e 60mm, as demais vigas deveriam variar aproximadamente $\pm 3\text{Hz}$ e $\pm 2\text{Hz}$, respectivamente.

Na avaliação das configurações geométricas foram analisados diferentes comprimentos, larguras e espessuras da viga hospedeira para verificar qual dos parâmetros apresenta maior influência na largura de banda de frequências. Adicionalmente foi realizado um estudo e simulações sobre a influência do comprimento do elemento piezelétrico na tensão e potência produzida para cada uma das piezo-vigas.

Considerando apenas circuitos eletrônicos simples, que não precisam de outra fonte de alimentação, foram analisados o funcionamento e a magnitude da tensão e potência extraídas do elemento piezelétrico por dois circuitos extratores/conversores: uma topologia que é composta por um retificador de onda completa em ponte e outra composta por um dobrador de tensão. A energia extraída é armazenada um supercapacitor.

A partir dos resultados obtidos é possível elaborar as seguintes conclusões:

- Quanto ao modelo da piezoestrutura

O modelo de elementos finitos se apresenta de forma eficiente para prever a tensão elétrica produzida pelo elemento piezelétrico possuindo boa correlação com o modelo experimental.

- Quanto a aplicação do método da banda de meia potência

A técnica mostrou-se atrativa na análise do problema em questão apresentando um resultado satisfatório e possibilitando um alto valor de energia produzida mesmo com a variação da frequência de excitação.

- Quanto ao estudo das configurações geométricas

A análise dos resultados revela que o comprimento da viga hospedeira é o parâmetro que se deve variar entre as vigas para que a piezoestrutura possua as frequências naturais dentro da faixa desejada. A largura e a espessura foram mantidas iguais já que a influência das mesmas faz com que as frequências sofram poucas alterações (largura) ou variem muito ficando fora da faixa de frequências desejada (espessura).

- Quanto ao comprimento do elemento piezelétrico

O comprimento do elemento piezelétrico possui forte influência na tensão e potência elétrica produzidas, pois está ligado diretamente com o fator de acoplamento eletromecânico. Foi encontrado que o elemento piezelétrico deve possuir comprimento em torno de 60mm para produzir tensão e potência elevadas. Valores de comprimentos do elemento piezelétrico maiores ou menores que este valor produzem tensões e potências menores.

- Quanto aos circuitos eletrônicos de extração/conversão de energia

Foram analisadas as topologias de um retificador de onda completa em ponte e de um dobrador de tensão, e verificou-se que o dobrador de tensão apresenta maior potência extraída, aproximadamente 30% maior, que a primeira topologia. Porém, o tempo de carregamento de um supercapacitor é menor para o circuito retificador de onda completa já que a corrente média extraída pelo retificador de onda completa é maior que a obtida pelo dobrador de tensão.

- Quanto ao sistema autônomo

O sistema autônomo apresentou resultado satisfatório e, como esperado, consumiu pouca energia de modo que o sistema de *extração e armazenamento de energia* proposto foi capaz de manter o funcionamento do sistema além de continuar aumentando a tensão elétrica armazenada no supercapacitor.

Abaixo são listadas algumas propostas de trabalho para o futuro:

- I. Desenvolvimento de um circuito de extração/conversão mais complexo que não utilize alimentação externa;
- II. Fazer um estudo sobre o comportamento das piezo-vigas ligadas com seus terminais em série/paralelo;
- III. Desenvolver um sistema autônomo onde o sistema de aquisição de dados utilizando um sensor realize a transmissão dos dados sem fio.
- IV. Avaliar o desempenho da piezoestrutura multifrequência com relação aos piezo-geradores não-lineares.

REFERÊNCIAS

- ADACHI, K.; TANAKA, T. An experimental power generation evaluation of cantilever type of piezoelectric vibration energy harvester. In: ASME 2009 CONFERENCE ON SMART MATERIALS, ADAPTIVE STRUCTURES AND INTELLIGENT SYSTEMS SMASIS2009, 2009, Oxnard. **Proceedings...** Oxnard: ASME, 2009. p. 281-289. Disponível em: < <http://link.aip.org/link/abstract/ASMECP/v2009/i48975/p281/s1>>. Acesso em: 15 set. 2009.
- AJITSARIA, J.; CHOE, S. Y.; SHEN, D.; KIM, D. J. Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation. **Smart Materials and Structure**, Bristol, v. 16, n. 2, p. 447–454, 2007. Disponível em: <stacks.iop.org/SMS/16/447>. Acesso em: 24 out. 2009.
- ALLIK, H.; HUGHES, J. R. Finite element for piezoelectric vibration. **International Journal Numerical Methods of Engineering**, Chichester, n. 2, p. 151-157, 1970. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nme.1620020202/pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2012.
- ANTON, S. R; SODANO, H. A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). **Smart Materials and Structure**, Bristol, v. 16, n. 3, p. R1–R21, 2007. Disponível em: <stacks.iop.org/SMS/16/R1>. Acesso em: 27 set. 2011.
- BENGHANEM, M. A low cost wireless data acquisition system for weather station monitoring. **Renewable Energy**, Bristol, v. 35, p. 862-872, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.024>>. Acesso em: 20 set. 2011.
- BERLIN COURT, D.; KRUEGER, H. H. A.; NEAR, C. Properties of piezoelectricity ceramics. [S.l.]: Morgan Electro Ceramics, 2004. (Technical Publication TP, 226). Disponível em: <http://traktoria.org/files/sonar/piezoceramics/morgan/properties_of_piezoelectric_ceramics_%28pzt-4_pzt-5a_pzt-5h_pzt-8%29.pdf>. Acesso em: 15 out. 2011.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos. 6. ed. São Paulo: LTC, 1998.
- BOYLESTAD, R. L. Introdução à análise de circuitos. 10. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- COOK-CHENNAULT, K. A.; THAMBI, N.; SASTRY, A. M. Powering MEMS portable devices: a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 17, article 0430-01, 2008. Disponível em: <http://iopscience.iop.org/0964-1726/17/4/043001/pdf/0964-1726_17_4_043001.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2011.
- DE MARQUI JR., C.; ERTURK, A.; INMAN, D. J. An electromechanical finite element model for piezoelectric energy harvester plates. **Journal of Sound and Vibration**, Southampton, v. 327, n. 1-2, p. 9-25, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2009.05.015>>. Acesso em: 27 jan. 2012.

- DUTOIT, N. E. **Modeling and design of a MEMS piezoelectric vibration energy harvester**. Dissertação (Mestrado) – University of Cambridge, Cambridge, 2005. Disponível em: <http://robotics.caltech.edu/~ndutoit/wiki/images/1/1b/MS_thesis.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2012.
- DUTOIT, N. E.; WARDLE, B. L. Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters. **AIAA Journal**, Newport, v. 45, n. 5, p. 1126-1137, 2007. Disponível em: <<http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.25047>>. Acesso em: 2 jun. 2012.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. On mechanical modeling of cantilevered piezoelectric vibration energy harvesters. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 19, n. 11, p. 1311-1325, 2008a. Disponível em: <<http://jim.sagepub.com/content/19/11/1311>>. Acesso em: 27 fev. 2012.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. Issues in mathematical modeling of piezoelectric energy harvesters. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 17, n. 6, p. 14, 2008b. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/0964-1726/17/6/065016/>>. Acesso em: 27 fev. 2012.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. **Smart Materials and Structure**, Bristol, v. 18, n. 2, p. 1-18, 2009. Disponível em: <stacks.iop.org/SMS/18/025009>. Acesso em: 3 jun. 2011.
- ERTURK, A.; INMAN, D. J. **Piezoelectric energy harvesting**. Chichester: Wiley, 2011.
- FERRARI, M.; FERRARI, V.; GUIZZETTI, M.; MARIOLI, D.; TARONI, A. Piezoelectric multifrequency energy converter for power harvesting in autonomous microsystems. **Sensors and Actuators A**, Lausanne, v. 1, n. 142, p. 329-335, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2007.07.004>>. Acesso em: 3 jun. 2011.
- FERRARI, M.; FERRARI, V.; GUIZZETTI, M.; MARIOLI, D. An autonomous battery-less sensor module powered by piezoelectric energy harvesting with RF transmission of multiple measurement signals. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v.18, n. 8, 9 p., 2009. Disponível em: <stacks.iop.org/SMS/18/085023>. Acesso em: 01 nov. 2011.
- GUAN, M. J.; LIAO, W. H. Characteristics of energy storage devices in piezoelectric energy harvesting systems. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 19, n. 6, p. 671-680, 2007. Disponível em: <<http://jim.sagepub.com/cgi/content/abstract/19/6/671>>. Acesso em: 10 set. 2011.
- HAGOOD, N. W.; CHUNG, W. H.; VONFLOTOW, A. Modelling of piezoelectric actuator dynamics for active structural control. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 1, p. 327-354, 1990. Disponível em: <<http://jim.sagepub.com/content/1/3/327.abstract>>. Acesso em: 10 maio 2012.
- IEEE. **ANSI Standard 176-1987**: IEEE Standard on Piezoelectricity. New York: IEEE, 1987. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=26560>>. Acesso em: 22 mar. 2012.

JOHNSON, D. E. **Design of an ultra-low power control system for a self-powered wireless sensor**. 2006. Dissertação (Mestrado) – University of Florida, Florida, 2006. Disponível em: <http://etd.fcla.edu/UF/UFE0014331/johnson_d.pdf>. Acesso em: 15 set 2012.

KOK, S. L.; MOHAMAD, N.; WENG, D. Y. F.; KIEN, C. S.; FU, D. C. Multifrequency energy harvesting using thick-film piezoelectric cantilever. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, CONTROL AND COMPUTER ENGINEERING, 2011, Malaysia. **Proceedings...** Malaysia: INECCE, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/INECCE.2011.5953918>>. Acesso em: 14 fev. 2012.

LAGOIN, T. G. **Utilização de materiais piezelétricos (PZTs) para coleta e armazenamento de energia**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

LEFEUVRE, E.; BADEL, A.; RICHARD, C.; PETIT, L.; GUYOMAR, D. A comparison between several vibration powered piezoelectric generators for standalone systems. **Sensors and Actuators A**, Lyon, v. 126, p. 405-416, 2006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2005.10.043>> Acesso em: 8 mar. 2012.

LEO, D. J. **Engineering analysis of smart material systems**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. 576 p.

LIAO, Y.; SODANO, H. A. Model of a single mode energy harvester and properties for optimal power generation. **Smart Materials and Structure**, Bristol, v. 17, n. 6, p. 1-14, 2008. Disponível em: <stacks.iop.org/SMS/17/065026>. Acesso em: 10 nov. 2011.

LIU, J-Q.; FANG, H-B.; XU, Z-Y.; MAO, X-H.; SHEN, X-C.; CHEN, D.; LIAO, H.; CAI, B-C. A MEMS-based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting. **Microelectronics Journal**, China, v. 39, p. 802-806, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mejo.2007.12.017>>. Acesso em: 2 set. 2011.

PEARSON, R. P. **Modeling and development of piezoceramic energy harvester for munitions applications**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Villanova University, Philadelphia, 2006. Disponível em: <<http://www37.homepage.villanova.edu/sean.pearson/Documents/Thesis.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2012.

PEDERSEN, J. H. **Low frequency low voltage vibration energy harvesting converter**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Técnica da Dinamarca, Kongens Lyngby, 2011. Disponível em: <http://www.delta.dk/imported/images/DELTA_Web/documents/Innovation/Master_Thesis_Johan_Pedersen_s052402.pdf>. Acesso em: 3 maio 2012.

PRIYA, S.; INMAN, D. J. **Energy harvesting technologies**. New York: Springer, 2009. 524p.

RAMADASS, Y. K.; CHANDRAKASAN, A. P. An efficient piezoelectric energy harvesting interface circuit using a bias-flip rectifier and shared inductor. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, Piscataway, v. 45, n. 1, p. 189-204, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2009.2034442>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

ROUNDY, S. J. **Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion**. 2003. Dissertação (Doutorado) – Universidade da Califórnia, Berkeley, 2003.

SENTURIA, S. D. **Microsystem design**. Park Norwell: Kluwer Academic, 2000.

SODANO, H. A.; INMAN, D. J.; PARK, G. Generation and storage of electricity from power harvesting devices. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 16, n. 1, p. 67-75, 2005a. Disponível em: <<http://jim.sagepub.com/cgi/content/abstract/16/1/67>>. Acesso em: 10 maio 2011.

SODERKVIST, J. Dynamic behavior of a piezoelectric beam. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, v. 90, n. 2, pt.1, p. 686-692, 1991. Disponível em: <http://asadl.org/jasa/resource/1/jasman/v90/i2/p686_s1>. Acesso em: 20 jun. 2012.

SOOD, R. **Piezoelectric Micro Power Generator (PMPG): a MEMS-based energy scavenger**. Dissertação (Mestrado) – Massachusetts Institute of Technology, 2003. Disponível em: <<http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/18020>>. Acesso em: 25 maio 2012.

SOUZA, F. S. **Sistema de extração de potência (power harvesting) usando transdutores piezelétricos**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

YANG, Y.; TANG, L. Equivalent circuit modeling of piezoelectric energy harvesters. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 20, n. 18, p. 2223-2235. Disponível em: <<http://jim.sagepub.com/cgi/content/abstract/20/18/2223>>. Acesso em: 21 set. 2012.

ANEXO A – PROGRAMA EM LINGUAGEM C

Neste anexo é apresentado o programa em linguagem C desenvolvido por SOUZA (2011) para o microcontrolador capturar o sinal medido pelo sensor utilizado no Capítulo 6.

```
// declaração das variáveis //
bit S1, A1;
int medida, teste, teste2, i;
signed int ax;
long datatime[4], Data[10];
long endereco, recebido, read;
long seg, minu, hr, dia, mes, ano;

//Permitindo o uso do RTCC //
void EnableRTC(){
    asm{
        disi #5
        mov #0x55, w7
        mov w7, NVMKEY
        mov #0xAA, w8
        mov w8, NVMKEY
        bset RCFGCAL, #13
        nop
        nop
        bset RCFGCAL, #15
    }
}

//interrupção Alarme //
void Alarme() org 0x90 {
    A1=1;           //
    IFS3bits.RTCIF=0;    // reseta bit flag
}

void main() {
```

```

//Configurando oscilador e I/O //
OSCCONbits.COSC=0b110;           //Configura oscilador primario: 500kHz LFRC
ADPCFG = 0xEFFF;                 // Configura pino Rx e Tx como I/O digital
trisA=0x40;                       // Configura port A como saída
TrisB=0x1000;                     // Configura port B como saída exceto Rx, Tx e INT0
CNPU1bits.CN8PUE=1;              // Habilita resistores pull up
PortA=0x0;                        // Pinos port A não utilizada como saída nível baixo
PortB=0x0;                        // Pinos port B não utilizada como saída nível baixo
PMD1=0xFFFF;                     // Habilita bit PMD
PMD2=0xFFFF;                     // Habilita bit PMD
PMD3=0xFFFF;                     // Habilita bit PMD
PMD4=0xFFFF;                     // Habilita bit PMD
PMD3bits.RTCCMD=0;                // Desabilita bit PMD: RTCC
PMD4bits.EEMD=0;                  // Desabilita bit PMD: EEPROM

//Configurando o RTCC //
EnableRTC();                       // Habilita RTCC
RCFGCALbits.RTCPTR=0b11;          // set RTCPR para definir data e tempo
RTCVAL=11;                         // definindo ano
RTCVAL=0X0C43;                     // definindo mes e dia
RTCVAL=0x514;                      // definindo semana e hora
RTCVAL=0X0;                        // definindo minuto e segundo
RCFGCALbits.RTCWREN=0;             // clear bit RTCWREN não permite mais mexer
no horario

//Configurando alarme do RTCC//
ALCFGRPT = 0x0000;                 // Alarme desligado, procedimento para configura bits
de Alarme
ALCFGRPTbits.CHIME=1;              // configura repetição de alarme
ALCFGRPTbits.ALRMEN=1;             // habilita alarme
ALCFGRPTbits.AMASK=0b0100;         // configura para o Alarme acontecer a cada 10
minutos

```

```

// Interrupção de Alarme //
IPC15bits.RTCIP=0b001;           // prioridade
IFS3bits.RTCIF=0;                // clear bit de flag
IEC3bits.RTCIE=1;                // habilita interrupção

// Configurando memória EEPROM //
endereco = 0x7FFE00;              // inicio do endereço da memória EEPROM
i=0;
ax=0;
EEPROM_Write(endereco, 0);

while (1) {

    DSCONbits.RELEASE=0;
    S1=0;
    if (Button(&PORTA, 6, 10, 1))
        S1=1;

    // comunicação UART //
    if (S1==0){                    // Se comunicação UART ligada
        portB=0;                  //          //
        Delay_ms(2000);           // LED pisca    //
        portB=0XFFFF;            //          //
        Delay_ms(2000);           //          //
        IEC3bits.RTCIE=0;         // desabilita Alarme RTCC
        PMD1bits.U1MD=0;          // Desabilita bit PMD: uart

        // Confiurando comunicação UART //
        OSCCONbits.NOSC= 0b111;   //Configura clock: 8MHz FRC
        UART1_Init(300);          // Inicia Uart
        Delay_ms(100);            // atraso
        U1MODEbits.RXINV=0;        // bit para inverter Rx
        U1MODEbits.PDSEL=0b11;    // configura para mandar 9 bit
        U1MODEbits.STSEL=1;        //

```

```

U1STAbits.UTXINV=1;           // bit para inverter Tx
U1STAbits.UTXEN=1;           //

ax=0;

endereco = 0x7FFE00;           // reseta endereço

teste=EEPROM_Read(endereco);   // leitura da memoria
while(WR_bit);                 // espera bit
if (teste!=0xFFFF) {
do {                           //procurando endereço sem dado
    ax+=2;
    endereco+=2;
    teste=EEPROM_Read(endereco); // leitura da memoria
    while(WR_bit);              // espera bit

} while(teste != 0xFFFF);
}

endereco = 0x7FFE00;           // reseta endereço
i=0;

do {

    UART1_write (0xB);          //
    UART1_write (ax);           // número de dados
    UART1_write (0xB);          //

    if (endereco==Data[i]){      //teste para escrever data
        i++;
        teste=EEPROM_Read(endereco); //leitura endereço
        while(WR_bit);          //espera bit
        mes  = (((teste & 0x1000) >> 12) * 10) + ((teste & 0x0F00) >>8);
//determinando mes

```

dia

```
dia = (((teste & 0x0030) >> 4) * 10) + ( teste & 0x000F); // determinando
```

```
UART1_write (dia);           //envia dia
UART1_write_text ("-");      //envia dado
UART1_write (mes);           //envia mes
UART1_write_text ("-");      //envia dado
UART1_write_text (0x00);     //envia dado
UART1_write_text (0x00);     //envia dado
endereco += 2;               // próximo endereço
ax-=2;                       // próximo dado
```

```
teste=EEPROM_Read(endereco); //leitura endereço
while(WR_bit);               //espera bit
ano = (((teste & 0x00F0) >> 4) * 10) + ( teste & 0x000F); //determinando ano
UART1_write (ano);           //envia ano
UART1_write_text (0x00);     //envia dado
UART1_write_text (0x00);     //envia dado
endereco += 2;               // próximo endereço
ax-=2;                       // próximo dado

}
```

hora

```
teste=EEPROM_Read(endereco); // leitura memória
while(WR_bit);               // espera bit
hr = (((teste & 0x0030) >> 4) * 10) + ( teste & 0x000F); // determinando

UART1_write (0x00);
UART1_write (hr);             // enviando hora
UART1_write_text (":");      // enviando dado
endereco += 2;               // proximo endereço
ax-=2;                       // proximo dado

teste=EEPROM_Read(endereco); // leitura memória
while(WR_bit);               // espera bit
```

```

        minu = (((teste & 0x7000) >> 12) * 10) + (((teste & 0x0F00) >> 8 ); //
determinando minuto
        seg = (((teste & 0x0070) >> 4) * 10) + ( teste & 0x000F); //
determinando segundo
        UART1_write (minu); // enviando minuto
        UART1_write_text (":"); //enviando dado
        UART1_write (seg); // enviando segundo
        endereco += 2; // proximo endereço
        ax-=2; // proximo dado

```

```

        teste=EEPROM_Read(endereco); // leitura memória
        while(WR_bit); //espera bit
        teste2>>=2; // //
        teste2=((712* teste)/0x104)-500; // determinando temperatura //
        UART1_Write(0X00); //enviado dado
        UART1_Write(0x00 ); // enviando dado
        UART1_Write(teste2); // enviando temperatura
        endereco += 2; // proximo endereço
        ax-=2; // proximo dado
        delay_ms (1500); // atraso
    } while (ax > 0); // loop enquanto tiver dado //

```

```

    S1=1; //seta variável S
    PMD1bits.U1MD=1; // Habilita bit PMD: uart
    OSCCONbits.NOSC= 0b110; //Configura clock: 500 kHz LFRC
    IEC3bits.RTCIE=1; // habilita interrupção

```

```

asm {
    bset DSCON, #15 // habilita bit DSEN
    PWRSAP #0 // entra no modo deep sleep
}

```

```
}
```

```

    // Medida do sensor //
if (AI==1) {
    delay_ms(500);
    teste=EEPROM_Read(endereco);    // leitura da memoria
    while(WR_bit);                  // espera bit
    if (teste!=0xFFFF) {
        do {                        //procurando endereço sem dado
            endereco+=2;
            teste=EEPROM_Read(endereco);    // leitura da memoria
            while(WR_bit);                  // espera bit

        } while(teste != 0xFFFF);
    }

    RCFGCALbits.RTCPTR = 0b1;          //Leitura do horário
    datatime[0] = RTCVAL;              // ano
    datatime[1] = RTCVAL;              // dia e mês
    datatime[2] = RTCVAL;              // semana e hora
    datatime[3] = RTCVAL;              // minuto e segundo

    if (datatime[1]!=dia ) {
        portb=0x00;
        delay_ms(500);
        portb=0xFFFF;
        Data[i]=endereco;
        i++;
        EEPROM_Write(endereco, datatime[1]); //escreve dia na memoria
        while(WR_bit);                      // espera gravar dado na memoria
        endereco+=2;                        // passa para o proximo endereço da memoria

        EEPROM_Write(endereco, datatime[0]); //escreve mes na memoria
        while(WR_bit);                      // espera gravar dado na memoria
    }
}

```

```

    endereco+=2;                // passa para o proximo endereço da memoria
    dia=datatime[1];
}

EEPROM_Write(endereco, datatime[2]); //escreve hora na memoria
while(WR_bit);                  // espera gravar dado na memoria
endereco+=2;                    // passa para o proximo endereço da memoria

EEPROM_Write(endereco, datatime[3]); //escreve minuto e segundo na memoria
while(WR_bit);                  // espera gravar dado na memoria
endereco+=2;                    // passa para o proximo endereço da memoria

PMD1bits.ADC1MD=0;              // Desabilita bit PMD: conversor A/D
ADC1_Init();                    // Inicia o conversor A/D
portA= 0x10;                    //alimenta o sensor
delay_ms (200);
medida = ADC1_Get_Sample(12);    // leitura do conversor A/D
EEPROM_Write(endereco, medida);  //escreve medida do conversor A/D na
memoria
while(WR_bit);                  // espera gravar dado na memoria
endereco+=2;                    // passa para o proximo endereço da memoria
portA= 0x0;                     // desliga o sensor
PMD1bits.ADC1MD=1;              // Habilita bit PMD: conversor A/D

Al=0;
}

asm {
    bset DSCON, #15 // habilita bit DSEN
    PWRSAV #0       // entra no modo deep sleep
}
}
}

```