



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Tese de Doutorado

**GERADOR ROTACIONAL PIEZOELÉTRICO BASEADO NO CONCEITO DE COLHEITA
DE ENERGIA (*ENERGY HARVESTING*)**

Wendell Pereira de Farias

João Pessoa - PB

Outubro de 2022

GERADOR ROTACIONAL PIEZOELETRICO BASEADO NO CONCEITO DE COLHEITA DE ENERGIA (*ENERGY HARVESTING*)

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Dinâmica e Controle de Sistemas Mecânicos

Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto

Orientador

Prof. Dr. Alexandre César de Castro

Orientador

João Pessoa - PB

Outubro de 2022

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F224g Farias, Wendell Pereira de.
Gerador rotacional piezoelétrico baseado no conceito
de colheita de energia (energy harvesting) / Wendell
Pereira de Farias. - João Pessoa, 2022.
88 f. : il.

Orientação: Cícero da Rocha Souto.
Coorientação: Alexandre César Castro.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Gerador rotacional. 2. Colheita de energia. 3.
Transdutor. 4. Transdutores piezoelétricos. I. Souto,
Cícero da Rocha. II. Castro, Alexandre César. III.
Título.

UFPB/BC

CDU 621.313.52(043)

Elaborado por ANNA REGINA DA SILVA RIBEIRO - CRB-15/24

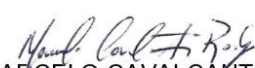
GERADOR ROTACIONAL PIEZOELÉTRICO BASEADO NO CONCEITO DE COLHEITA DE ENERGIA (ENERGY HARVESTING)

por

WENDELL PEREIRA DE FARIAS

Tese aprovada em 26 de outubro de 2022


Prof. Dr. CICERO DA ROCHA SOUTO
Orientador - UFPB

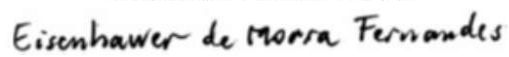

Prof. Dr. MARCELO CAVALCANTI RODRIGUES
Examinador Interno - UFPB


Prof. Dr. SIMPLICIO ARNAUD DA SILVA
Examinador Interno - UFPB


Prof. Dr. ALEXSANDRO JOSÉ VIRGINIO DOS SANTOS
Examinador Externo – UFPB


Prof. Dr. ALEXANDRE CÉZAR DE CASTRO
Examinador Externo – UFPB


Prof. Dr. RAMON ALVES TORQUATO
Examinador Externo - UFPB


Prof. Dr. EISENHAWER DE MOURA FERNANDES
Examinador Externo - UFCG

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a mim, por acreditar em mim;

Quero agradecer a mim, por todo esse trabalho;

Quero agradecer a mim, por não ter me dado dias livres;

Quero agradecer a mim, por nunca desistir;

Quero agradecer a mim, por sempre, dar, mas, do que recebo;

Quero agradecer a mim, por simplesmente, ser, eu mesmo, a todo momento.

Também quero agradecer:

À minha mãe, Célia Pereira de Farias e ao meu pai, Severino do Ramo de Farias;

À minha esposa, Daiana Correia de Lucena, por toda a sua dedicação;

À minha amiga irmã, Jeane Silva de Souza, por estar sempre me fortalecendo;

Aos meus filhos: Guilherme Lucena de Farias, Gustavo Marques de Farias e Gabriel Marques de Farias pela compreensão;

Aos meus orientadores: Cícero da Rocha Souto e Alexandre César de Castro;

Aos colegas e amigos de mestrado e doutorado do LaSEA (Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas);

Ao FABLAB (Laboratório de Fabricação Digital) da Universidade Federal da Paraíba;

Ao IFPB (Instituto Federal da Paraíba) Campus João Pessoa pela disponibilização de materiais e equipamento.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.2	CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS	19
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	19
2	GERADORES COM TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS APLICADOS À COLHEITA DE ENERGIA	20
2.1	TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS	20
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.3	SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA	32
3	MODELO ANALÍTICO	34
3.1	MODELO ELETROMECÂNICO	34
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO GERADOR	43
4	RESULTADOS SIMULADOS	52
4.1	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	52
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	59
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE 1 – TAMPA SUPERIOR E INFERIOR	81
	APÊNDICE 2 – ESTRUTURA PARA FIXAÇÃO DAS LÂMINAS COM OS ELEMENTOS PIEZOELÉTRICOS (ESTATOR)	82
	APÊNDICE 3 - ESPAÇADOR COM ROSCA INTERNA	83
	APÊNDICE 4 - BASE SUPERIOR E BASE INFERIOR PARA SUPORTE DO ESTATOR	84
	APÊNDICE 5 - BASE PARA MOVIMENTAÇÃO DO SENSOR DO TIPO ENCODER.....	85
	APÊNDICE 6 – SUPORTE PARA O SENSOR DO TIPO ENCODER.....	86
	APÊNDICE 7 – DISCO ENCODER	87
	APÊNDICE 8 – CÓDIGO PARA LEITURA DO SINAL FORNECIDO PELO ENCODER NA PLATAFORMA ARDUINO	88
	APÊNDICE 9 - CÓDIGO PARA ACIONAMENTO DO MOTOR DC COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO VARIÁVEL	89

Lista de Figuras

Figura 1.1: Utilização de impressoras 3D para a construção de sistemas de colheita de energia mecânica.....	16
Figura 1.2: Sistema de colheita de energia	17
Figura 1.3: Nível de frequência para diferentes fontes de energia mecânica	17
Figura 2.1: Coordenadas utilizadas na orientação de polarização de um material piezoelétrico.	22
Figura 2.2: Estrutura do aerogerador proposto em Priya <i>et. al</i> (2005): (a) Localização dos atuadores do tipo <i>biomorph</i> ; (b) Vista lateral.....	24
Figura 2.3: Configuração tangencial e radial do gerador proposto em Karami <i>et. al</i> (2013)...	24
Figura 2.4: Estrutura do aero gerador e configuração experimental proposto em Kishore <i>et. al</i> (2014).....	25
Figura 2.5: Estrutura do gerador e disposição dos transdutores proposto em Avirovik <i>et. al</i> (2015).....	26
Figura 2.6: Aerogerador proposto em Bai <i>et. al</i> (2016) - (a) Estrutura física; (b) Montagem experimental.....	27
Figura 2.7: Configuração do gerador e estrutura das vigas proposto em Zhang <i>et. al</i> (2017).	28
Figura 2.8: Estrutura do gerador rotacional proposto em Fu (2018).....	29
Figura 2.9: Estrutura do gerador rotacional proposto em Zhao (2019).....	29
Figura 2.10: Estrutura do gerador rotacional proposto em Muhammad Rizal (2022).	31
Figura 3.1: Configuração do gerador para uma viga.	35
Figura 3.2: a. Seção transversal original para a viga constituída por dois tipos de materiais; b. Viga consistindo de apenas um material, o material PZT.	36
Figura 3.3: Circuito elétrico equivalente.	40
Figura 3.4: Estrutura para um módulo do gerador proposto.....	44
Figura 3.5: Vista explodida para um módulo do gerador.....	45
Figura 3.6: Módulo gerador 1 e módulo gerador 2.....	45
Figura 3.7: Configuração experimental para análise do gerador proposto	48
Figura 3.8: Circuito proposto para conexão de transdutores piezoelétricos em Ozdemir (2019).	49

Figura 3.9: Circuito proposto para a conexão e retificação dos sinais gerados pelos transdutores piezoelétricos: (a) conexão das vigas do módulo gerador 1 e 2 em série; (b) conexão das vigas do módulo gerador 1 e 2 em paralelo.....	49
Figura 3.10: Circuito para conexão em série e paralelo.....	50
Figura 3.11: Placa LTC3588-1 utilizada: Configuração para aplicações com PZTs.	51
Figura 4.1: Dimensão dos geradores A e B.....	52
Figura 4.2: Valores de tensão, corrente e potência, com os seis PZT do gerador A ligados em paralelo.....	53
Figura 4.3: Valores de tensão, corrente e potência, com os seis PZT do gerador B ligados em paralelo.....	54
Figura 4.4: FRF para a tensão, potência, corrente e deslocamento, com L=30 mm.....	57
Figura 4.5: Variação da posição do PZT sobre a lâmina para o gerador A (L=30 mm).....	57
Figura 4.6: Variação da posição do PZT sobre a lâmina para o gerador B (L=60 mm).....	58
Figura 4.7: FRF para a tensão considerando diferentes valores para a resistência conectada ao PZT, com $0,01 < x < 0,03$	58
Figura 5.1: Configuração experimental - gerador desenvolvido e da bancada para medições: Vista superior.....	59
Figura 5.2: Partes constituintes do dispositivo desenvolvido com dois módulos geradores com uma e três vigas respectivamente, e um módulo reserva para expansão do gerador.....	60
Figura 5.3: Módulos reserva e módulo gerador 2 com três vigas totalizando seis elementos piezoelétricos.....	60
Figura 5.4: Sinal de tensão em circuito aberto, com frequência de rotação do motor em 28 Hz para os dois elementos piezoelétricos do módulo gerador 1.....	61
Figura 5.5: Sinal de tensão em circuito aberto, com frequência de rotação do motor em 15 Hz para os seis elementos piezoelétricos do módulo gerador 2.....	62
Figura 5.6: Sinal de tensão em circuito aberto, com frequência de rotação do motor em 29 Hz para os seis elementos piezoelétricos do módulo gerador 2.....	62
Figura 5.7: Tensão simulada e experimental para o módulo gerador 1.	63
Figura 5.8: Pontos de tensão máxima para G1L1.....	64
Figura 5.9: Pontos de tensão máxima para G2L1.....	64
Figura 5.10: Pontos de tensão máxima para G2L2.....	65

Figura 5.11: Pontos de tensão máxima para G2L3.....	65
Figura 5.12: Pontos com a maior tensão de pico simultânea para PZT1 e PZT2, considerando a faixa de rotação de 1 a 35 Hz.	66
Figura 5.13: Valor da tensão RMS média e desvio padrão para um conjunto de cinco aquisições do módulo gerador 1.....	67
Figura 5.14: Conexão dos terminais negativos dos transdutores piezoelétricos em uma lâmina.	67
Figura 5.15: Valor da tensão RMS gerada pelas vigas do gerador 1 e gerador 2 para as resistências de 500 Ω a 5 M Ω	68
Figura 5.16: Valor da potência gerada pelas vigas do gerador 1 e gerador 2 para as resistências de 500 Ω a 5 M Ω	68
Figura 5.17: Transdutores PZT1 e PZT2 em cada uma das vigas: (a) Interligação física dos transdutores durante a construção do dispositivo; (b) Circuito utilizado para interligação dos sinais disponibilizados pelas vigas ou transdutores piezoelétricos.	69
Figura 5.18: Simulação do circuito da Figura 45 no software PSIM: (a) Layout; (b) Resultado da simulação.....	69
Figura 5.19: Interligação dos transdutores piezoelétricos: (a) Circuito com ligação em série do sinal gerado pelas quatro vigas; (b) Layout no software PSIM para duas vigas com dois elementos piezoelétricos cada; (c) Resultado da simulação no software PSIM.....	69
Figura 5.20: Interligação dos transdutores piezoelétricos: (a) Circuito com ligação em paralelo do sinal gerado pelas quatro vigas; (b) Layout no software PSIM para duas vigas com dois elementos piezoelétricos cada; (c) Resultado da simulação no software PSIM.....	70
Figura 5.21: Interligação dos transdutores piezoelétricos: (a) Circuito com ligação mista dos elementos piezoelétricos das quatro vigas; (b) Layout no software PSIM para duas vigas com dois elementos piezoelétricos cada; (c) Resultado da simulação no software PSIM	71
Figura 5.22: Resultado experimental para interligação dos transdutores piezoelétricos utilizando a interligação das vigas em uma configuração série, paralelo, e interligação dos transdutores piezoelétricos em uma configuração mista.....	73
Figura 5.23: Utilização do módulo com o LTC3588-1 como regulador de tensão para as entradas: (a) Circuito com associação em série dos sinais gerados pelas vigas; (b) Circuito com associação em paralelo dos sinais gerados pelas vigas; (c) Circuito com associação misto....	74

Figura 5.24: comportamento da tensão RMS, corrente RMS e potência de saída do módulo utilizado como regulador de tensão para resistências conectadas à saída variando de 250 k Ω a 900 k Ω 75

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Síntese bibliográfica.....	32
Tabela 3.1: Características das lâminas.....	46
Tabela 3.2: Características dos ímãs.....	46
Tabela 3.3: Características dos transdutores.	46
Tabela 4.1: Conexão dos PZT dos geradores A e B em paralelo para o PIC255.	53
Tabela 4.2: Conexão dos PZT dos geradores A e B em paralelo para o PIC181.	53
Tabela 4.3: Conexão dos PZT dos geradores A e B em paralelo para o C64.	53
Tabela 4.4: Conexão dos PZT (PIC255) do gerador A em série, com empilhamento de duas unidades do gerador.....	54
Tabela 4.5: Conexão dos PZT (PIC181) do gerador A em série, com empilhamento de duas unidades do gerador.....	54
Tabela 4.6: Conexão dos PZT (C64) do gerador A em série, com empilhamento de duas unidades do gerador.....	55
Tabela 4.7: Conexão dos PZT (PIC 255) do gerador B em paralelo, com empilhamento de três unidades do gerador.....	55
Tabela 4.8: Conexão dos PZT (PIC 181) do gerador B em paralelo, com empilhamento de três unidades do gerador.....	55
Tabela 4.9: Conexão dos PZT (C64) do gerador B em paralelo, com empilhamento de três unidades do gerador.....	56

Lista de Siglas

b :	largura da viga (m)
c_a :	coeficiente de amortecimento viscoso ($N \cdot s/m$)
c_s :	coeficiente de amortecimento estrutural ($N \cdot s/m$)
d :	constante piezoelétrica (m/V)
D :	vetor de deslocamento elétrico (C/m^2)
E :	campo elétrico (V/m);
$g(t)$:	força que provoca o movimento de translação da viga (N)
$H(x)$:	função degrau
I :	momento de inércia por área (m^4)
L :	comprimento da viga (m)
M :	momento interno ($N \cdot m$)
$N_r(t)$:	força mecânica (N)
PVDF:	<i>Polyvinylidene Fluoride</i> - Fluoreto de Polivinilideno
PZT :	<i>Lead Zirconate Titanate</i> - Titanato-zirconato de chumbo
S :	taxa de deformação mecânica
s^E :	conformidade elástica/coeficiente elástico em um campo elétrico constante (N/m)
T :	tensão mecânica (N/m^2)
t_a :	distância da base da lâmina para o eixo neutro (m)
t_b :	distância da parte inferior da camada piezoelétrica para o eixo neutro (m)
t_c :	distância da parte superior da camada piezoelétrica para o eixo neutro (m)
t_p :	espessura da camada piezoelétrica (m)
t_{pa} :	distância da parte superior da camada piezoelétrica para o eixo neutro (m)
t_{pc} :	distância do centro da camada superior para o eixo neutro (m)
t_s :	espessura da lâmina (m)
t_{sa} :	distância da parte inferior da lâmina para o eixo neutro (m)
$w(x, t)$:	deslocamento transversal da viga (m)
$w_b(x, t)$:	movimento da base (m)
YI :	flexibilidade da seção transversal da viga
Y_S :	módulo de elasticidade da lâmina (Pa)

Y_p : módulo de elasticidade da camada piezoelétrica (Pa)

ε_0 : constante de permissividade (F/m)

ε_{33}^T : permissividade sob tensão mecânica constante (F/m)

$\eta_r(t)$: coordenada modal

$\phi_r(x)$: autofunção normalizada da massa

$\delta(x)$: função impulso

Resumo

Este trabalho apresenta um gerador rotacional com transdutores piezoelétricos do tipo cerâmico aplicado à colheita de energia, constituído por uma parte móvel (similar a um rotor) em que estão dispostos ímãs, e uma estrutura circular (similar a um estator) com lâminas engastadas igualmente espaçadas nas quais foram colados transdutores piezoelétricos próximo à região de engaste, e ímãs em sua extremidade livre. A estrutura física desenvolvida, com partes plásticas em ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), apresenta flexibilidade com relação à quantidade de lâminas, elementos piezoelétricos, empilhamento de módulos geradores, e mantém os transdutores piezoelétricos sem contato direto com o ambiente externo permitindo a adaptação do dispositivo para aplicações práticas. Um modelo analítico utilizando uma solução eletromecânica para um sistema com uma viga engastada submetida a uma força harmônica na extremidade livre foi analisado utilizando o *software* Matlab. O protótipo desenvolvido é composto por dois módulos geradores, totalizando quatro vigas com dois transdutores piezoelétricos do tipo PZT (C-64) em cada, e funcionou aproximadamente por 670 horas, sem sinais de desgastes. Uma bancada experimental foi desenvolvida para análise do comportamento do gerador proposto, com acionamento do gerador por meio de um motor acoplado ao seu eixo com velocidade de rotação de 1 Hz a 35 Hz. Os sinais gerados pelas lâminas foram conectados a resistências variáveis obtendo valores de potência distintos em cada uma das lâminas, justificado pelo processo de fabricação manual. Para interligação e retificação dos sinais gerados foram desenvolvidos circuitos de condicionamento, obtendo curvas de tensão e potência em função da frequência de rotação, com potência média de 20 a 60 μW pra resistências de 250 k Ω a 900 k Ω , com a velocidade de rotação em 30 Hz. O sinal gerado também foi utilizado para alimentar um módulo regulador de tensão (com o LTC3588-1) para aplicações de colheita de energia que estabiliza a tensão fornecida pelo gerador em 1,8 V.

Palavras Chaves: Colheita de energia, Gerador rotacional, Transdutores piezoelétricos.

Abstract

Farias, Wendell. **PIEZOELECTRIC ROTATIONAL GENERATOR BASED ON ENERGY HARVESTING CONCEPT** 88 p. Report of Qualification of Thesis (Doctorate) - Academic Unit of Mechanical Engineering, Federal University of Paraiba, João Pessoa, 2022.

This work presents a rotational generator with piezoelectric transducers of the ceramic type applied to energy harvesting, consisting of a moving part (similar to a rotor) in which magnets are arranged, and a circular structure (similar to a stator) with crimped blades equally spaced. in which piezoelectric transducers were glued close to the crimping region, and magnets at its free end. The physical structure developed, with plastic parts in ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), presents flexibility regarding the number of blades, piezoelectric elements and stacking of generator modules, and keeps the piezoelectric transducers without direct contact with the external environment, allowing the adaptation of the device for practical applications. An analytical model using an electromechanical solution for a system with a cantilever beam subjected to a harmonic force at the free end was analyzed using Matlab software. The developed prototype consists of two generator modules, totaling four beams with two PZT (C-64) type piezoelectric transducers in each, and it worked for approximately 670 hours, without signs of wear. An experimental bench was developed to analyze the behavior of the proposed generator, with the generator being driven by a motor coupled to its axis with a rotation speed of 1 Hz to 35 Hz. The signals generated by the blades were connected to variable resistors, obtaining different power values in each of the blades, justified by the manual manufacturing process, a circuit was developed for interconnection and rectification of the signals, obtaining voltage and power curves as a function of the frequency of rotation, with an average power of 20 to 60 μW for resistors from 250 k Ω to 900 k Ω , where the rotation speed was set at 30 Hz. A voltage regulator module (with the LTC3588-1) was used for energy harvesting applications that maintains the voltage supplied by the generator at 1.8 V.

Keywords: Energy harvesting, rotational generator, piezoelectric transducers.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas várias pesquisas tem sido desenvolvidas na área de colheita de energia (*energy harvesting*), que é definida por um dispositivo ou sistema, que pode captar energia de fontes correlatas ou não, por meio da diferença de temperatura, radiação da luz, campos eletromagnéticos, energia cinética e entre outros. A aplicação e o ambiente a ser instalado, geralmente define a fonte a ser utilizada (TARTAGNI, 2009) (FU, 2018) (KHAMENEIFAR, ARZANPOUR e MOALLEM, 2013) (AVIROVIK, INMAN, *et al.*, 2015) (MADHU P, 2016) (ZHANG, FANG, *et al.*, 2017) (BAI, SONG, *et al.*, 2016) (AL, 2022) (ZOU H, 2017) (YANG Z, 2018).

A manufatura de estruturas de geradores piezoelétricos (ou sistemas de colheita de energia mecânica) com impressoras 3D possibilita uma velocidade rápida de confecção, construção de dispositivos com dimensões precisas e menos intervenção humana. A Figura 1.1 mostra a distribuição da construção de dispositivos para colheita de energia mecânica no mundo (COVACI e GONTEAN, 2020).

Figura 1.1: Utilização de impressoras 3D para a construção de sistemas de colheita de energia mecânica.

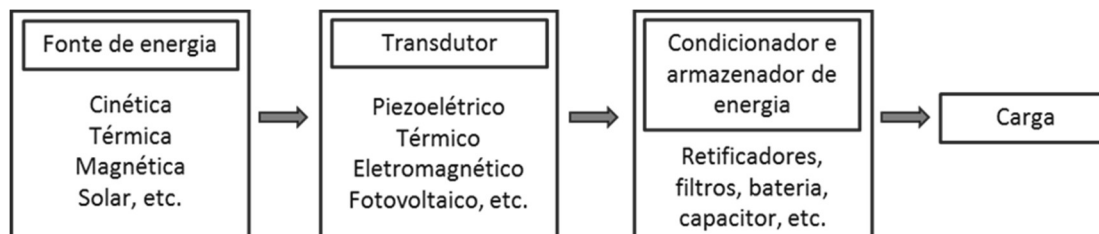


Fonte: Adaptado de (COVACI e GONTEAN, 2020).

Os sistemas de colheita de energia são formados por basicamente quatro etapas principais: a fonte de energia, geralmente dispersa no ambiente; um transdutor projetado de acordo com a fonte a ser convertida; um circuito de condicionamento e armazenamento de energia, e por fim, estas etapas atendem as especificações impostas pela carga a ser

alimentada. Na Figura 1.2 estão representadas as etapas de um sistema típico de colheita de energia (LÓPEZ, 2011).

Figura 1.2: Sistema de colheita de energia



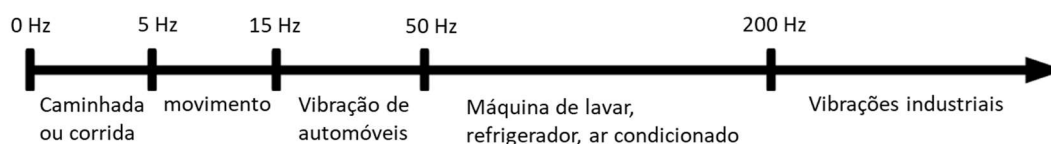
Fonte: Adaptado de (TARTAGNI, 2009).

Com a redução de energia consumida por alguns dispositivos eletrônicos, o desenvolvimento de sistemas com sensoriamento remoto em locais de difícil acesso, limitações no uso e no avanço tecnológico das baterias, a geração de energia por vibrações mecânicas, explorando diferentes princípios físicos, tem sido intensivamente investigada nos últimos anos. Dentre estes, o princípio da piezoeletricidade, que pode ser integrado à um sistema mecânico, transformando diretamente à energia mecânica em energia elétrica. Os materiais piezoelétricos possuem a característica de gerar tensões elétricas ao sofrer deformações mecânicas, e de forma inversa, sofrer deformações mecânicas ao serem submetidos a uma diferença de potencial (AVIROVIK, INMAN, *et al.*, 2015) (ZHANG, FANG, *et al.*, 2017) (CHENG, LIU, *et al.*, 2018) (ZOU H, 2017) (ZHANG L, 2022) (WANG Y, 2021) (MADHU P, 2016).

Dentre os dispositivos para colheita de energia, os eletromagnéticos competem diretamente com piezoelétricos, que possuem maior densidade de potência, não provocam geração do ruído eletromagnético, maior eficiência em faixas de potência menores e não são acometidos por sobrecargas e curtos circuitos em seus terminais (ERTURK e INMAN, 2011).

Em diversas situações pode ser possível captar energia utilizando transdutores piezoelétricos, tais como o movimento humano, vibração de estruturas, veículo ou equipamento. De acordo com (COVACI C, 2020), o nível de frequência fornecida por diferentes fontes de energia é dada pela Figura 1.3.

Figura 1.3: Nível de frequência para diferentes fontes de energia mecânica



Em relação aos materiais piezoelétricos, o tipo de aplicação define o material cujas propriedades mecânicas e elétricas são mais adequadas. Dentre eles, o PZT (Titanato Zirconato de Chumbo), possui propriedades intermediárias em relação à fadiga mecânica, e às propriedades piezoelétricas, no entanto, não consegue captar energia mecânica considerável caso sejam acopladas diretamente à estrutura sob vibração, por isso, normalmente é utilizada uma lâmina/superfície flexível sobre a qual é colado o elemento piezoelétrico (FU, 2018) (CHEN, LAW, *et al.*, 2017) (YANG, ZHOU, *et al.*, 2018) (BAI, SONG, *et al.*, 2016) (MADHU P, 2016) (CHENG, LIU, *et al.*, 2018) (FU e YEATMAN, 2017) (HABIB M, 2022) (TAO J, 2017) (RASHIDI R, 2019) (NAROLIA T, 2020) (KURT, 2017) (HE L, 2021).

Nos geradores piezoelétricos para a colheita de energia, a alteração da potência, tensão e corrente fornecida são limitadas pela estrutura mecânica do gerador, quantidade e tipo de associação (série ou paralelo) dos transdutores piezoelétricos utilizados, normalmente o pico da potência fornecida pelo dispositivo é da ordem de 10^{-6} a 10^{-3} . A estrutura do gerador deve ser compatível com a energia disponível no meio e com os dispositivos a serem alimentados, no entanto a maioria dos trabalhos têm como foco a potência de saída, não destacando a adaptação e confiabilidade do dispositivo em aplicações práticas. Embora diversas dispositivos com transdutores piezoelétricos já tenham sido desenvolvidos o desenvolvimento de novas pesquisas têm sido justificada por limitações relacionadas à aplicação que irá exigir materiais, estruturas, designs e níveis de potência distintos (FU e YEATMAN, 2017) (ZHAO, ZOU, *et al.*, 2019) (BOUZELATA Y, 2018).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta tese de doutorado é a concepção de um gerador rotacional constituído por transdutores piezoelétricos baseado no conceito de colheita de energia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a análise de um modelo analítico para comportamento de uma viga piezoelétrica engastada submetida a uma força de excitação harmônica;
- Desenvolvimento da estrutura física do gerador;
- Desenvolver bancada experimental para obtenção de resultados de tensão e potência com variações na velocidade de rotação;

- Desenvolver um circuito de retificação com alimentação de uma carga de resistiva.

1.2 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

Neste trabalho é proposto um novo design para um gerador rotacional com transdutores piezoelétricos, constituído por um eixo onde estão dispostos imãs e uma estrutura cilíndrica com lâminas metálicas engastadas igualmente espaçadas para as quais foram dispostos elementos piezoelétricos (PZT do tipo *unimorph*) em uma extremidade, sendo as lâminas acionadas pela força magnética induzida em imãs dispostos na outra extremidade das lâminas. O funcionamento do gerador ocorre pelo acionamento do eixo acoplado a uma máquina ou eixo rotativo ou atuando como um aerogerador. Entre as principais contribuições dessa nova abordagem estão: a) as vigas com os elementos piezoelétricos e imãs permanecem condicionados dentro de uma estrutura cilíndrica (que já é parte do próprio gerador) com tampa, o que permite a redução de interferências externas ao funcionamento do sistema e o torna viável para aplicação prática; b) para aumento da potência disponível podem ser adicionados ao eixo outros módulos geradores, com cada módulo gerador comportando cerca de seis transdutores piezoelétricos, considerando um diâmetro de 15 cm e um deslocamento da viga de 10 mm; c) o trabalho propõe alguns circuitos para a conexão em série e em paralelo de n elementos piezoelétricos cujas tensões apresentam fases iniciais distintas.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto da proposta de tese está organizado da seguinte forma, no Capítulo 2 são apresentados os conceitos relativos aos transdutores piezoelétricos e apresentação da revisão bibliográfica, com os trabalhos mais relevantes para o desenvolvimento da tese. No Capítulo 3 é descrita uma revisão de um modelo matemático presente na literatura e a metodologia e caracterização do gerador rotacional desenvolvido, no Capítulo 4 os resultados de simulação utilizado o *software* Matlab®, no Capítulo 5 os resultados experimentais e no Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais.

2 GERADORES COM TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS APLICADOS À COLHEITA DE ENERGIA

Neste capítulo será apresentado os conceitos sobre os transdutores piezoelétricos e as características dos principais geradores piezoelétricos descritos na literatura. Os geradores baseados em transdutores piezoelétricos para colheita de energia são dispositivos que transformam a energia de vibração, pressão ou deformação em tensão elétrica. A colheita de energia por meio de gerador rotacional tem a característica de ter uma frequência aleatória e necessita que o gerador seja acoplado à uma estrutura girante, tendo suas dimensões associadas à potência de saída e forma de acoplamento.

2.1 TRANSDUTORES PIEZOELÉTRICOS

O transdutor piezoelétrico apresenta o efeito piezoelétrico direto e reverso. O efeito direto corresponde a indução de um campo elétrico quando o material é deformado por pressão, vibração ou força. No efeito reverso ocorre uma deformação mecânica quando o material é submetido a um campo elétrico.

A piezoeletricidade está presente em diversos materiais: cristais, semicondutores, cerâmicos, polímeros e compósitos. Os cristais são utilizados para aplicações em osciladores, tendo elevada estabilidade térmica, e fator de qualidade mecânica. Os cerâmicos, normalmente constituídos por Titanato Zirconato de Chumbo (PZT) ou Titanato de Bário, apresentam limitações às deformações, e variação de suas propriedades eletromecânicas com a temperatura e o tempo, no entanto possuem um alto coeficiente piezoelétrico. Como alternativa para aplicações onde o elemento piezoelétrico esteja exposto a grandes deformações e/ou altas frequências são utilizados os polímeros, que são leves, flexíveis e têm um coeficiente piezoelétrico menor, quando comparado aos cerâmicos, tal como o Polifluoreto de Vinilideno (PVDF). Enquanto que o objetivo do desenvolvimento de compósitos (formado por duas ou mais fases com diferentes propriedades físicas e químicas) têm sido obter elementos com diferentes propriedades eletromecânicas, impedância acústica e flexibilidade mecânica, compatível com o meio ao qual está acoplado, também

denominados de elementos do tipo *biomorph* (ABELKFI, 2012) (YANG, ZHOU, *et al.*, 2018) (HABIB M, 2022).

Uma das configurações mais comuns dos piezoelétricos, quando utilizados como geradores/captadores de energia, consiste em uma viga metálica com um transdutor piezoelétrico acoplado à sua superfície, de modo que a energia é gerada quando a viga oscila por meio de movimentos externos impostos (LOUNG e GOO, 2012), os transdutores piezoelétricos acoplados em sua superfície, se deformam, gerando assim, a potência exigida. Os motivos que levaram a configurações baseadas em vigas é que a energia convertida está intimamente relacionada com a deformação média da viga e apresenta baixas frequências de ressonância. A máxima potência é transferida quando o sistema se encontra na frequência de ressonância (NA Y, 2020).

Para um material piezoelétrico existem relações lineares entre o campo elétrico aplicado e a tensão ou deformação mecânica gerada. As expressões que descrevem um transdutor piezoelétrico (relacionam deformações mecânicas e elétricas), representadas por matrizes, podem ser descritas por:

$$S = [s^E]T + [d]E \quad (2.1)$$

$$D = [d]T + [\varepsilon^T]E \quad (2.2)$$

em que:

S : taxa de deformação mecânica;

D : vetor de deslocamento elétrico (C/m^2);

T : tensão mecânica (N/m^2);

E : vetor do campo elétrico (V/m);

s^E : coeficiente elástico (N/m);

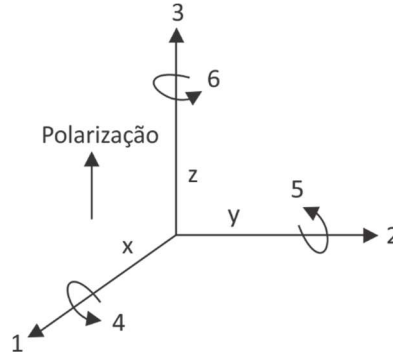
ε^T : permissividade dielétrica (F/m);

d : constante piezoelétrica (N/m).

Os sobrescritos E e T significam que as grandezas são obtidas a um campo elétrico e tensão mecânica/deformação constante, respectivamente. O efeito piezoelétrico inverso e direto são dados por (2.1) e (2.2), caracterizando a atuação do transdutor piezoelétrico como atuador e sensor, respectivamente.

As constantes piezoelétricas (d_{ij}) indicam a proporção entre a variação dimensional do material e a diferença de potencial fornecida em volts. Os subscritos (i) representam a orientação espacial da polarização do material piezoelétrico quando o campo elétrico externo for igual a zero com o sentido da excitação mecânica aplicada (j). Os índices 1 a 6 correspondem as direções indicadas na Figura 2.1.

Figura 2.1: Coordenadas utilizadas na orientação de polarização de um material piezoelétrico.



Assumindo que o material piezoelétrico foi polarizado na direção da espessura (ao longo do eixo 3), sendo isotrópico ao longo de sua seção transversal, alguns elementos das matrizes $[d]$, $[s^E]$ e $[\varepsilon^T]$ são nulos. Dessa forma a matriz d é dada por:

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

O coeficiente elástico e a permissividade dielétrica são dados por (2.4) e (2.5) respectivamente.

$$s^E = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{23} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon^T = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

As propriedades mecânicas e elétricas presentes em (2.1) e (2.2) variam de acordo com o tipo de material piezoelétrico utilizado/suas propriedades dielétrica, elástica e piezoelétrica.

As constantes piezoelétricas estão relacionadas à resposta do material piezoelétrico com diferentes posições de tensão mecânica as quais o material é submetido.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os transdutores piezoelétricos rotacionais têm sido constituídos utilizando diferentes estruturas, formatos, quantidades de vigas e tipo de material piezoelétrico. Em boa parte dos trabalhos experimentais o transdutor é excitado de forma harmônica com o transdutor atuando no modo ressonante/frequência natural para obtenção da máxima tensão de saída. Em alguns casos a frequência natural é elevada de forma que não é possível obter a partir do ambiente.

Em (PRIYA, 2005) foi desenvolvido um gerador piezoelétrico rotacional para geração de energia a partir da energia eólica (conforme a Figura 2.2), foram utilizados 12 elementos piezoelétricos ($60 \times 20 \times 0,6 \text{ mm}^3$), com frequência de ressonância de 65 Hz e capacitância de 170 nF. A energia do vento é convertida em rotações e uma força oscilatória é aplicada nos elementos piezoelétricos (do tipo *biomorph*) por meio do impacto direto das lâminas com as travas dispostas no eixo. Os valores de resistência foram variados de 0 Ω a 1 k Ω para observação da potência máxima, com a velocidade de rotação em 6 Hz, após um circuito retificador de onda completa que foi de 0,935 mW para um elemento piezoelétrico conectado a uma carga de 120 k Ω e de 10,2 mW para 11 elementos conectados com uma carga de 4,6 k Ω . A impedância que possibilita a máxima transferência de potência depende de vários parâmetros incluindo a capacitância do circuito equivalente do elemento piezoelétrico, a mudança de capacitância durante o esforço mecânico, fator de perda dielétrica, impedância do circuito retificador e devido à montagem estrutural, desprezando esses fatores a impedância pode ser calculada por obtida por $1/\omega C$.

Em (KARAMI, FARMER e INMAN, 2013) foi desenvolvido um gerador piezoelétrico não linear rotacional na Figura 2.3 para aplicações de baixa velocidade do vento. Com dimensões de $80 \times 80 \times 175 \text{ mm}^3$, o gerador alcança potências RMS da ordem de 4 mW por lâmina (com o sinal de saída sem retificação) para a velocidade do vento igual ou maior do que 2 m/s. As especificações do gerador são: transdutores PZT – 5A *biomorphs* da *Piezosystems Inc*, $12,7 \times 0,38 \text{ mm}^2$, ímãs de $12,7 \times 6,35 \times 6,35 \text{ mm}^3$ (para o design tangencial) e $6,35 \times 6,35 \times 6,35 \text{ mm}^3$ (para o design radial), com densidade de fluxo remanente de 1,25 T. Em todos os

experimentos a carga teve um valor fixo de 247 k Ω , obtida por $1/\omega C$, em que ω é a frequência de ressonância da viga determinada aproximadamente com o uso de um medidor de vibração a laser, e C a capacitância do transdutor PZT.

Figura 2.2: Estrutura do aerogerador proposto em Priya *et. al* (2005): (a) Localização dos atuadores do tipo *biomorph*; (b) Vista lateral.

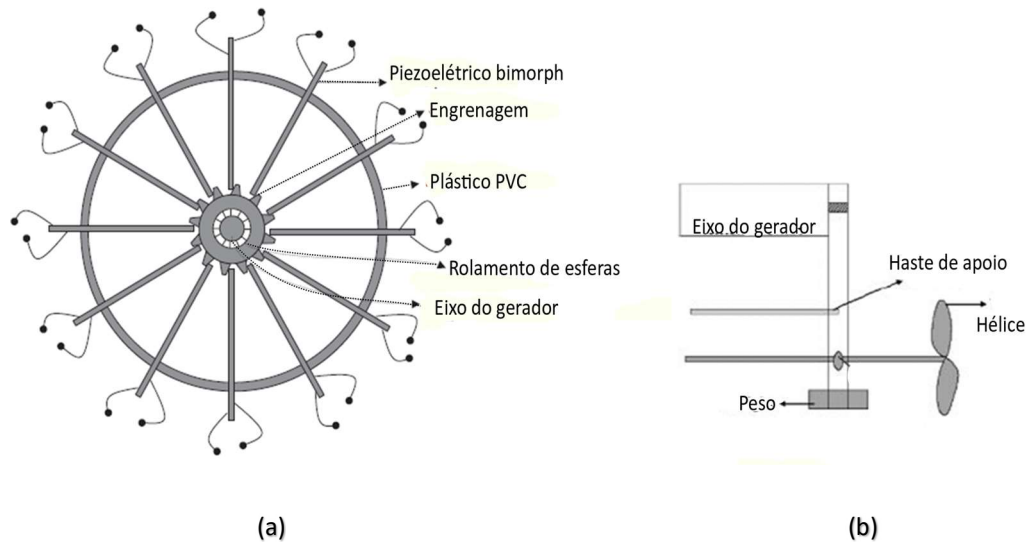
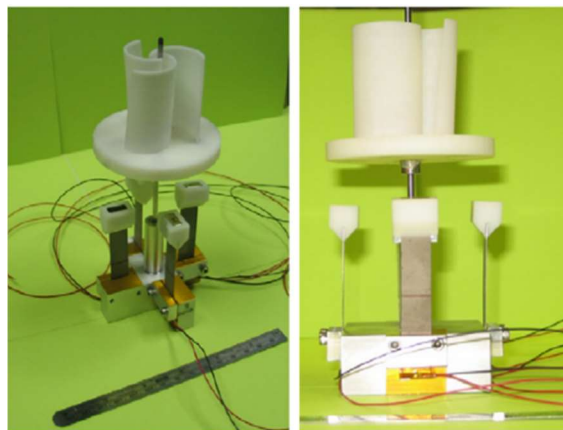


Figura 2.3: Configuração tangencial e radial do gerador proposto em Karami *et. al* (2013).



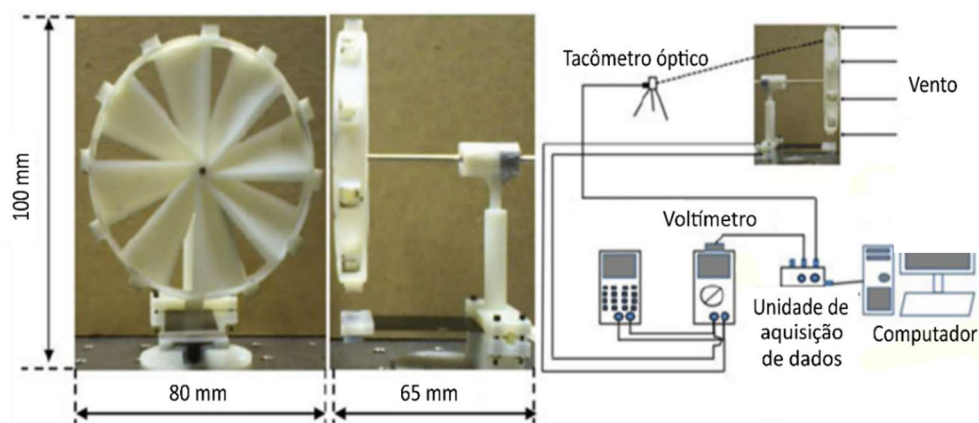
Fonte: Karami *et. al* (2013).

(KHAMENEIFAR; ARZANPOUR; MOALLEM, 2013) utilizaram vigas com uma massa em sua extremidade e uma camada com elemento piezoelétrico (foram utilizados os tipos PZT e PVDF) acoplada a um eixo rotativo perpendicular à direção da gravidade, induzindo vibração mecânica na viga devido à força gravitacional gerada pela massa. O dispositivo que teve apenas as dimensões da viga especificada, empregando o elemento PZT de 50,8 x 38,1 x 0,13 mm³ (em uma viga medindo 50,8 x 38,1 x 0,5 mm³ e uma massa na sua extremidade de 105

g), funcionando a uma rotação de 138 rad/s foi capaz de gerar 6,4 mW de potência (provavelmente RMS, mas o autor não deixa claro no texto) com uma carga resistiva de 40 k Ω (sem retificação do sinal de saída). A máxima potência foi obtida identificando a frequência natural, para isto foi elevada gradualmente a velocidade de rotação do eixo de 0 rad/s a 150 rad/s e medida a tensão sobre uma carga resistiva arbitrária. Após a identificação de uma frequência natural, foi feita uma variação na carga resistiva para obter a máxima transferência de potência.

Em (KISHORE, VUCKOVIC e PRIYA, 2014) é descrito um aerogerador que utiliza elementos piezoelétrico para captação de energia conforme a Figura 2.4, aplicado a situações com baixa velocidade do vento, no qual para o início de geração de energia nas velocidades propostas é necessário que as pás do gerador sejam postas em movimento por algum mecanismo externo. Foram utilizados 8 imãs de 3,175 x 3,175 x 3,175 mm³, espaçados igualmente, sendo o rotor composto por 1 vigas de 60 x 20 x 0,7 mm³ localizada próximo à base do gerador. Para o gerador proposto, a frequência de oscilação das vigas aumenta com a elevação da velocidade do vento, provocando um aumento com posterior redução na tensão de saída em circuito aberto para a faixa de velocidade de 0,85 m/s a 2,01 m/s. Utilizando algumas velocidades entre 1,07 m/s e 2,01 m/s foi variada a resistência conectada à saída, obtendo para o valor de 9 k Ω , com a velocidade do vento em 1,88 m/s, a maior potência de saída com valor de 450 μ W. Um circuito dobrador de tensão com dois diodos schottky foram utilizados para aumento da tensão de saída e utilização de um circuito de gerenciamento BQ25504 da Texas Instruments que alterna entre disponibilizar tensão em uma saída e armazenar tensão em um capacitor.

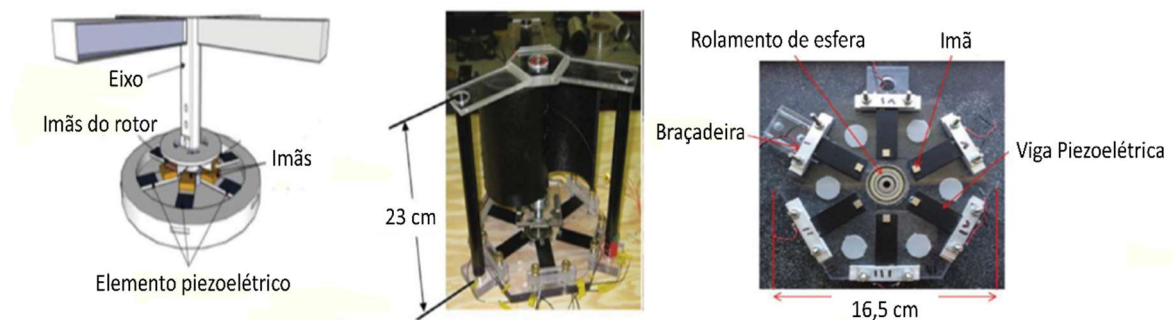
Figura 2.4: Estrutura do aero gerador e configuração experimental proposto em Kishore *et. al* (2014).



Fonte: Kishore *et. al* (2014).

Em (AVIROVIK, INMAN, *et al.*, 2015) é descrito um aerogerador que utiliza elementos piezoelétricos para captação de energia, com dimensões das vigas dos transdutores piezoelétricos do tipo *bimorph*, de $47,5 \times 20,2 \times 0,57 \text{ mm}^3$, e dimensões dos ímãs: $6,35 \times 6,35 \times 2,54 \text{ mm}^3$, conforme a Figura 2.5. Para caracterização do gerador foi utilizado conectado a cada um dos seis elementos piezoelétricos individuais, um circuito dobrador de tensão com dois diodos schottky com uma carga resistiva pura em vez de uma bateria ou capacitor. A saída de cada um dos sinais retificado foi conectado em paralelo. Utilizando velocidades entre 1,0 m/s e 4,4 m/s foi variada a resistência conectada à saída, obtendo para o valor de 100 k Ω , com a velocidade do vento em 4,4 m/s, a maior potência de saída com valor de 0,75 mW, para um elemento piezoelétrico. A potência obtida para o conjunto dos seis sinais gerados após o retificador conectados em paralelo, tendo como carga o resistor de 100 k Ω , foi de aproximadamente 80% da soma das saídas individuais.

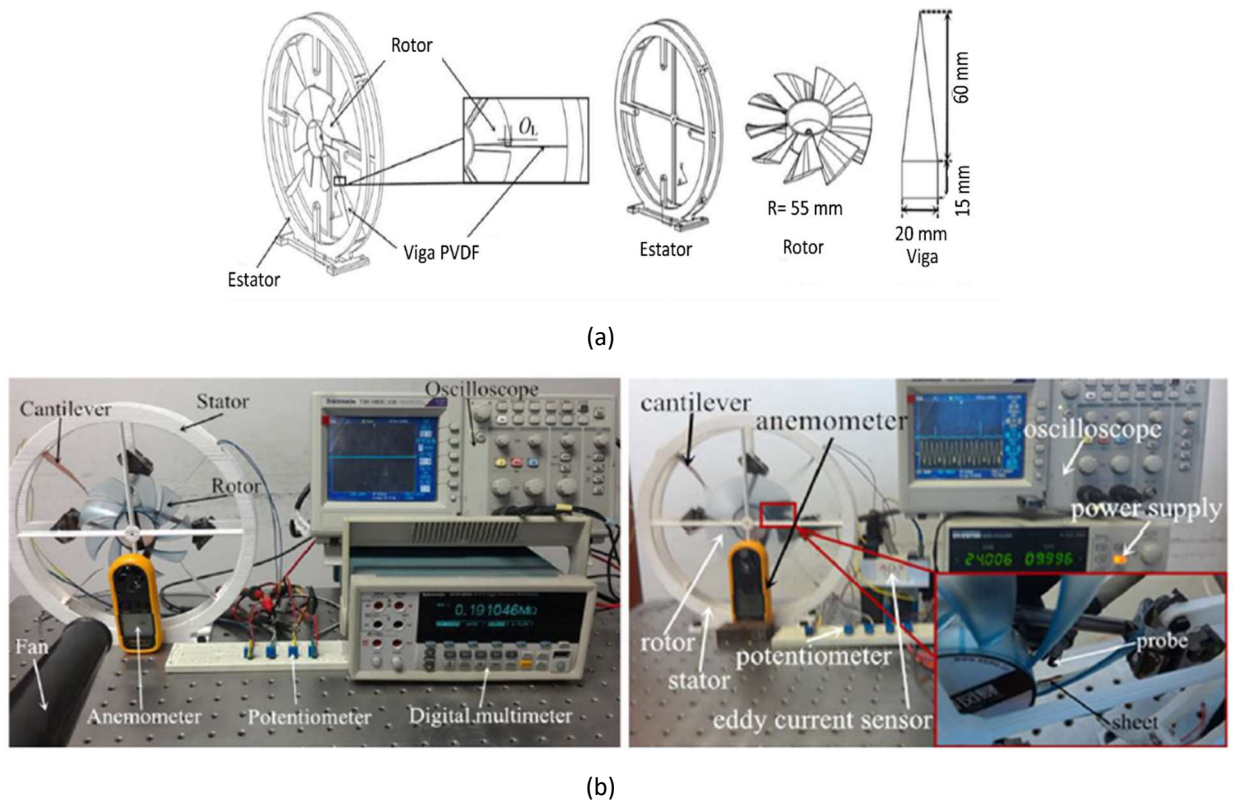
Figura 2.5: Estrutura do gerador e disposição dos transdutores proposto em Avirovik *et. al* (2015).



Fonte: Avirovik *et. al* (2015).

Em (BAI, SONG, *et al.*, 2016) foi proposto um aero gerador com material piezoelétrico a base PVDF, induzido por impacto, consistindo em um estator e um rotor com quatro vigas PVDF, com espessura de 0,05 mm, distribuídas de forma circular, que utiliza o impacto periódico das pás do rotor na extremidade das vigas para gerar energia. A resistência ótima experimental foi de aproximadamente 200 k Ω , tendo obtido a potência de aproximadamente 0,190 mW para uma viga (sem o uso de circuito para retificação do sinal de saída), com velocidade do vento em 7, 8 ou 9 m/s e o número de pás do rotor igual a 7 ou 9. A estrutura física do aerogerador e configuração experimental estão na Figura 2.6.

Figura 2.6: Aerogerador proposto em Bai et. al (2016) - (a) Estrutura física; (b) Montagem experimental.



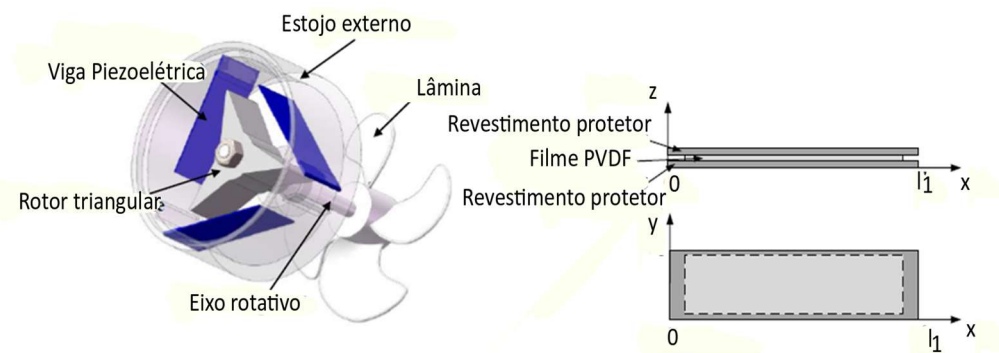
Fonte: Bai et. al (2016).

Em (RANGEL, 2017) apresenta a análise da tensão produzida por um gerador piezoelétrico constituído por uma base na qual são engastadas duas lâminas de aço (com dimensões de $60,11 \times 12,72 \times 0,15 \text{ mm}^3$) com uma massa na extremidade e oito elementos piezoelétricos (PZT C-64). Para a caracterização experimental, foram medidas as tensões geradas a partir da aceleração da base, provocada pela vibração de um shaker, de um motor de indução trifásico e de um condensador de ar. A potência máxima desenvolvida pelo gerador foi de 9,76 mW na frequência de 60 Hz, com uma carga de 15 k Ω , utilizando um shaker, sem a utilização de um circuito de retificação do sinal. O módulo para colheita de energia EH300A, que fornece um pulso de tensão após um período de carga, foi utilizado em uma aplicação prática para envio de um pacote de dados com o módulo de desenvolvimento sem fio EZ430-RF2500.

Em (ZHANG, FANG, et al., 2017) é descrito um gerador piezoelétrico, com três vigas compostas por elementos do tipo PVDF (com dimensões de $30 \times 12,5 \times 0,02 \text{ mm}^3$) com indução da vibração por impacto, para colheita de energia eólica, conforme a Figura 2.7. As dimensões dos elementos piezoelétricos e da viga são de $30 \times 12,5 \times 0,02 \text{ mm}^3$ e $41,5 \times 16,3 \times 0,2 \text{ mm}^3$ respectivamente. Uma análise da tensão eficaz de saída e da frequência de excitação

da viga foi realizada e proposto um método para ajuste da frequência de vibração da viga, sem a necessidade de manter a frequência de excitação próximo à de ressonância do gerador. A tensão máxima eficaz obtida foi de 160,2 V, com potência de 2,56 mW, com a velocidade do vento em 14 m/s. O autor não especificou a resistência ou impedância utilizada e não fez uso de um circuito para retificar o sinal de saída.

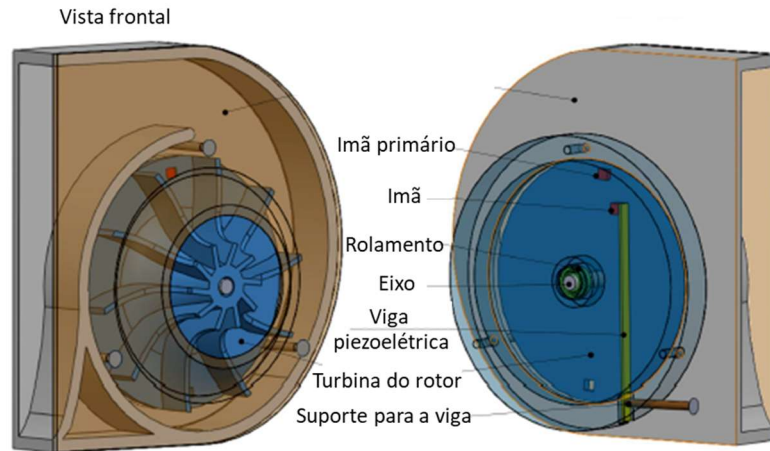
Figura 2.7: Configuração do gerador e estrutura das vigas proposto em Zhang *et. al* (2017).



Fonte: Zhang *et. al* (2017).

Em (FU e YEATMAN, 2017) e (FU, 2018) apresentam um gerador rotacional com transdutor piezoelétrico do tipo *biomorph*, fixado em uma viga com um ímã em sua extremidade, disposta em uma estrutura estacionária, para atuação em baixas frequência de rotação, conforme a Figura 2.8. O fluxo de ar aciona a turbina do rotor que atua sobre a viga piezoelétrica uma vez por rotação. A excitação/acoplamento magnético entre o ímã da viga e o ímã acoplado à estrutura do eixo permite que o rotor gire em baixas velocidades enquanto a viga pode se manter operando na frequência de ressonância (característica que normalmente é destacada para os geradores rotacionais). O autor destaca o design e a utilização do modelo analítico de (ERTURK e INMAN, 2011), que considera a influência da massa do ímã sobre a extremidade da viga, esta influência é desprezada em um outro modelo do mesmo autor (ERTURK e INMAN, 2008), adaptado com a substituição de uma força de excitação da base por uma força de excitação magnética. Em uma dada frequência para análise eletrodinâmica do dispositivo e validação do modelo teórico é feito um ajuste de acordo com os dados experimentais obtidos. As dimensões do dispositivo e da viga são de 47 x 42 x 27 mm³ e 26,5 x 15 x 0,1 respectivamente, com pico de potência em 159 μW para uma carga resistiva de 270 kΩ. O autor não fez uso de um circuito para retificar o sinal de saída.

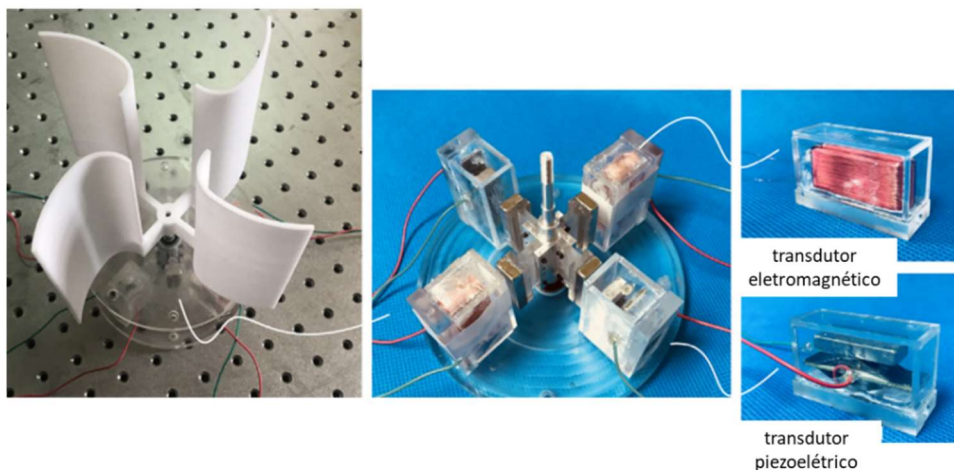
Figura 2.8: Estrutura do gerador rotacional proposto em Fu (2018).



Fonte: Fu (2018).

Em (ZHAO, ZOU, *et al.*, 2019), os autores propuseram um gerador de energia elétrica híbrido (com transdutores piezoelétricos e eletromagnéticos) à prova chuva acionado pelo vento, conforme a Figura 2.9. O gerador é composto por quatro ímãs fixados em um eixo rotativo, um par de transdutores constituídos por bobinas para captação de energia eletromagnética e um par de transdutores constituído por duas camadas de metal flextencional (com as dimensões de $40 \times 10 \times 0,25 \text{ mm}^3$) com um PZT no interior e um ímã fixado na parte exterior. Os sinais gerados pelos quatro transdutores estão em fase, obtendo o valor máximo para potência média de 1,218 mW. O trabalho propõe uma análise da adaptabilidade ao ambiente e na confiabilidade do dispositivo, apresentando um dispositivo pronto para aplicação cujo tempo de testagem apresentado foi de 200 horas.

Figura 2.9: Estrutura do gerador rotacional proposto em Zhao (2019).



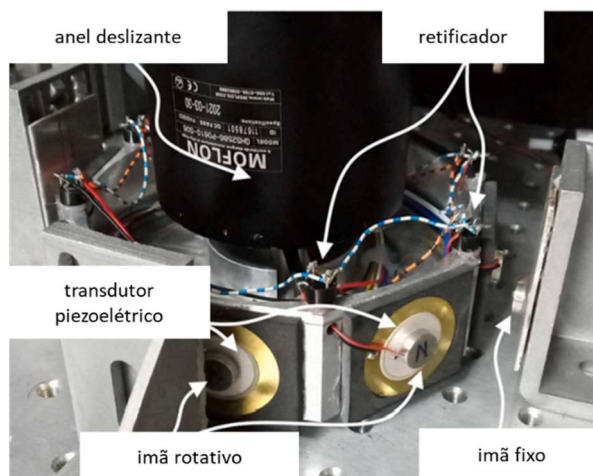
Fonte: Zhao (2019).

Em (OZDEMIR, 2019), para maximizar a potência gerada com mais de um transdutor piezoelétrico, é proposta uma topologia utilizando diodos schottky e capacitores para retificação da tensão e agrupamento de mais de um transdutor piezoelétrico, fornecendo uma saída com a soma das tensões individuais. Tendo em vista que cada elemento piezoelétrico pode se comportar como uma fonte de tensão não ideal, de forma que não é viável conectá-los diretamente em série ou paralelo.

Em (SILVA, 2020) e (SILVA, 2021), foi caracterizado um gerador piezoelétrico constituído por três lâminas de aço (engastadas em uma estrutura fixa), cada uma com dois elementos piezoelétricos (PZT C-64) e um ímã de neodímio. A atuação dos elementos piezoelétricos é provocada pela interação magnética entre o ímã da lâmina (com dimensões de $16 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$) e três ímãs localizados em um eixo rotativo, defasados de 120° . O protótipo tem as dimensões de $84,5 \times 87 \times 20 \text{ mm}^3$, com as lâminas medindo $60 \times 13 \times 0,15 \text{ mm}^3$. A análise numérica envolvendo o tamanho do elemento piezoelétrico, do ímã e da lâmina de aço foi realizada. Resultados experimentais apresentaram a tensão gerada por elementos piezoelétricos do tipo PZT C-64 colados em diferentes posições da lâmina, com cada lâmina contendo dois transdutores piezoelétricos. Os seis transdutores piezoelétricos foram conectados em paralelo com uma resistência de $180 \text{ k}\Omega$, obtendo o valor máximo de tensão e potência de pico a pico de $21,6 \text{ V}$ e $3,78 \text{ mW}$ respectivamente.

(RIZAL, 2022) apresentou um gerador rotacional piezoelétrico conforme a Figura 2.10 com os transdutores piezoelétricos acoplados à uma estrutura rotatória com vibração induzida pela interação magnética entre os ímãs localizados sobre os transdutores e em uma estrutura fixa em volta dos transdutores piezoelétricos. O autor utilizou oito transdutores piezoelétricos com um circuito para retificação e conexão dos sinais gerados em série e paralelo, no entanto o circuito utilizado não foi especificado no trabalho. A potência máxima RMS obtida foi de $870 \text{ }\mu\text{W}$ com uma resistência de aproximadamente $2 \text{ k}\Omega$. As dimensões do dispositivo não foram informadas.

Figura 2.10: Estrutura do gerador rotacional proposto em Muhammad Rizal (2022).



Fonte: Rizal (2022).

Neste trabalho é proposto um gerador rotacional com transdutores piezoelétricos do tipo PZT colados nas duas faces (com conexão elétrica entre as faces) de vigas engastadas em uma estrutura circular (similar a um estator), com ímãs em sua extremidade livre, e ímãs localizados em um eixo (similar a um rotor). O processo de fabricação das vigas, com a colagem de transdutores piezoelétricos em lâminas de aço, foi similar ao desenvolvido nos trabalhos de (RANGEL, 2017) e (SILVA, 2020). O movimento relativo entre o rotor e o estator produz a vibração das lâminas e atuação dos elementos PZT. O gerador apresenta estrutura física flexível, em que podem ser conectadas até seis vigas, para um deslocamento máximo da viga de 10 mm, por módulo gerador, com diâmetro de 15 cm. Vários módulos do gerador podem ser acoplados em cascata para aumento da potência disponível, podendo ser instalado em qualquer dispositivo/equipamento rotatório para a colheita de energia, com boa adaptação à ambientes com poeira e umidade devido ao condicionamento das vigas com elementos piezoelétricos dentro da estrutura física confeccionada material termoplástico (Acrilonitrila Butadieno Estireno - ABS). Alguns circuitos de retificação foram propostos para a interligação dos sinais dos elementos piezoelétricos do gerador (em série e paralelo) que se caracterizam por ser alternados com fases distintas. O gerador desenvolvido neste trabalho foi implementado/confeccionado com dois módulos geradores acoplados, um deles com uma viga e o outro com três vigas, correspondendo a um total de oito elementos piezoelétricos. O sinal tensão gerado pelos elementos piezoelétricos foi utilizado para alimentação de cargas de corrente contínua e do circuito regulador de tensão para aplicações em colheita de energia LTC3588.

2.3 SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA

Um resumo da revisão de literatura com os principais trabalhos relacionados é apresentado na Tabela 2.1. As características e limitações são utilizadas para fins comparativos.

Tabela 2.1: Síntese bibliográfica.

Autores	Dimensões das vigas (mm ³)	Dimensões do dispositivo (mm ³)	Potência (mW)	Densidade potência (μW/mm ³)	Características	Limitações/Críticas
(PRIYA, 2005)	(60 x 20 x 0,5) x 11 vigas	-	10,2	1,5455	Gerador piezoelétrico rotacional; A energia do vento é convertida em rotações; Elementos piezoelétricos (do tipo <i>biomorph</i>); Utiliza o impacto direto das lâminas com as travas dispostas no eixo.	Maior desgaste das lâminas devido ao impacto direto Não permite empilhamento entre módulos geradores Transdutores piezoelétricos em contato direto com o ambiente.
(KISHORE, VUCKOVIC e PRIYA, 2014)	(60 x 20 x 0,7) x 1 viga	100 x 80 x 65	0,45	0,5357	Gerador rotacional que utiliza uma viga piezoelétrica do tipo <i>biomorph</i> ; Aplicado a situações com baixa velocidade do vento; Um circuito dobrador de tensão com diodos schottky foi implementado.	Não permite empilhamento entre módulos geradores Transdutores piezoelétricos em contato direto com o ambiente.
(AVIROVIK, INMAN, et al., 2015)	(47,5 x 20,2 x 0,57) x 6 vigas	230 x 165 x 165	0,75	0,2286	Gerador rotacional que utiliza seis vigas piezoelétricas do tipo <i>biomorph</i> ; Conexão em paralelo dos sinais gerados pelos transdutores após circuito de retificação com queda de tensão de 20%.	Não permite empilhamento entre módulos geradores Transdutores piezoelétricos em contato direto com o ambiente.
(BAI, SONG, et al., 2016)	(((10 x 60) + (20 x 15)) x 0,05) x 4 vigas	-	0,190	1,0556	Gerador rotacional que utiliza quatro vigas piezoelétricas do tipo <i>biomorph</i> ; Utiliza o impacto periódico das pás do rotor na extremidade das vigas para gerar energia.	Maior desgaste das lâminas devido ao impacto direto Não permite empilhamento entre módulos geradores Transdutores piezoelétricos em contato direto com o ambiente.
(ZHANG, FANG, et al., 2017)	(41,5x 16,3 x 0,2) x 3 vigas	-	2,56	18,922	Gerador rotacional piezoelétrico com três vigas do tipo <i>biomorph</i> ; Análise das frequências de vibração da viga; Utiliza o impacto direto do eixo sobre as vigas.	Maior desgaste das lâminas devido ao impacto direto Não permite empilhamento entre módulos geradores Transdutores piezoelétricos em contato direto com o ambiente.

(RANGEL, 2017)	(60,11 x 12,72 x 0,15) x 2 vigas	-	9,76	42,55	Gerador piezoelétrico constituído por uma base na qual são engastadas duas lâminas de aço com uma massa na extremidade e oito elementos piezoelétricos (PZT C-64).	Transdutores piezoelétricos em contato direto com o ambiente com pouca estrutura para acomodação dos transdutores.
(FU, 2018)	(26,5 x 15 x 0,2) x 1 viga	47 x 42 x 27	0,159	4	Gerador rotacional que utiliza uma viga piezoelétrica do tipo <i>biomorph</i> ; Mantém a viga operando na frequência de ressonância com baixa velocidade de rotação do rotor.	Estrutura física não possibilita a utilização de mais transdutores piezoelétricos Não permite empilhamento entre módulos geradores
(ZHAO, ZOU, et al., 2019)	(40 x 10 x 0,25) mm ³ x 2 vigas 10000 mm ³ x duas bobinas	-	1,2178	-	Gerador de energia rotacional híbrido (com transdutores piezoelétricos e eletromagnéticos) à prova chuva; Utilização de viga piezoelétrica com material flexensional; O trabalho propõe uma análise da adaptabilidade ao ambiente e na confiabilidade do dispositivo, apresentando um dispositivo pronto para aplicação.	A estrutura física não permite a expansão de módulos do gerador ou o acoplamento de mais transdutores
(OZDEMIR, 2019)	-	-	-	-	Topologia utilizando diodos schottky e capacitores para retificação da tensão e interligação de mais de sinal de transdutores piezoelétricos com fases distintas	
(SILVA, 2021)	(60 x 13 x 0,15) x 3 vigas	84,5 x 87 x 20	3,78 (valor de pico a pico)	-	Gerador rotacional que utiliza três vigas piezoelétricas do tipo <i>unimorph</i> , com dois transdutores PZT C-64 cada; Utilização de um ímã com a dimensão de 16 x 10 x 4 mm ³ colado à viga que induz a uma maior amplitude de deslocamento;	A estrutura física não permite a expansão de módulos do gerador Transdutores piezoelétricos em contato direto com o ambiente.

3 MODELO ANALÍTICO

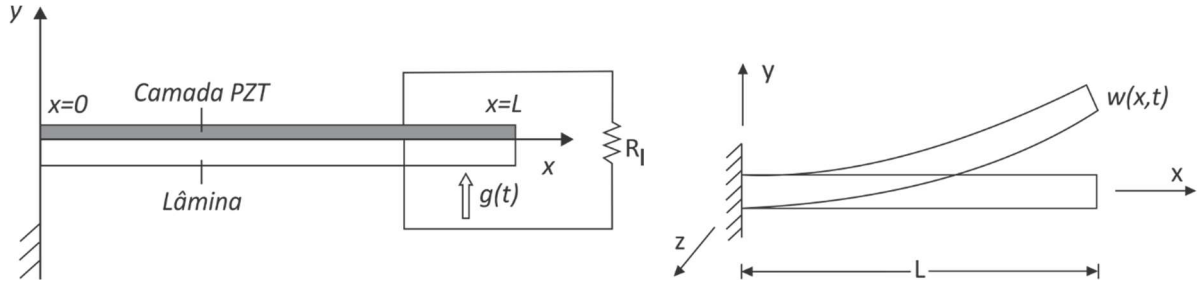
Em um gerador baseado em colheita de energia, um modelo matemático próximo da realidade permite realizar previsão da saída elétrica, e otimizar o gerador para a máxima potência de saída em uma dada entrada. Neste capítulo será descrita a modelagem analítica utilizada para obter os valores de tensão, potência, resposta em frequência, a metodologia e análise da caracterização do gerador rotacional desenvolvido, baseado no modelo analítico descrito em (ERTURK e INMAN, 2008). O modelo considera que a força de excitação é harmônica, sendo constituída por uma componente de rotação e outra de translação, a componente de rotação foi desconsiderada por não ser característica do sistema proposto neste trabalho.

3.1 MODELO ELETROMECAÂNICO

O modelo utilizado é baseado nas considerações da viga de Euler-Bernoulli, para o qual a viga possui seção transversal constante, com comprimento longitudinal como dimensão predominante. Os deslocamentos transversais na direção do eixo z são associados às rotações em torno do eixo y . As ações de movimento possíveis devem manter as seções planas em relação ao eixo x da viga e fazem com que em cada seção transversal x ocorra um deslocamento vertical rígido $v(x)$ constante em todos os pontos da seção transversal.

O modelo a ser descrito pode ser utilizado para prever o comportamento mecânico e elétrico da viga submetida a uma força na extremidade livre, conforme é apresentada na Figura 3.1, em que L , m e YI representam o comprimento da viga, a massa por unidade de comprimento e características da viga respectivamente. A viga é composta por uma lâmina e uma camada formada por um transdutor piezoelétrico, sendo a largura dada por b . O amortecimento mecânico da viga é expresso como uma combinação da taxa de deformação e do amortecimento viscoso.

Figura 3.1: Configuração do gerador para uma viga.



O eixo neutro, região onde não existe compressão ou distensão da viga durante seu deslocamento, é calculado antes de serem calculadas as características da viga. Na localização do eixo neutro, a lâmina (superfície onde é fixado o elemento piezoelétrico) e a camada com o elemento piezoelétrico são transformados em um único material. O módulo de elasticidade (Young) da lâmina é maior do que o da camada piezoelétrica. Quando a seção transversal é transformada em uma seção contendo apenas uma camada piezoelétrica, a largura da lâmina é aumentada por um fator η , dado pela relação de elasticidade entre os dois materiais:

$$\eta = \frac{Y_s}{Y_p}, \quad (3.1)$$

em que Y_s e Y_p são o módulo de elasticidade da viga e da camada piezoelétrica respectivamente. Na Figura 3.2 é apresentada a seção transversal da viga, sendo t_s , t_p a espessura da lâmina e da camada piezoelétrica respectivamente, e b a largura da viga. Na seção transversal equivalente, que consiste de apenas uma camada, t_{sa} é a distância da parte inferior da lâmina para o eixo neutro,

$$t_{sa} = \frac{nt_s^2 + 2t_st_p + t_p^2}{2(nt_s + t_p)}. \quad (3.2)$$

A distância da parte superior da camada piezoelétrica para o eixo neutro, t_{pa} , e do centro da camada superior para o eixo neutro, t_{pc} , é dada por:

$$t_{pa} = \frac{nt_s^2 + 2nt_st_p + t_p^2}{2(nt_s + t_p)}, \quad (3.3)$$

$$t_{pc} = \frac{nt_s(t_p + t_s)}{2(nt_s + t_p)}. \quad (3.4)$$

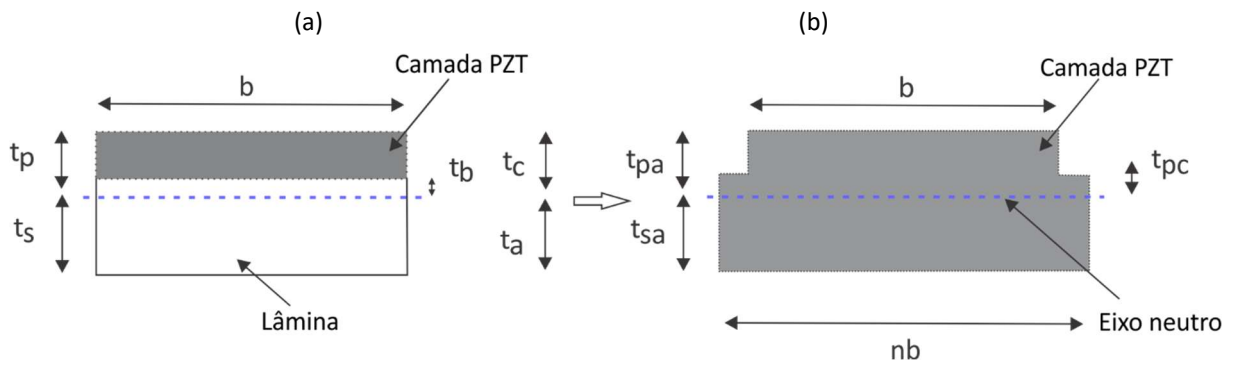
Os limites da viga são definidos com relação a t_a , que é a distância da base da lâmina para o eixo neutro. t_b e t_c é a distância da parte inferior e superior da camada piezoelétrica para o eixo neutro respectivamente.

$$t_c = t_{pa}, \quad (3.5)$$

$$t_b = t_{pa} - t_p, \quad (3.6)$$

$$t_a = -t_{sa}. \quad (3.7)$$

Figura 3.2: a. Seção transversal original para a viga constituída por dois tipos de materiais; b. Viga consistindo de apenas um material, o material PZT.



A equação mecânica para o movimento com acoplamento elétrico para o caso em que são considerados o amortecimento viscoso e estrutural, obtida por meio da segunda lei de Newton, sendo $w(x, t)$ o deslocamento transversal de qualquer ponto do eixo neutro relativo a base, é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} + c_s I \frac{\partial^5 w(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} \\ = -m \frac{\partial w_b(x, t)}{\partial t^2} - c_a \frac{\partial w_b(x, t)}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Em que $w_b(x, t)$ é o movimento da base, representado por um deslocamento transversal, M é o momento interno, I o momento de inércia por área, c_s o coeficiente de amortecimento estrutural e c_a o amortecimento viscoso. O amortecimento viscoso representa o atrito entre a viga e o ar, enquanto o estrutural (taxa de deformação) ocorre devido ao atrito interno entre os planos do material quando a viga é deformada.

As relações constitutivas dos elementos piezoelétricos relacionam a tensão mecânica com o campo elétrico, por meio de:

$$T_{S1} = Y_S S_{S1}, \quad (3.9)$$

$$T_{P1} = Y_P (S_{P1} - d_{31} E_3), \quad (3.10)$$

em que T é a tensão mecânica, S a deformação mecânica, Y o módulo de elasticidade (Young), d a constante piezoelétrica e E o campo elétrico. Os subscritos S e P indicam que a variável está relacionada à camada da lâmina e à piezoelétrica respectivamente. A expressão (3.10) é obtida por meio da relação constitutiva dada por:

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3, \quad (3.11)$$

em que s_{11}^E é a conformidade elástica em um campo elétrico constante, sendo o inverso de Y_P .

O momento interno atuando sobre a viga pode ser obtido integrando o primeiro momento de distribuição da tensão mecânica:

$$M(x, t) = - \int_{t_a}^{t_b} T_{S1} b y dy - \int_{t_b}^{t_c} T_{P1} b y dy, \quad (3.12)$$

em que, b é a largura da viga, t_a , t_b e t_c as distâncias dadas na Figura 13.

Substituindo (3.9) e (3.10) em (3.12)

$$M(x, t) = - \int_{t_a}^{t_b} Y_S S_1 b y dy - \int_{t_b}^{t_c} Y_P (S_1 - d_{31} E_3) b y dy. \quad (3.13)$$

A deformação é dada por $S_1 = -y \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2}$, obtendo a partir de (3.13),

$$\begin{aligned} M(x, t) = & \int_{t_a}^{t_b} Y_S b \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} y^2 dy + \int_{t_b}^{t_c} Y_P b \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} y^2 dy \\ & - \int_{t_b}^{t_c} v(t) Y_P b \frac{d_{31}}{t_p} y dy. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Onde o campo elétrico uniforme foi escrito em termos da tensão sob o PZT e da espessura t_p ($E_3(t) = -v(t)/t_p$). A expressão (3.14) pode ser reduzida a:

$$M(x, t) = YI \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} + \alpha v(t), \quad (3.15)$$

em que YI representa a flexibilidade da seção transversal constituída pelo elemento piezoelétrico e pela lâmina, dada por:

$$YI = b \left[\frac{Y_s(t_b^3 - t_a^3) + Y_p(t_c^3 - t_b^3)}{3} \right]. \quad (3.16)$$

E,

$$\alpha = -\frac{Y_p d_{31} b}{2t_p} (t_c^2 - t_b^2). \quad (3.17)$$

Para não eliminar o termo da tensão ($v(t)$) durante a diferenciação em (3.8), o segundo termo em (3.15) deve ser multiplicado por $H(x - x_1) - H(x - x_2)$, em que $H(x)$ é a função degrau, e $x_1 \leq x \leq x_2$ representa a região onde está disposta a camada piezoelétrica, dessa forma utilizando (3.15) e (3.8) é obtida a equação do movimento com acoplamento elétrico,

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(YI \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} + \alpha v(t) \times (H(x) - H(x - L)) \right) + c_s I \frac{\partial^5 w(x, t)}{\partial x^4 \partial t} \\ + c_a \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = -m \frac{\partial^2 w_b(x, t)}{\partial t^2} - c_a \frac{\partial w_b(x, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

e,

$$\begin{aligned} YI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + c_s I \frac{\partial^5 w(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} \\ + \alpha v(t) \times \left(\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x - L)}{dx} \right) = -m \frac{\partial^2 w_b(x, t)}{\partial t^2} - c_a \frac{\partial w_b(x, t)}{\partial t}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Em que $\delta(x)$ é a função impulso e,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{d^n \delta(x)}{dx^n} f(x) dx = (-1)^n \frac{d f^n(x)}{dx^n}. \quad (3.20)$$

Em termos do método de excitação, a vibração/deslocamento da viga é provocada pela força magnética atuando na extremidade livre em vez de uma excitação da base como propõe o modelo de (ERTURK e INMAN, 2008), de forma que (3.19) pode ser reescrita considerando a força magnética (F_m),

$$\begin{aligned} YI \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + c_s I \frac{\partial^5 w(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} + m \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} \\ + \alpha v(t) \times \left(\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x - L)}{dx} \right) = -F_m(t) \delta(x - L). \end{aligned} \quad (3.21)$$

Para obter a equação do circuito elétrico com acoplamento mecânico, é utilizada a expressão,

$$D_3 = d_{31}T_{p1} + \varepsilon_{33}^T E_3. \quad (3.22)$$

Sendo que D_3 é o deslocamento elétrico e ε_{33}^T a permissividade sob tensão mecânica constante. Em (3.22), a tensão mecânica pode ser expressa em função da deformação e do módulo de elasticidade (Young) do PZT ($T_{p1} = Y_P S_{p1}$), a permissividade deve ser substituída pela permissividade sob deformação constante, dada por $\varepsilon_{33}^S = \varepsilon_{33}^T - d_{31}^2 Y_P$. Considerando o campo elétrico dado por $E_3(t) = -v(t)/t_p$,

$$D_3(x, t) = d_{31}Y_P S_1(x, t) - \varepsilon_{33}^S \frac{v(t)}{t_p}. \quad (3.23)$$

A deformação da viga na camada PZT pode ser expressa em função da distância do centro da camada para o eixo neutro e da curvatura (deslocamento) da viga na posição x e tempo t , dada por:

$$S_1(x, t) = -t_{pc} \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2}, \quad (3.24)$$

assim,

$$D_3(x, t) = -d_{31}Y_P t_{pc} \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} - \varepsilon_{33}^S \frac{v(t)}{t_p}. \quad (3.25)$$

A carga elétrica gerada pela camada piezoelétrica pode ser obtida integrando o deslocamento elétrico sobre a área, sendo n o vetor unitário normal,

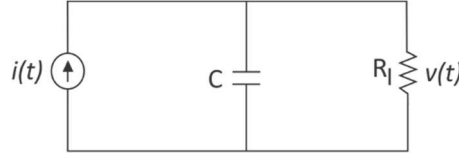
$$q(t) = \int_A D_3 n dA = - \int_0^L \left(d_{31}Y_P t_{pc} b \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} + \varepsilon_{33}^S b \frac{v(t)}{t_p} \right) dx. \quad (3.26)$$

A corrente gerada é dada por,

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} = - \int_{x=0}^L d_{31}Y_P t_{pc} b \frac{\partial^3 w(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx - \frac{\varepsilon_{33}^S b L}{t_p} \frac{dv(t)}{dt}, \quad (3.27)$$

sendo função de uma componente devido ao movimento de vibração da viga e de uma segunda componente que contém a tensão sobre o PZT, devido à capacitância estática dada por $\varepsilon_{33}^S b L / t_p$, conectada em paralelo com a carga resistiva externa alimentada pelo PZT, conforme o circuito elétrico da Figura 3.3.

Figura 3.3: Circuito elétrico equivalente.



A tensão fornecida pelo PZT é dada por:

$$v(t) = R_l i(t) = -R_l \left(\int_{x=0}^L d_{31} Y_P t_{pc} b \frac{\partial^3 w(x, t)}{\partial x^2 \partial t} dx - \frac{\varepsilon_{33}^S b L}{t_p} \frac{dv(t)}{dt} \right), \quad (3.28)$$

A solução para o deslocamento da viga $w(x, t)$, em (3.19) e (3.20) é dada por uma série de autofunções:

$$w(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \eta_r(t), \quad (3.29)$$

Em que $\phi_r(x)$ é a autofunção normalizada da massa e $\eta_r(t)$ é a coordenada modal do modo de número dado por r , sendo $\phi_r(x)$ para sistemas amortecidos proporcional,

$$\phi_r(x) = \sqrt{\frac{1}{mL}} \left[\cosh\left(\frac{\lambda_r}{L} x\right) - \cos\left(\frac{\lambda_r}{L} x\right) - \sigma_r \left(\sinh\left(\frac{\lambda_r}{L} x\right) - \sin\left(\frac{\lambda_r}{L} x\right) \right) \right], \quad (3.30)$$

Em que os valores para λ_r são obtidos a partir da equação característica $1 + \cos(\lambda) \cosh(\lambda) = 0$, e,

$$\sigma_r = \frac{\sinh(\lambda_r) - \sin(\lambda_r)}{\cosh(\lambda_r) + \cos(\lambda_r)}, \quad (3.31)$$

As expressões obtidas são para uma viga sem uma massa na ponta, sendo então um modelo aproximado para o sistema do gerador proposto. As autofunções normalizadas para a massa, deve satisfazer as condições de ortogonalidade:

$$\int_{x=0}^L m \phi_s(x) \phi_r(x) dx = \delta_{rs}, \quad \int_{x=0}^L YI \phi_s(x) \frac{d^4 \phi_r(x)}{dx^4} dx = \omega_r^2 \delta_{rs}, \quad (3.32)$$

em que δ_{rs} é igual a unidade para $s = r$ e igual a zero para $s \neq 0$, e ω_r é a frequência natural sem amortecimento do modo r , dada por:

$$\omega_r = \lambda_r^2 \sqrt{\frac{YI}{mL^4}}. \quad (3.33)$$

A partir de (3.29), utilizando as equações de ortogonalidade, é obtida a equação para a resposta modal com acoplamento eletromecânico:

$$\frac{d^2 \eta_r(t)}{dt^2} + 2\zeta_r \omega_r \frac{d \eta_r(t)}{dt} + \omega_r^2 \eta_r(t) + \chi_r v(t) = N_r(t), \quad (3.34)$$

em que $N_r(t)$ representa a força mecânica, com,

$$\chi_r = \alpha \frac{d \phi_r(x)}{dx} \Big|_{x=L}. \quad (3.35)$$

O termo de acoplamento modal é a taxa de amortecimento mecânico que inclui o amortecimento estrutural (ou taxa de deformação) e viscoso, dado por:

$$\zeta_r = \frac{c_s I \omega_r}{2YI} + \frac{c_a}{2m\omega_r}. \quad (3.36)$$

O amortecimento estrutural é proporcional à deformação da viga, enquanto o amortecimento viscoso é inversamente proporcional à massa por unidade de comprimento. Os valores utilizados para o amortecimento foram inicialmente baseados no trabalho de (ERTURK e INMAN, 2008), tendo sido utilizados quatro modos ao longo do comprimento da viga $\zeta_r = [0,01 \ 0,013 \ 0,033 \ 0,064]$. Os componentes da força mecânica, em que $g(t)$ representa à força que provoca o movimento de translação da viga, são dados por:

$$N_r(t) = -m \int_{x=0}^L \phi_r(x) dx \times \frac{d^2 g(t)}{dt^2} - c_a \int_{x=0}^L \phi_r(x) dx \times \frac{dg(t)}{dt}. \quad (3.37)$$

A solução para a equação modal em (3.34), sendo $\omega_{rd} = \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2}$ a frequência natural amortecida de modo r , é dada por:

$$\eta_r(t) = \frac{1}{\omega_{rd}} \int_0^t [N_r(\tau) - \chi_r v(\tau)] e^{-\zeta_r \omega_r (t-\tau)} \text{sen}(\omega_{rd} (t - \tau)) d\tau. \quad (3.38)$$

Utilizando (3.28) e (3.29),

$$\frac{dv(\tau)}{dt} + \frac{t_p}{R_l \varepsilon_{33}^S bL} v(t) = \sum_{r=1}^{\infty} \varphi_r \frac{d\eta_r(t)}{dt}, \quad (3.39)$$

com,

$$\varphi_r = -\frac{d_{31} Y_P t_{pc} t_p}{\varepsilon_{33}^S L} \int_0^L \frac{d^2 \phi_r(x)}{dx^2} dx = -\frac{d_{31} Y_P t_{pc} t_p}{\varepsilon_{33}^S L} \frac{d \phi_r(x)}{dx} \Big|_{x=L}. \quad (3.40)$$

A solução de (3.9) é dada por:

$$v(\tau) = e^{-\frac{t}{\tau_c}} \left(\int e^{\frac{t}{\tau_c}} \sum_{r=1}^{\infty} \varphi_r \frac{d\eta_r(t)}{dt} dt + c \right), \quad (3.41)$$

em que c é uma constante arbitrária que depende do valor inicial da tensão $v(t)$ sobre a carga resistiva e do valor inicial da velocidade da viga, para condições iniciais nulas $c = 0$. E τ_c é a constante de tempo do circuito dada por:

$$\tau_c = \frac{R_l \varepsilon_{33}^S b L}{t_p}. \quad (3.42)$$

Considerando um movimento harmônico na base dado por $g(t) = A e^{j\omega t}$, sendo A a amplitude da translação, com o sistema eletromecânico linear, a tensão de saída também deve ser harmônica $v(t) = V_0 e^{j\omega t}$, e,

$$\eta_r(t) = \frac{[m\omega^2 (A \int_{x=0}^L \phi_r(x) dx) - \chi_r V_0] e^{j\omega t}}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}, \quad (3.43)$$

a tensão $v(t)$ é induzida devido ao movimento $w_b(x, t) = A e^{j\omega t}$, e para o circuito elétrico,

$$\frac{1 + j\omega\tau_c}{\tau_c} V_0 e^{j\omega t} = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r \frac{d\eta_r(t)}{dt}. \quad (3.44)$$

Utilizando (3.43) e (3.44),

$$\frac{1 + j\omega\tau_c}{\tau_c} V_0 = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r \frac{j\omega [m\omega^2 (A \int_{x=0}^L \phi_r(x) dx) - \chi_r V_0]}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}, \quad (3.45)$$

$$V_0 = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j m \omega^3 \phi_r (A \int_{x=0}^L \phi_r(x) dx)}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j \omega \chi_r \phi_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} + \frac{1 + j\omega\tau_c}{\tau_c}}. \quad (3.46)$$

A resposta em tensão $v(t)$, sobre uma carga resistiva, devido a um movimento harmônico $w_b(x, t) = A e^{j\omega t}$, pode ser expressa por:

$$v(t) = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j m \omega^3 \phi_r (A \int_{x=0}^L \phi_r(x) dx)}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j \omega \chi_r \phi_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} + \frac{1 + j\omega\tau_c}{\tau_c}} A e^{j\omega t}. \quad (3.47)$$

A corrente gerada pelo PZT pode ser expressa por $i(t) = v(t)/R_l$, e a potência elétrica instantânea é dada por $p(t) = v^2(t)/R_l$. A resposta do deslocamento da viga, com $\gamma_r = \int_{x=0}^L \phi_r(x) dx$, é dado por:

$$w(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} [\gamma_r - \chi_r \left(\frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \phi_r \gamma_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \chi_r \phi_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} + \frac{1 + j\omega \tau_c}{\tau_c}} \right)] \times \frac{m\omega^2 \phi_r(x) A e^{j\omega t}}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} \quad (3.48)$$

A resposta em frequência para a tensão, descrita como a relação entre a tensão de saída e a aceleração da força de entrada, é dada por:

$$\frac{v(t)}{-\omega^2 A e^{j\omega t}} = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{-jm\omega \phi_r \gamma_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \chi_r \phi_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} + \frac{1 + j\omega \tau_c}{\tau_c}} \quad (3.49)$$

A resposta em frequência para a corrente e potência obtida de forma similar ao do domínio do tempo. A resposta em frequência para o deslocamento da viga, é dada por:

$$\frac{w(L, t)}{A e^{j\omega t}} = \sum_{r=1}^{\infty} \left[\gamma_r - \chi_r \left(\frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \phi_r \gamma_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega}}{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{j\omega \chi_r \phi_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} + \frac{1 + j\omega \tau_c}{\tau_c}} \right) \right] \times \frac{m\omega^2 \phi_r(L) A e^{j\omega t}}{\omega_r^2 - \omega^2 + j2\zeta_r \omega_r \omega} \quad (3.50)$$

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO GERADOR

O gerador desenvolvido pode ser acionado pela velocidade do vento ou por meio do acoplamento a um dispositivo ou máquina rotativa (roda de um veículo, bicicleta, ventilador, entre outros), podendo ser adaptado também para colher energia a partir do movimento humano. O design do gerador proposto permite que vários geradores sejam empilhados para elevação da potência disponível.

A construção do protótipo se deu por três definições iniciais. O dispositivo deve ser rotacional, podendo rotacionar o eixo (rotor) se corpo (estator) estiver fixo ou rotacionar o corpo (estator) se o eixo (rotor) estiver fixo, o acoplamento de um ou mais transdutores piezoelétricos no mesmo atuador ou não, e a possibilidade do acoplamento entre os geradores.

A estrutura física do gerador piezoelétrico está na Figura 3.4, com vista explodida na Figura 3.5, o protótipo é composto por uma lâmina de aço engastada em uma extremidade e livre na outra no módulo gerador 1 e três lâminas no módulo gerador 2, cada módulo tem as dimensões de 150 x 50 x 150 mm, conforme a Figura 3.6. O eixo, um parafuso sextavado, está acoplado com um espaçador com rosca interna (produzido em ABS) e um rolamento comercial em uma estrutura cilíndrica com duas tampas confeccionada em ABS. Em Apêndice 1, Apêndice 2 e Apêndice 3 está a descrição das tampas inferior e superior, da estrutura para fixação das lâminas com os elementos piezoelétricos (estator) e do espaçador com rosca interna, respectivamente.

O gerador proposto apresenta dois transdutores piezoelétricos do tipo PZT, que foram colados em lados opostos de uma lâmina, sendo engastada em uma estrutura cilíndrica com duas tampas (confeccionadas em ABS), com um ímã de neodímio em sua extremidade livre. O eixo, um parafuso sextavado, está acoplado com um espaçador com rosca interna (produzido em ABS) e um rolamento comercial (que reduz o atrito no acoplamento do eixo com a estrutura circular durante o movimento de rotação) à estrutura cilíndrica. No processo de colagem, que permite a adesão entre os materiais com baixa resistência, as duas faces negativas dos dois PZT foram coladas à lâmina. No centro de cada módulo gerador há uma porca sextavada com um ímã colado em sua extremidade, que é o elemento responsável pela excitação da viga, gerada pela força de interação magnética entre os ímãs. A força é responsável pela deformação da viga e está relacionada à velocidade de rotação do eixo.

Figura 3.4: Estrutura para um módulo do gerador proposto.

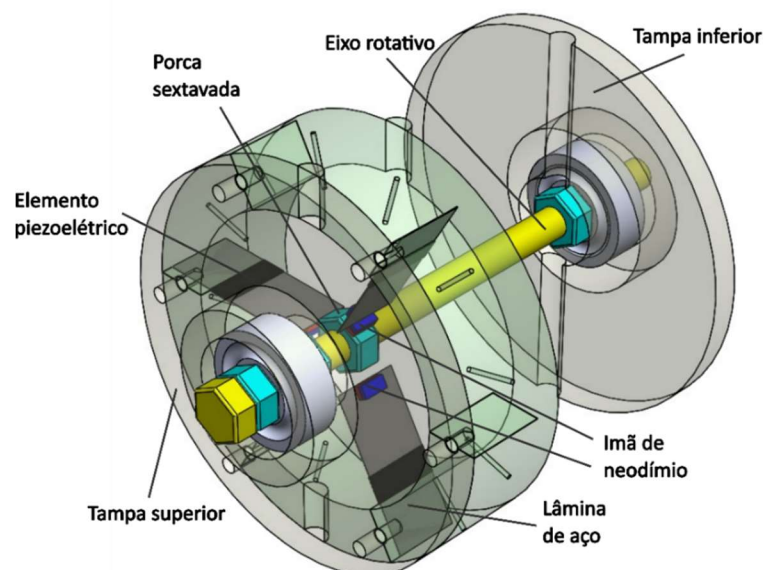


Figura 3.5: Vista explodida para um módulo do gerador.

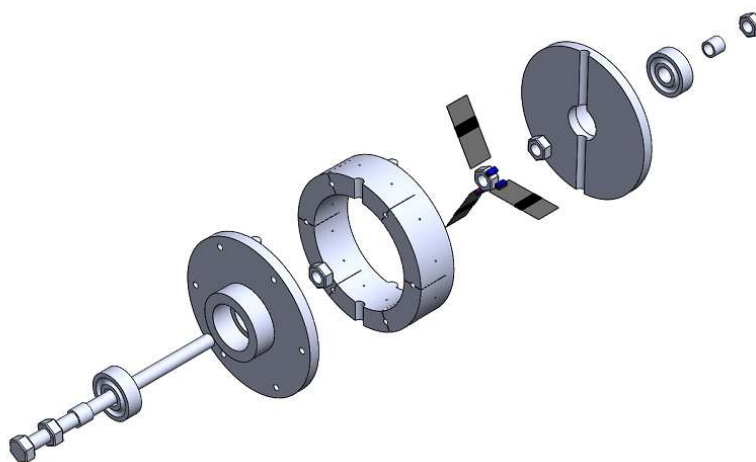
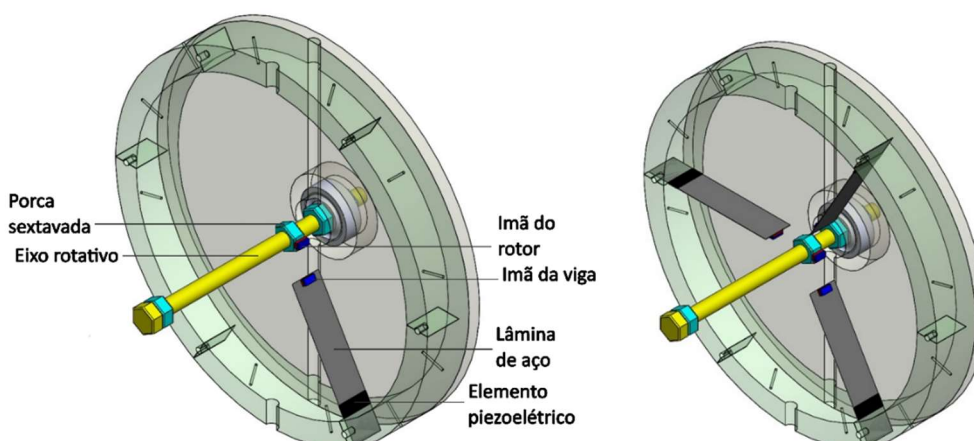


Figura 3.6: Módulo gerador 1 e módulo gerador 2



O material piezoelétrico utilizado nos transdutores é o PZT do tipo C64 *Soft* do fabricante *PI Ceramic*, outros dois transdutores PIC255 – *Soft* e PIC181 – *Hard* foram utilizados para comparação do nível de tensão gerada em simulação. As características do material utilizado para as lâminas, para os ímãs e transdutor piezoelétrico estão apresentadas em Tabela 3.1, Tabela 3.2 e Tabela 3.3 respectivamente.

As vigas foram confeccionadas em fita de aço, com transdutores piezoelétricos colados com a cola do tipo epóxi, adesivo KBR-610 do fabricante *EXCEL SENSORES*. A colagem deve ser executada 60 minutos após a mistura dos componentes A e B da cola em igual proporção. O local onde foi posicionado o PZT sobre a fita/lâmina de aço deve ser envolvido com fita adesiva para alta temperatura, e a viga é então disposta em uma prensa mecânica e levada ao forno a uma temperatura de 100 °C por 4 horas, conforme orientação do fabricante da cola.

Tabela 3.1: Características das lâminas.

Descrição (Lâmina)	Unidade	
Dimensões	mm^3	$60 \times 13 \times 0,15$
Módulo de elasticidade (Y_s)	Pa	100×10^9
Densidade	kg/m^3	7850
Massa (g)	G	0,459

Tabela 3.2: Características dos ímãs.

Descrição (Ímã)	Unidade	
Dimensões	mm^3	$5 \times 2,5 \times 2$
Densidade	kg/m^3	7500
Massa	g	0,174
Força de tração vertical	g	450
Grade magnética	-	N44H
Material	-	NdFeB (neodímio)

Tabela 3.3: Características dos transdutores.

Descrição (PZT PIC255 - Soft)	Unidade	
Dimensões	mm^3	$10 \times 10 \times 0,2$
Módulo de elasticidade (Y_p)	Pa	$Y_{1p} = 62 \times 10^9$ $Y_{3p} = 48 \times 10^9$
Massa	kg	0,1546
Fator de acoplamento eletromecânico	-	$K_{31} = 0,35$ $K_{33} = 0,69$
Constante dielétrica	-	$\epsilon_{11}/\epsilon_0 = 1650$ $\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 1750$
Constante de permissividade (ϵ_0)	F/m	$8,854 \times 10^{-12}$
Constante de carga piezoelétrica	$m/V (C/N)$	$d_{31} = -180 \times 10^{-12}$ $d_{33} = 400 \times 10^{-1}$ $d_{15} = 550 \times 10^{-12}$
Fator de qualidade mecânica	-	80
Descrição (PZT PIC181 - Hard)	Unidade	
Dimensões	mm^3	$10 \times 10 \times 0,2$
Módulo de elasticidade (Y_p)	Pa	$Y_{1p} = 85 \times 10^9$

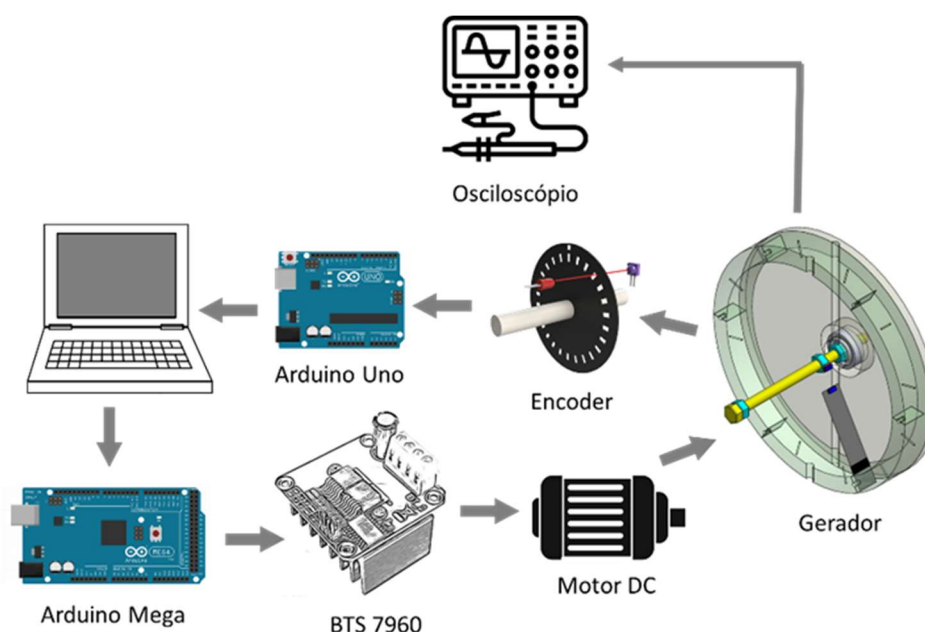
		$Y_{3P} = 70 \times 10^9$
Massa	kg	0,1546
Fator de acoplamento eletromecânico	-	$K_{31} = 0,66$ $K_{33} = 0,63$
Constante dielétrica	-	$\varepsilon_{11}/\varepsilon_0 = 1500$ $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0 = 1200$
Constante de permissividade (ε_0)	F/m	$8,854 \times 10^{-12}$
Constante de carga piezoelétrica	$m/V (C/N)$	$d_{31} = -120 \times 10^{-12}$ $d_{33} = 265 \times 10^{-1}$ $d_{15} = 475 \times 10^{-12}$
Fator de qualidade mecânica	-	2000
Descrição (PZT C64 - Soft)	Unidade	
Dimensões	mm^3	$10 \times 10 \times 0,2$
Módulo de elasticidade (Y_p)	Pa	$Y_{1P} = 62 \times 10^9$ $Y_{3P} = 48 \times 10^9$
Massa	kg	0,1546
Fator de acoplamento eletromecânico	-	$K_{31} = 0,35$ $K_{33} = 0,73$
Constante dielétrica	-	$\varepsilon_{11}/\varepsilon_0 = 1960$ $\varepsilon_{33}/\varepsilon_0 = 1850$
Constante de permissividade (ε_0)	F/m	$8,854 \times 10^{-12}$
Constante de carga piezoelétrica	$m/V (C/N)$	$d_{31} = -185 \times 10^{-12}$ $d_{33} = 435 \times 10^{-12}$ $d_{15} = 670 \times 10^{-12}$
Fator de qualidade mecânica	-	84

Para caracterização do gerador rotacional proposto foi desenvolvida uma bancada de teste com um motor DC acoplado ao eixo do gerador com controle da velocidade, que é realizado com o uso de um sensor do tipo encoder posicionado em uma base ajustável próximo ao eixo do motor. Em Apêndice 4, Apêndice 5, Apêndice 6, Apêndice 7 está a descrição da base superior e inferior para suporte do estator, da base para movimentação do sensor encoder, do suporte para o sensor encoder e do disco encoder, respectivamente. No Apêndice 8 e Apêndice 9 estão os algoritmos utilizados para programação da plataforma

Arduino para leitura do sinal fornecido pelo encoder e acionamento do motor DC respectivamente.

A configuração definida para análise do gerador proposto está na Figura 3.7, para acionamento do motor é utilizado um Arduino Mega com a ponte H BTS 7960. A frequência de rotação do motor é ajustada de forma manual por meio de um potenciômetro e um encoder acoplado ao motor. O sinal gerado pelo encoder é lido por um Arduino uno, fornecendo a velocidade de rotação do motor na IDE do Arduino, que apresentou uma variação de aproximadamente $\pm 0,3$ Hz para a faixa de velocidade utilizada (1 Hz a 35 Hz). Um osciloscópio digital (DSO1012A, *Agilent Technologies*, 100MHz - 2GSa/s) foi utilizado para aquisição das formas de onda de tensão de saída no tempo com taxa de amostragem de 117 μ s, sendo a análise dos sinais obtidos realizada com o *software* Matlab.

Figura 3.7: Configuração experimental para análise do gerador proposto



Os sinais gerados pelos pares de elementos piezoelétricos têm fases distintas, com defasagem diferente de 180° , sendo inviável obter um sinal de saída através da conexão direta dos sinais gerados por cada par. Para retificação e interligação das tensões fornecidas pelos elementos piezoelétricos com fases distintas, baseado no circuito apresentado por (OZDEMIR, 2019) que está na Figura 3.8, é proposta a utilização dos circuitos da Figura 19, em que cada fonte de tensão alternada representa um transdutor piezoelétrico, realizando a retificação e conexão em série e paralelo das tensões geradas por pares de elementos piezoelétricos (com

defasagem de 180°) que estão acoplados às faces opostas de cada uma das quatro vigas. Nos circuitos foram utilizados diodos schottky 1N60P e capacitores eletrolíticos de $0,1\ \mu\text{F}$.

Figura 3.8: Circuito proposto para conexão de transdutores piezoelétricos em Ozdemir (2019).

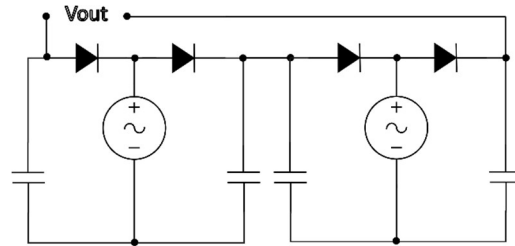
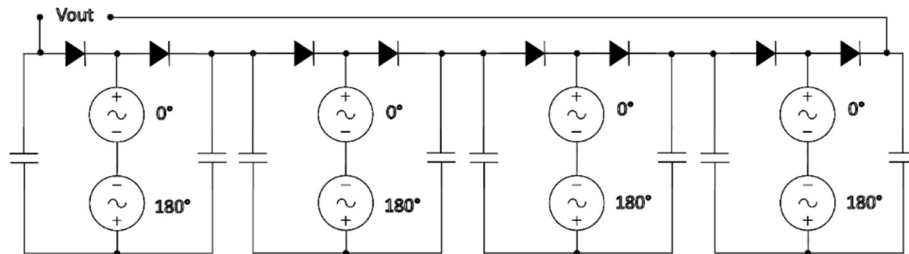
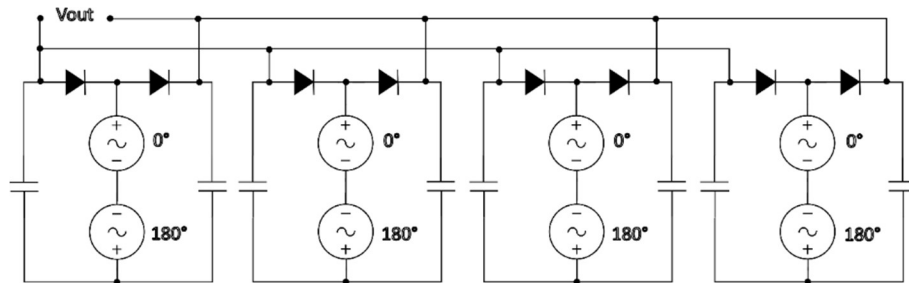


Figura 3.9: Circuito proposto para a conexão e retificação dos sinais gerados pelos transdutores piezoelétricos:

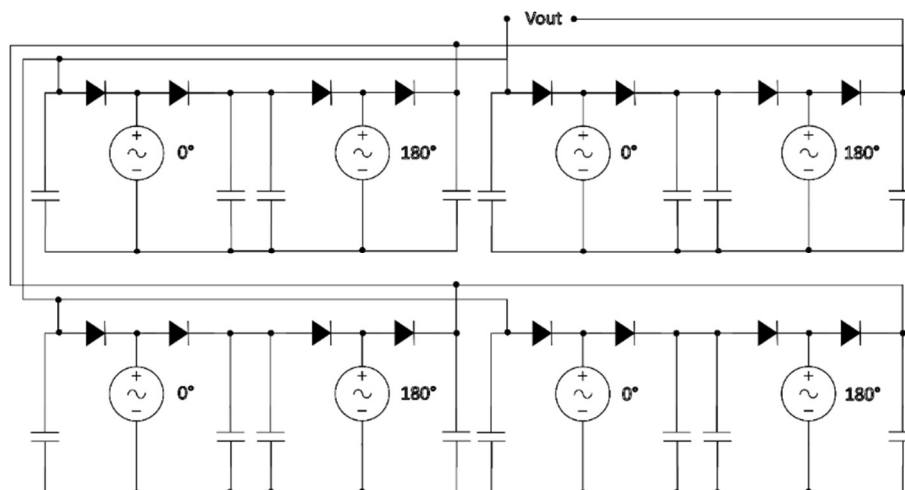
(a) conexão das vigas do módulo gerador 1 e 2 em série; (b) conexão das vigas do módulo gerador 1 e 2 em paralelo.



(a)



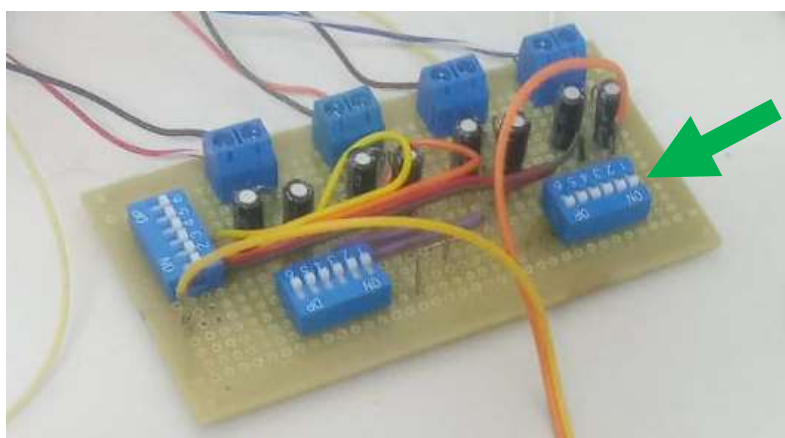
(b)



(c)

O circuito para conexão em série e paralelo foi desenvolvido em uma única placa permitindo a sua configuração utilizando chaves do tipo dip switch (Figura 3.10), no qual para o circuito em série funcionar a chave indicada com uma seta na cor verde devem estar em “ON” e as outras chaves sem indicação devem estar em “OFF”.

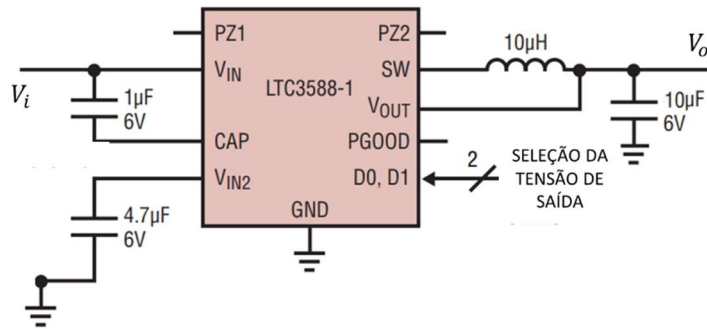
Figura 3.10: Circuito para conexão em série e paralelo



O circuito regulador de tensão/gerenciador de carga, específico para aplicações de colheita de energia, LTC 3588, foi utilizado para regulação da tensão fornecida pelo gerador após a interligação das tensões geradas com o circuito da Figura 3.9. O LTC3588-1 é um retificador de onda completa com um conversor *buck* para regulação da tensão, capaz de receber uma tensão alternada de entrada que pode variar de 2,5 a 20V, e disponibilizar uma tensão contínua de 1,8 V, 2,5 V, 3,3 V ou 3,6 V e uma corrente máxima na saída de 100 mA. Uma configuração típica sugerida pelo fabricante está na Figura 3.11, com a utilização dos pinos PZ1 e PZ2 como entradas para os transdutores piezoelétricos, o pino V_{IN} conectado a um capacitor de 1 μ F para armazenamento de energia até que o conversor *buck* possa regular

a tensão de saída, e a conexão de um capacitor para armazenamento da energia excedente gerada em V_i . Internamente as entradas PZ1 e PZ2 são ligadas a um circuito retificador de onda completa com a saída conectada a um conversor *buck* que pode fornecer as tensões de 1,8 V, 2,5 V, 3,3 V ou 3,6 V, por meio da configuração dos pinos D0 e D1.

Figura 3.11: Placa LTC3588-1 utilizada: Configuração para aplicações com PZTs.



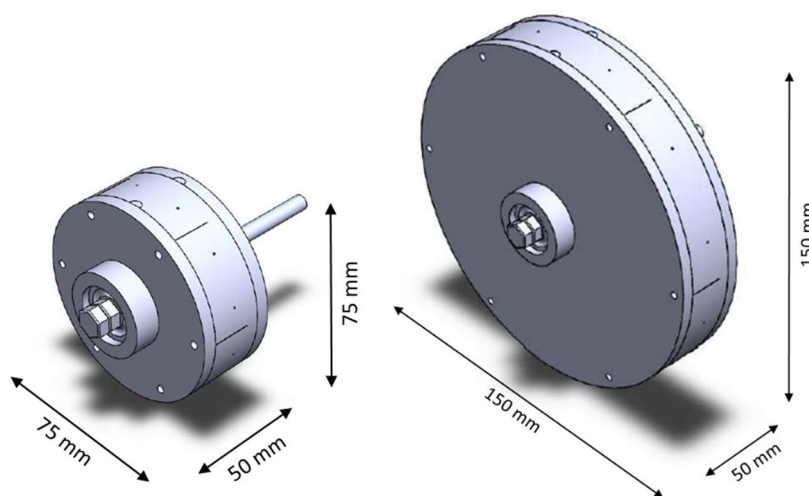
Fonte: Linear Technology (2019).

Para utilização dessa configuração, cada elemento piezoelétrico do gerador proposto precisaria ser conectado a um módulo LTC3588-1, ou precisaria ser feito uma conexão prévia entre os elementos piezoelétricos conectando a saída aos pinos PZ1 e PZ2. A conexão direta de elementos piezoelétricos com tensões defasadas não é viável, e o circuito proposto para conexão dos PZT já fornece uma tensão retificada, de forma que optou-se por utilizar o módulo LTC3588-1 como regulador de tensão, aplicando a saída do circuito proposto diretamente ao pino V_i .

4 RESULTADOS SIMULADOS

Neste capítulo será apresentado os resultados obtidos por meio do modelo analítico para o comportamento de uma viga piezoelétrica submetida a uma vibração do tipo harmônica utilizando o modelo descrito no capítulo 3 com o *software* Matlab®. A tensão e potência fornecida, foram estimadas, por dois módulos geradores com as seguintes medidas: 75 x 50 x 75 mm para o gerador A, com seis vigas de 30 x 13 x 0,15 mm³ e 150 x 50 x 150 mm para o gerador B, com seis vigas de 60 x 13 x 0,15 mm³, conforme Figura 4.1, com as características dos transdutores piezoelétricos PZT PIC255 - *Soft*, PZT PIC181 - *Hard* e PZT C64 - *Soft*.

Figura 4.1: Dimensão dos geradores A e B.



4.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A dimensão e o formato das vigas e do elemento piezoelétrico foi definido de acordo com pesquisas desenvolvidas no LASEA (Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas). Cada viga possui um elemento piezoelétrico próximo ao engastamento, o qual corresponde à 10 mm do comprimento e representa a extremidade fixa da viga. Os elementos PZT foram mantidos com dimensões fixas de 10 x 13 x 0,2 mm³, sendo utilizados os modelos PIC255, PIC181 e C64 do fabricante *PI Ceramic*. A força de excitação, gerada por seis ímãs dispostos no eixo, foi considerada harmônica e sem variações no valor máximo de amplitude mesmo

com o movimento de rotação do eixo, com frequência em 20 Hz , dada por $g(t) = 0,023e^{-j40\pi}$. A resistência ou carga conectada ao transdutor foi considerada como $R_l = 20\text{ M}\Omega$.

Os resultados na Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3 contém os valores eficaz (RMS) para tensão, corrente e potência nos geradores A e B, com os transdutores PZT (PIC 255, PIC 181 e PIC 64) conectados em paralelo, que correspondem respectivamente a Figura 4.2 e Figura 4.3.

Tabela 4.1: Conexão dos PZT dos geradores A e B em paralelo para o PIC255.

Geradores	PIC255 - Valores (RMS)			Número de transdutores PZT
	Tensão	Corrente	Potência	
A	5,9079 V	1,7724 μA	10,471 μW	6
B	206,9434 V	62,083 μA	12,8 mW	6

Tabela 4.2: Conexão dos PZT dos geradores A e B em paralelo para o PIC181.

Geradores	PIC181 - Valores (RMS)			Número de transdutores PZT
	Tensão	Corrente	Potência	
A	7,6732 V	2,3020 μA	17,663 μW	6
B	128,5717 V	38,572 μA	5,0 mW	6

Tabela 4.3: Conexão dos PZT dos geradores A e B em paralelo para o C64.

Geradores	C64 - Valores (RMS)			Número Transdutores PZT
	Tensão	Corrente	Potência	
A	6,4441 V	1,9332 μA	12,458 μW	6
B	714,54 V	21,436 mA	153,2 mW	6

Figura 4.2: Valores de tensão, corrente e potência, com os seis PZT do gerador A ligados em paralelo.

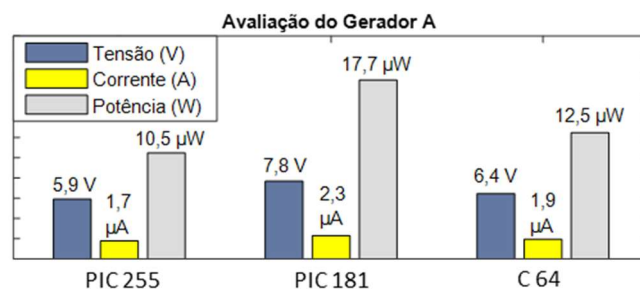
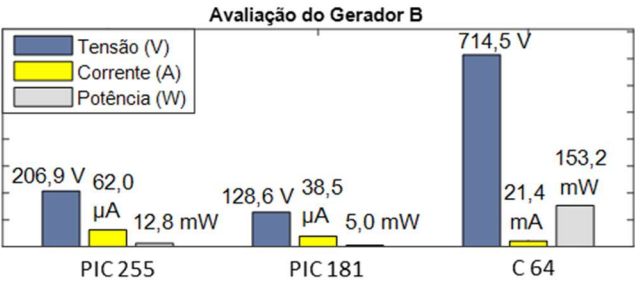


Figura 4.3: Valores de tensão, corrente e potência, com os seis PZT do gerador B ligados em paralelo.



Na Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6 os seis transdutores do Gerador A, foram conectados em série, sendo em sequência adicionado (empilhado) duas unidades em paralelo. Após o empilhamento ocorreu um aumento de tensão, a corrente e a potência dobraram, e o espaço físico ocupado foi 28% maior em relação ao tamanho de uma unidade.

Tabela 4.4: Conexão dos PZT (PIC255) do gerador A em série, com empilhamento de duas unidades do gerador.

Gerador A	PIC255 - Valores (RMS)			Número de transdutores PZT
	Tensão	Corrente	Potência	
Transdutores em série	35,4474 V	0,2954 μ A	10,471 μ W	6
Duas unidades do gerador em paralelo	35,4474 V	0,5908 μ A	20,9423 μ W	12

Tabela 4.5: Conexão dos PZT (PIC181) do gerador A em série, com empilhamento de duas unidades do gerador.

Gerador A	PIC181 - Valores (RMS)			Número de transdutores PZT
	Tensão	Corrente	Potência	
Transdutores em série	46,0392 V	0,3836 μ A	17,663 μ W	6
Duas unidades do gerador em paralelo	46,0392 V	0,7672 μ A	35,321 μ W	12

Tabela 4.6: Conexão dos PZT (C64) do gerador A em série, com empilhamento de duas unidades do gerador.

Gerador A	C64 - Valores (RMS)			Número de transdutores PZT
	Tensão	Corrente	Potência	
Transdutores em série	38,6646 V	0,3222 μ A	12,458 μ W	6
Duas unidades do gerador em paralelo	38,6646 V	0,6444 μ A	24,915 μ W	12

Na Tabela 4.7, Tabela 4.8 e Tabela 4.9 os seis transdutores do Gerador B foram conectados em paralelo e foi adicionado (empilhado) três unidades do gerador em paralelo. Após o empilhamento ocorreu um aumento de tensão, a corrente e a potência dobraram, e o espaço físico ocupado foi 44% maior em relação ao tamanho de uma unidade.

Tabela 4.7: Conexão dos PZT (PIC 255) do gerador B em paralelo, com empilhamento de três unidades do gerador.

Gerador B	PIC255 - Valores (RMS)			Número de transdutores PZT
	Tensão	Corrente	Potência	
Transdutores em paralelo	206,9434 V	62,083 μ A	12,8 mW	6
Três unidades do gerador em paralelo	206,9434 V	186,249 μ A	38,543 mW	18

Tabela 4.8: Conexão dos PZT (PIC 181) do gerador B em paralelo, com empilhamento de três unidades do gerador.

Gerador B	PIC181 - Valores (RMS)			Número de transdutores PZT
	Tensão	Corrente	Potência	
Transdutores em paralelo	128,5717 V	38,572 μ A	5,0 mW	6
Três unidades do gerador em paralelo	128,5717 V	115,716 μ A	14,87 mW	18

Tabela 4.9: Conexão dos PZT (C64) do gerador B em paralelo, com empilhamento de três unidades do gerador.

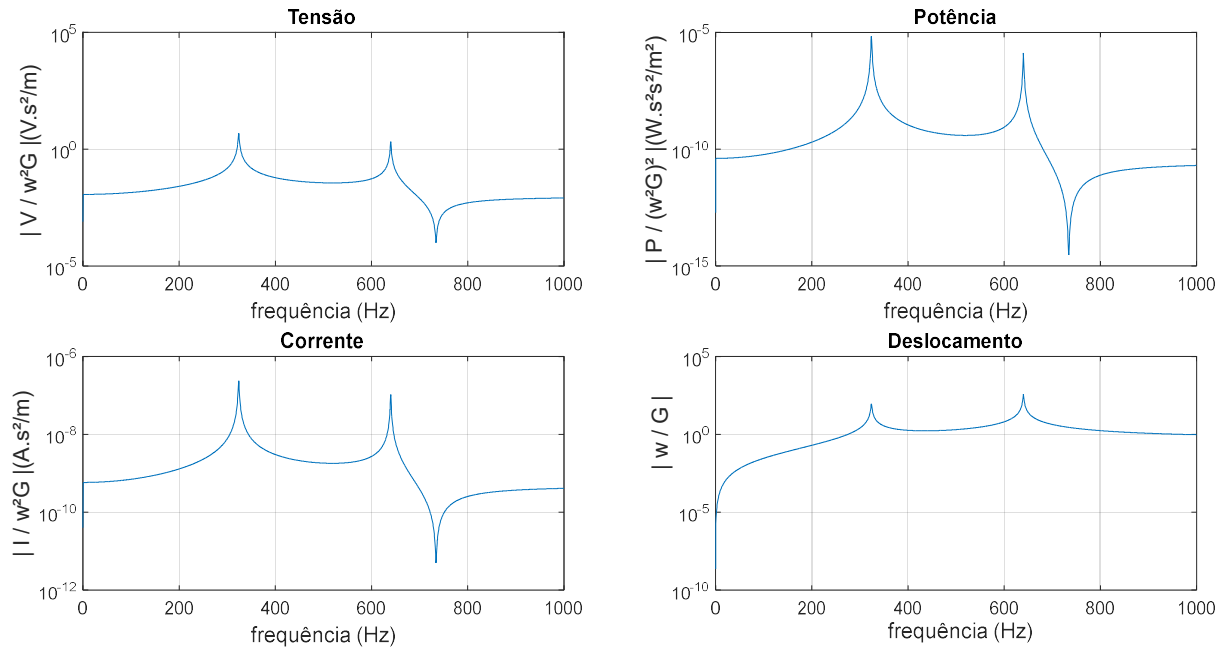
Gerador B	C64 - Valores (RMS)			Número de transdutores PZT
	Tensão	Corrente	Potência	
Transdutores em paralelo	714,54 V	21,436 mA	153,2 mW	6
Três unidades do gerador em paralelo	714,54 V	64,308mA	459,506 mW	18

A resposta em frequência do sistema foi considerada para a força de excitação harmônica $g(t) = Ge^{j40\pi}$, com $G = -0,023$, atuando em apenas uma viga, um fator de amortecimento global de $\zeta = 0,001$, com comprimento da viga de $L = 30 \text{ mm}$ e $L = 60 \text{ mm}$, sendo os 10 mm iniciais correspondente a região de engaste.

A resposta em frequência (FRF) para a tensão é descrita como a relação entre a tensão de saída e a aceleração da base. A resposta em frequência para a corrente é obtida dividindo a FRF da tensão pela resistência da carga. A FRF da potência é obtida multiplicando as da tensão e corrente. E a FRF do deslocamento é dada pela relação entre a amplitude de vibração (ou deslocamento) na extremidade livre da viga e a força aplicada, fornecendo o máximo deslocamento transversal da extremidade livre para determinada frequência.

Com o PZT localizado logo após o engastamento, em $0 \text{ mm} < x < 10 \text{ mm}$, com a viga de $L = 30 \text{ mm}$, considerando uma resistência de $20 \text{ M}\Omega$ conectado ao PZT, simulando uma situação de circuito aberto, foram obtidas as respostas em frequência da Figura 4.4.

Figura 4.4: FRF para a tensão, potência, corrente e deslocamento, com $L=30$ mm.



Considerando a resistência conectada ao transdutor de $20\text{ M}\Omega$ foram obtidas a Figura 4.5 e Figura 4.6, que mostram a variação da resposta em frequência com a mudança da localização do PZT ao longo da viga com $L = 30\text{ mm}$ e $L = 60\text{ mm}$, em que x corresponde ao posicionamento do PZT ao longo da lâmina.

Figura 4.5: Variação da posição do PZT sobre a lâmina para o gerador A ($L=30$ mm).

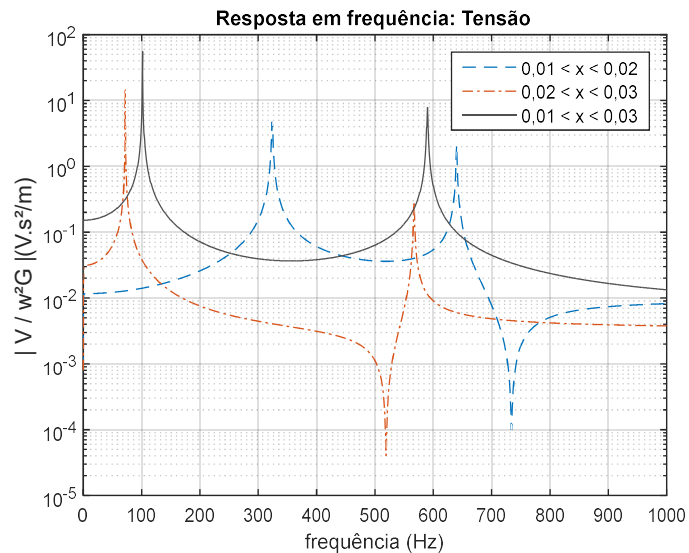
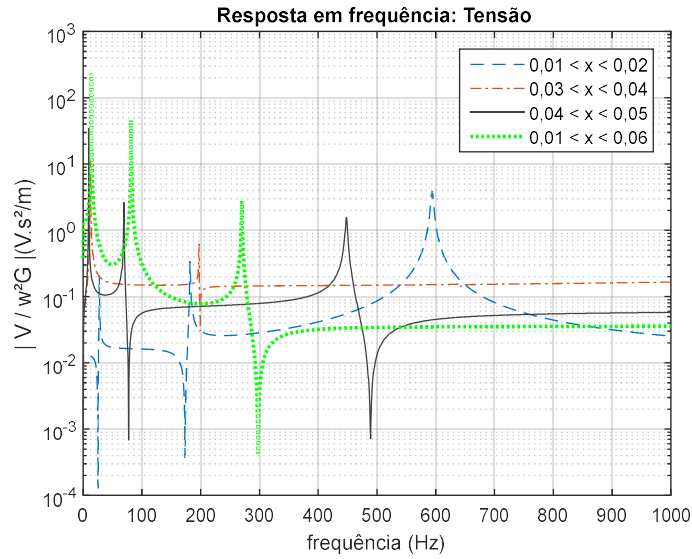
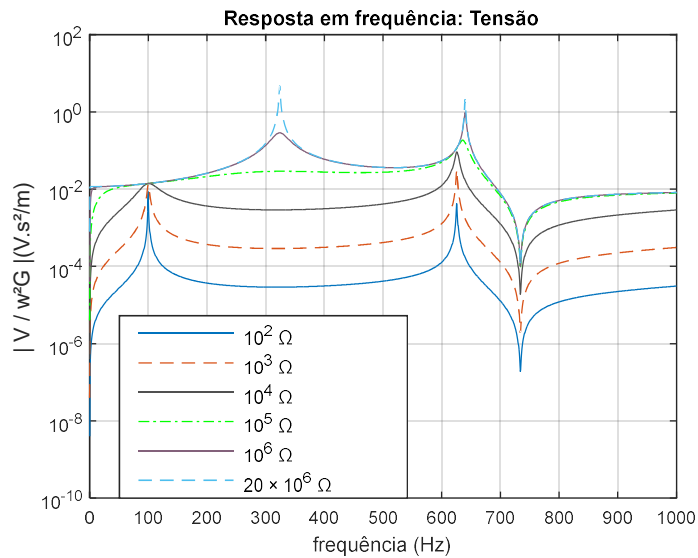


Figura 4.6: Variação da posição do PZT sobre a lâmina para o gerador B ($L=60$ mm).



Na Figura 4.7 está a FRF para a tensão para o gerador A ($L = 30$ mm), considerando valores da resistência conectada ao PZT variando de $R_l = 10^2$ a $R_l = 20 \times 10^6$. Pode-se observar que a tensão fornecida pelo PZT é maior conforme a resistência aumenta e a saída do transdutor se aproxima de um circuito aberto.

Figura 4.7: FRF para a tensão considerando diferentes valores para a resistência conectada ao PZT, com $0,01 < x < 0,03$.



Neste capítulo foram apresentados os resultados preliminares para o gerador rotacional proposto, contendo os níveis de potência e resposta em frequência para o comportamento de uma viga do transdutor, obtidos por um modelo analítico.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O modelo matemático teve como objetivo fundamental, definir as referências da modelagem do protótipo em 3D, assim foi possível a determinação dos principais parâmetros relacionados ao protótipo experimental, otimizando tempo e recursos. Como o objetivo principal do trabalho é a concepção e a análise de um dispositivo capaz de converter energia mecânica em energia elétrica, utilizando transdutores piezoelétricos, foi construído o protótipo e a bancada para análise e caracterização do gerador apresentada na Figura 5.1, com detalhes do protótipo na Figura 5.2 e Figura 5.3, como referência para realização da pesquisa.

Figura 5.1: Configuração experimental - gerador desenvolvido e da bancada para medições: Vista superior.

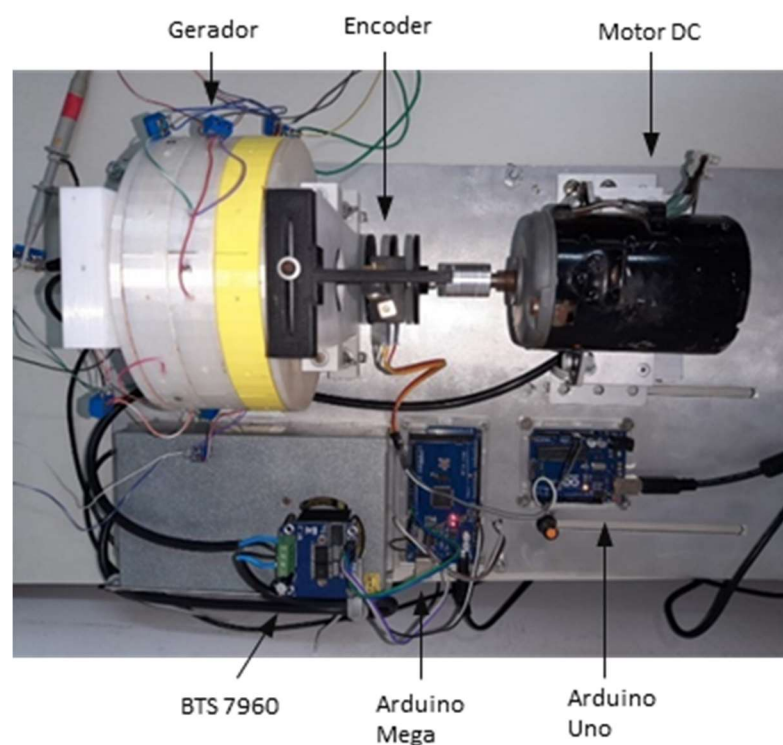


Figura 5.2: Partes constituintes do dispositivo desenvolvido com dois módulos geradores com uma e três vigas respectivamente, e um módulo reserva para expansão do gerador.

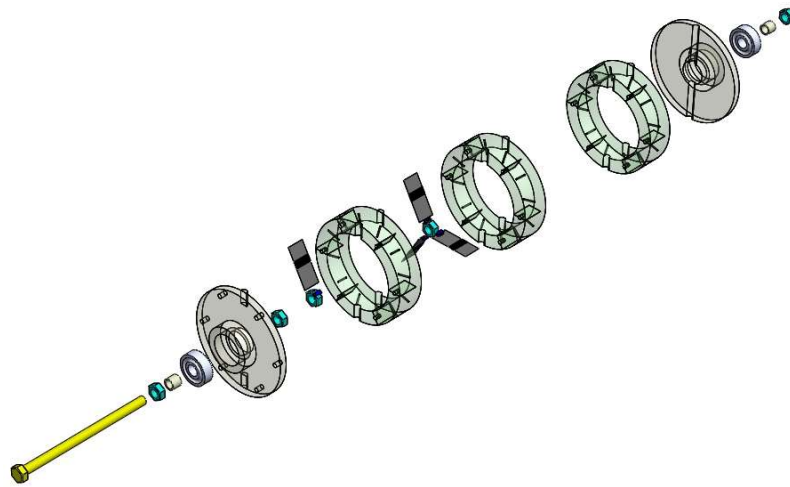
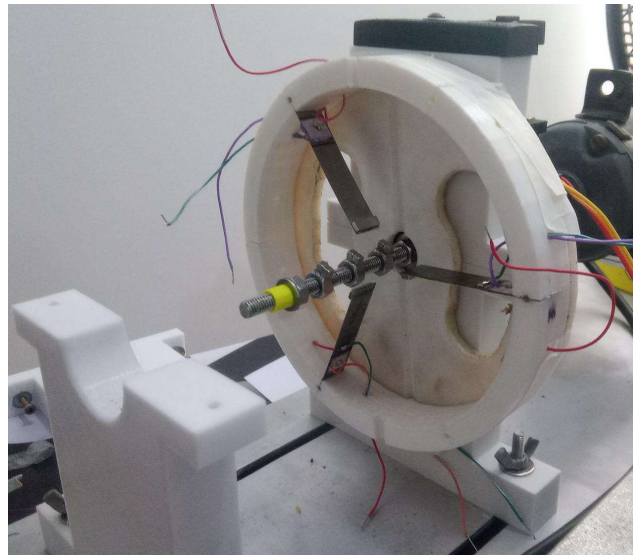


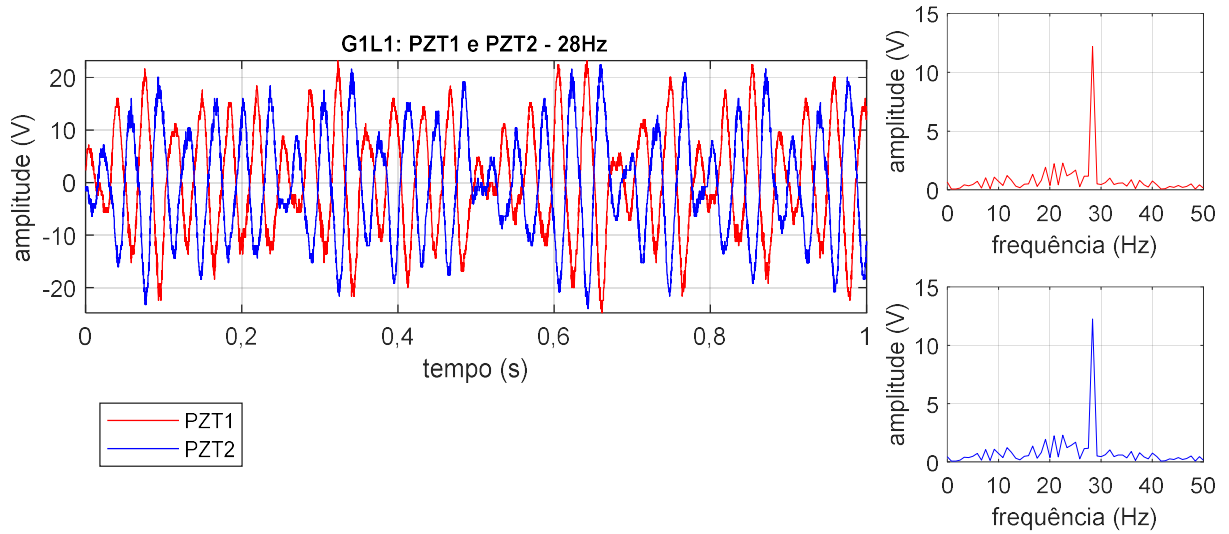
Figura 5.3: Módulos reserva e módulo gerador 2 com três vigas totalizando seis elementos piezoelétricos.



Fonte: Autor

O sinal de tensão em circuito aberto, utilizando uma frequência de rotação do motor em 28 Hz para os dois elementos piezoelétricos do módulo gerador 1 conectados à viga L1 (G1L1), PZT1 e PZT2, que são complementares, está na Figura 5.4. Na Figura 5.5 e Figura 5.6 estão os sinais de tensão na frequência de 15 Hz e 29 Hz, respectivamente, para os elementos piezoelétricos do módulo gerador 2, conectados à viga L1, L2 e L3 (G2L1, G2L2 E G2L3). Como existe apenas um ímã posicionado junto ao eixo acoplado ao motor, a viga sofre uma força de excitação uma vez a cada rotação do motor, o que se reproduz na frequência principal do sinal de tensão.

Figura 5.4: Sinal de tensão em circuito aberto, com frequência de rotação do motor em 28 Hz para os dois elementos piezoelétricos do módulo gerador 1.



Com a aquisição de dados experimentais do módulo gerador 1, foi selecionado o resultado da geração nas frequências de 3 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 28 Hz, para calibrar a implementação do simulador que utiliza o modelo matemático baseados no trabalho de (ERTURK e INMAN, 2008). O primeiro ponto foi encontrar a amplitude da magnitude da força ideal, que até o momento, o valor proposto a ser utilizado foi de -0.023. Considerando que a tensão simulada é diretamente proporcional à amplitude da força e tendo a tensão experimental, foi calculada a magnitude da força calibrada, sendo obtido os valores de -1,972434, -0,18654, -0,0921757, -0,0193500 e -0.005505 para as frequências de 3 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15Hz e 28Hz, respectivamente. O próximo passo foi realizar um ajuste na forma de onda da tensão simulada em relação a tensão experimental. Na Figura 5.7 estão representadas a tensão simulada e a tensão experimental com aproximadamente 8548 pontos para cada sinal no módulo gerador 1.

A Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.10 e Figura 5.11 apresentam o mapa da velocidade em frequência do eixo do gerador relacionado com a tensão máxima RMS produzida para cada um dos transdutores PZT colados nas vigas do módulo gerador 1 e 2 (G1L1, G2L1, G2L2 e G2L3) em circuito aberto, durante o período de 100 ms. Este monitoramento estima as velocidades para as quais podem ser obtidas as maiores tensões para a faixa de frequência de 1 Hz a 35 Hz ou (60 rpm a 2100 rpm), sendo a máxima tensão gerada de 23,2V em 28Hz. Nas figuras, o gráfico A e B apresenta o comportamento do PZT1 e PZT2 em relação a velocidade do eixo em Hz e a amplitude máxima da tensão gerada e o gráfico C permite a análise do comportamento

da geração no PZT1 e PZT2 simultaneamente. Na Figura 5.12 foram evidenciados os valores de frequência que apresentam as maiores tensões de pico gerada de forma simultânea por PZT1 e PZT2.

Figura 5.5: Sinal de tensão em circuito aberto, com frequência de rotação do motor em 15 Hz para os seis elementos piezoelétricos do módulo gerador 2.

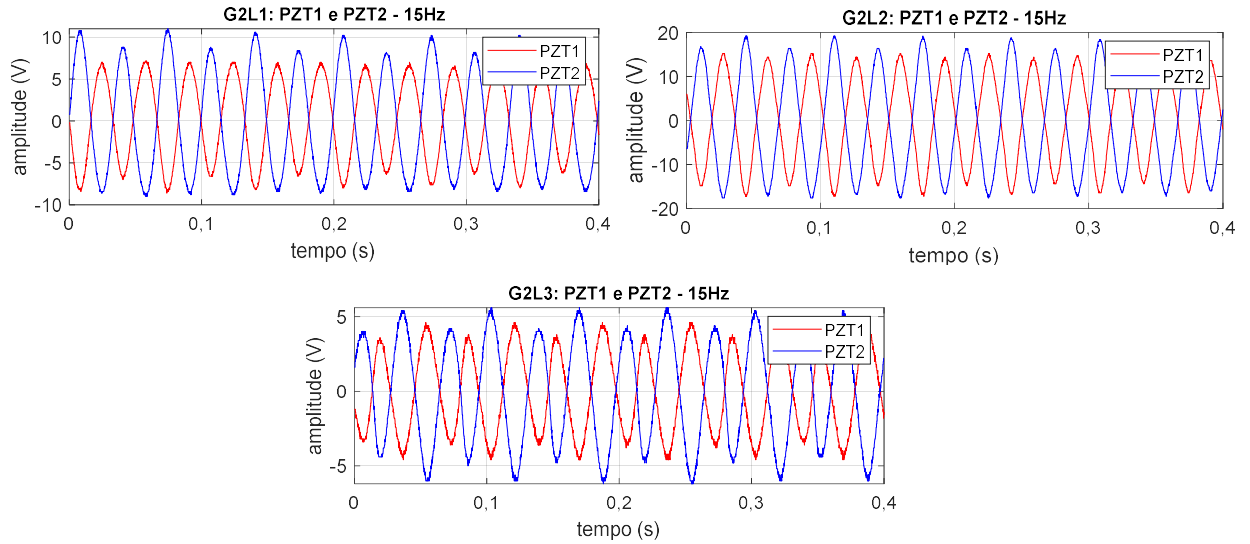


Figura 5.6: Sinal de tensão em circuito aberto, com frequência de rotação do motor em 29 Hz para os seis elementos piezoelétricos do módulo gerador 2.

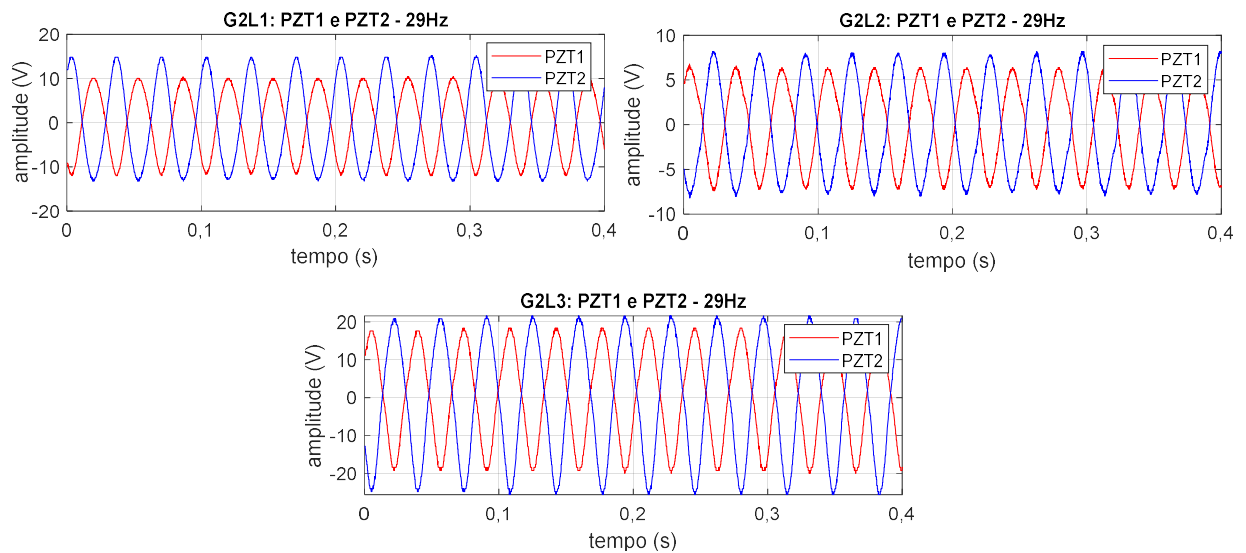


Figura 5.7: Tensão simulada e experimental para o módulo gerador 1.

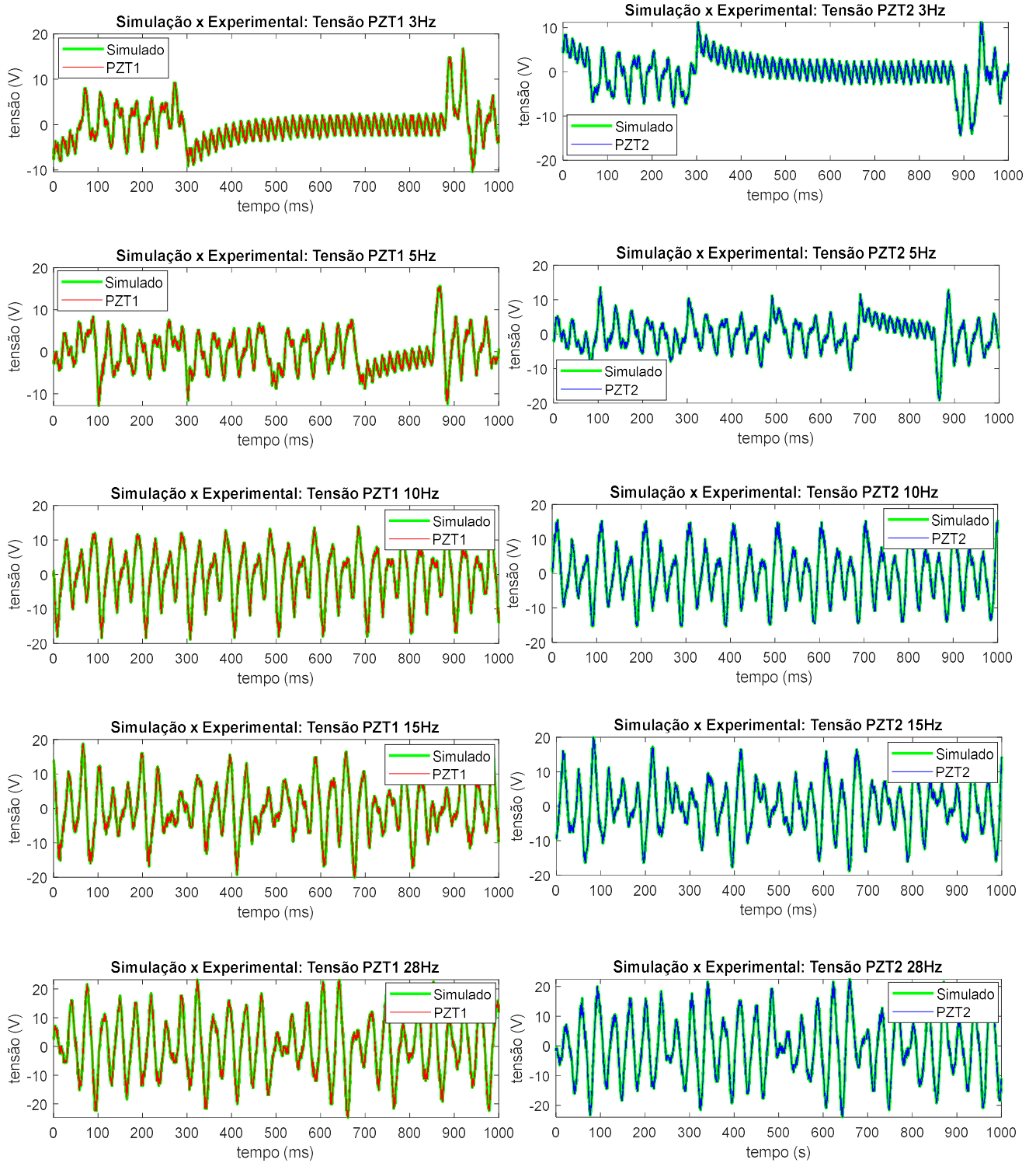


Figura 5.8: Pontos de tensão máxima para G1L1.

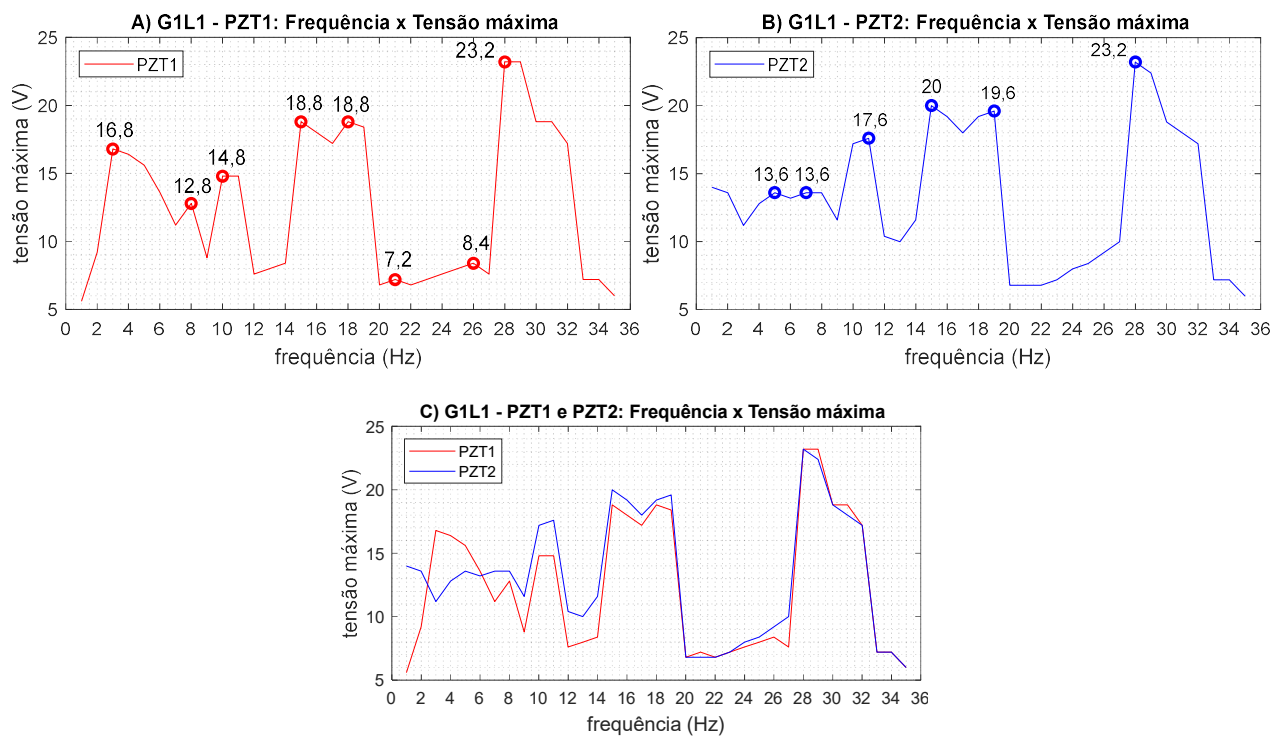


Figura 5.9: Pontos de tensão máxima para G2L1.

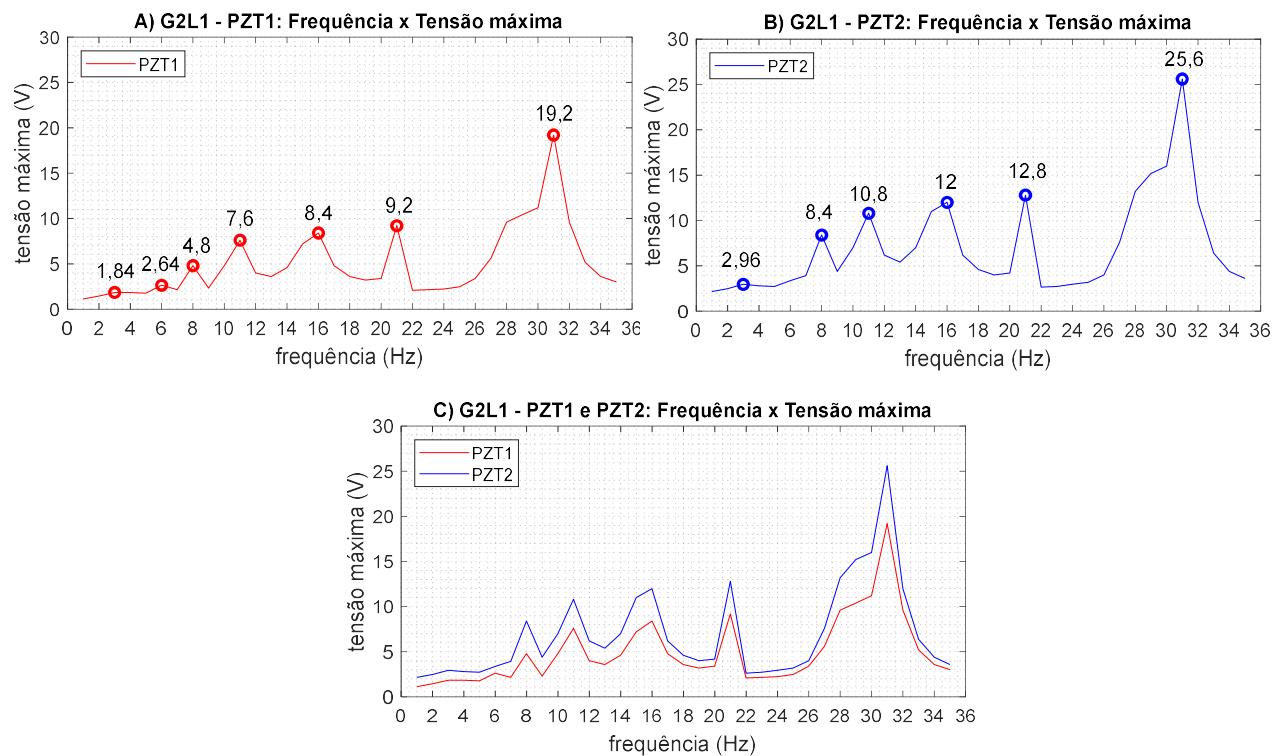


Figura 5.10: Pontos de tensão máxima para G2L2.

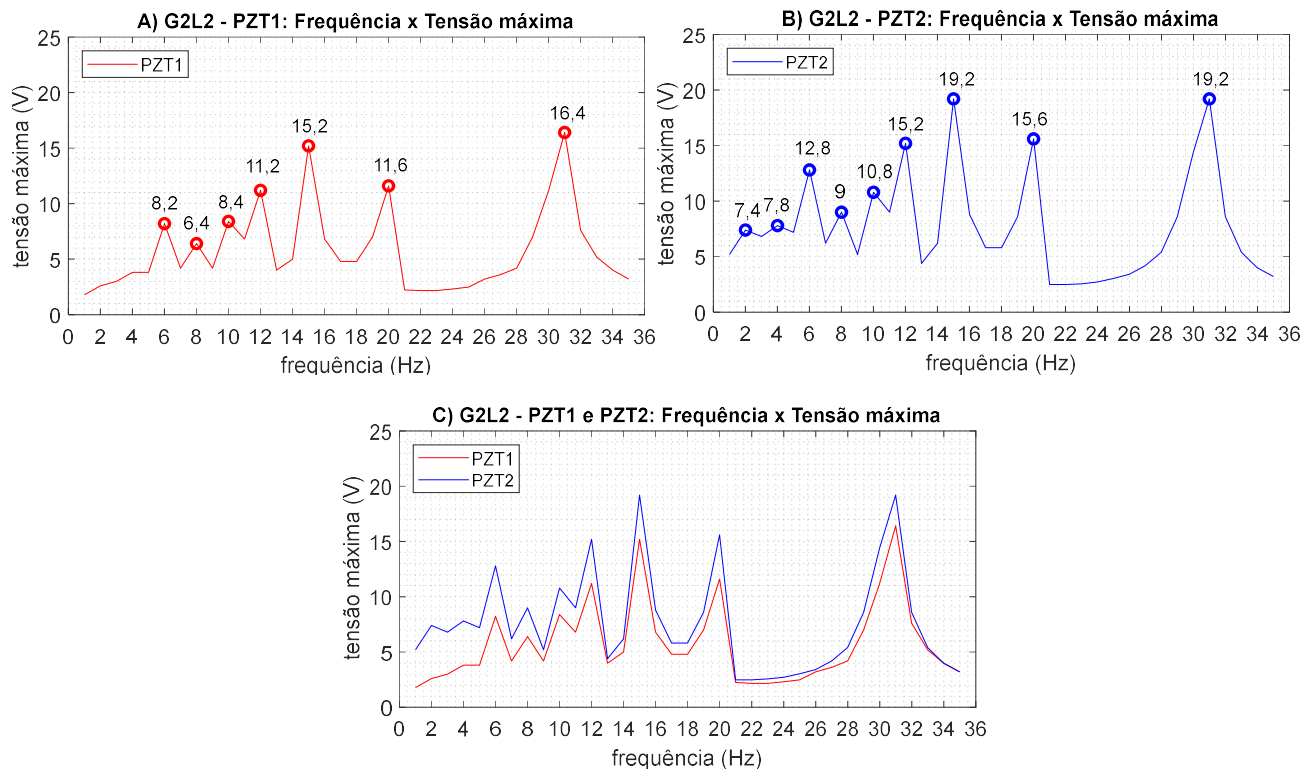


Figura 5.11: Pontos de tensão máxima para G2L3

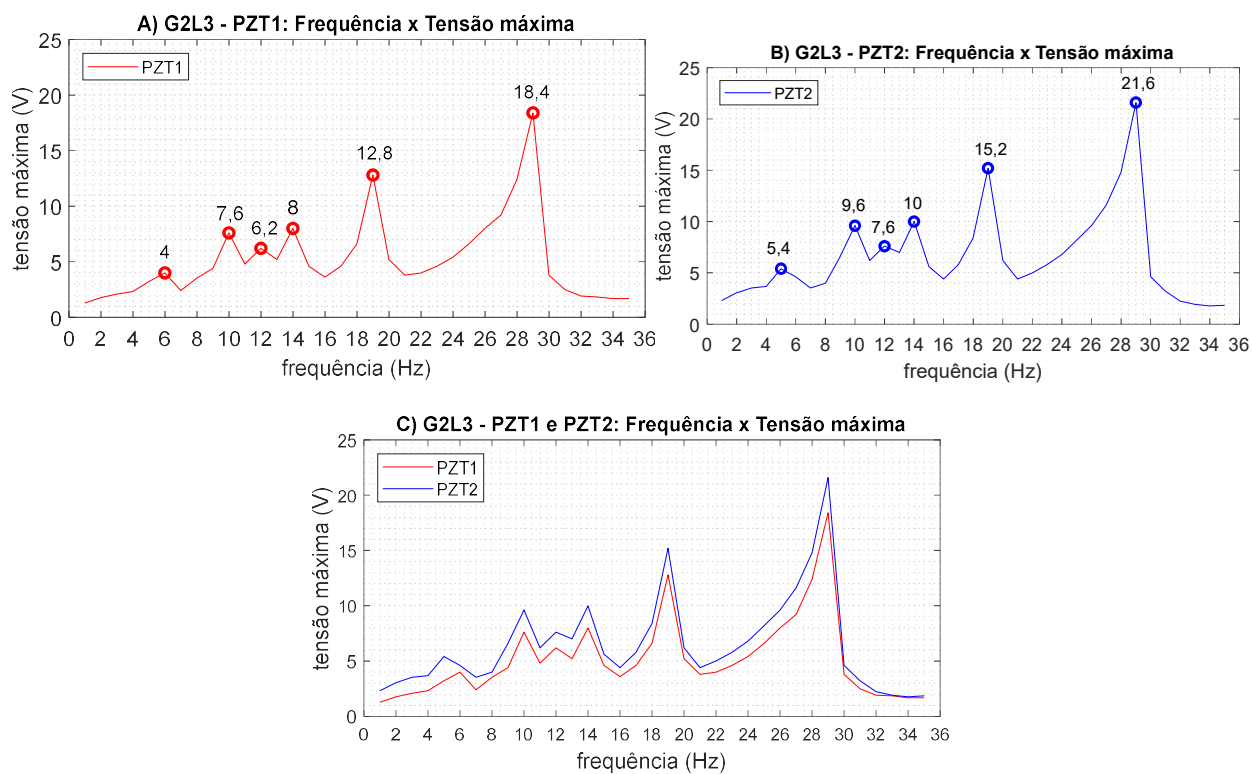
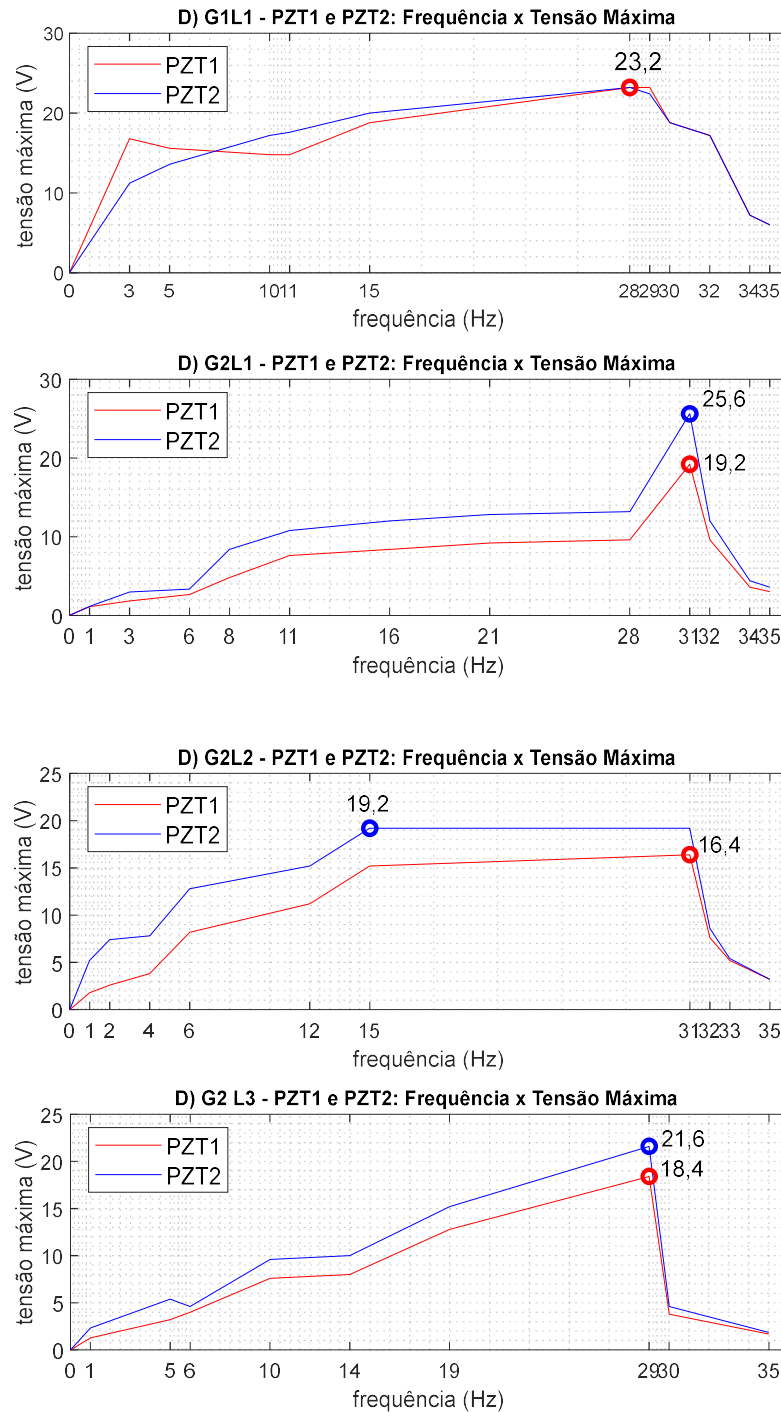


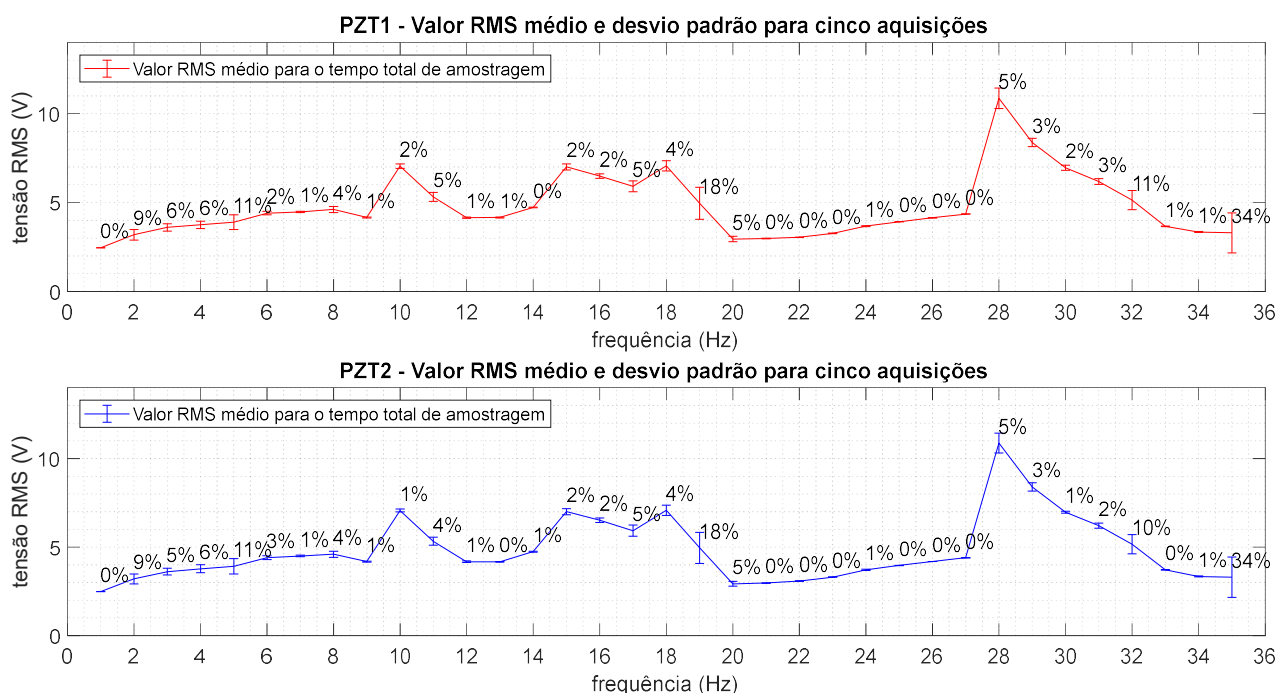
Figura 5.12: Pontos com a maior tensão de pico simultânea para PZT1 e PZT2, considerando a faixa de rotação de 1 a 35 Hz.



A partir de cinco aquisições do sinal gerado pelos elementos piezoelétricos em circuito aberto, com a janela de aquisição definida para uma taxa de amostragem de $117 \mu s$, com aproximadamente 10242 pontos para cada curva, e período de aquisição de 100 ms, foram obtidos o valor RMS médio e desvio padrão conforme representado na Figura 5.13, que explora a caracterização dos dois elementos piezoelétricos do módulo gerador 01, PZT1 e

PZT2, para as velocidades de rotação do motor de 1 Hz a 35 Hz. O gerador irá disponibilizar aproximadamente essa margem de eficiência para cada velocidade de rotação do motor. Ressalta-se que a utilização de uma maior quantidade de ímãs dispostos no eixo do gerador irá permitir o aumento da tensão RMS.

Figura 5.13: Valor da tensão RMS média e desvio padrão para um conjunto de cinco aquisições do módulo gerador 1.



Os terminais positivos dos dois elementos piezoelétricos PZT1 e PZT2 de cada uma das lâminas, que geram tensões complementares, foram conectados a resistências variando de 500 Ω a 5 M Ω (Figura 5.14), utilizando uma frequência de rotação de 28 Hz, obtendo a tensão RMS e a potência em função da resistência conforme a Figura 5.15 e Figura 5.16. A conexão dos transdutores piezoelétricos da Figura 5.14 representa a disposição física dos transdutores de cada lâmina decorrente da construção do gerador.

Figura 5.14: Conexão dos terminais negativos dos transdutores piezoelétricos em uma lâmina.

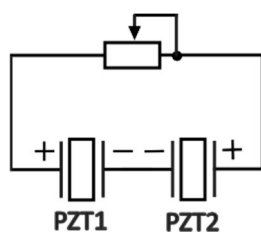


Figura 5.15: Valor da tensão RMS gerada pelas vigas do gerador 1 e gerador 2 para as resistências de 500 Ω a 5 M Ω .

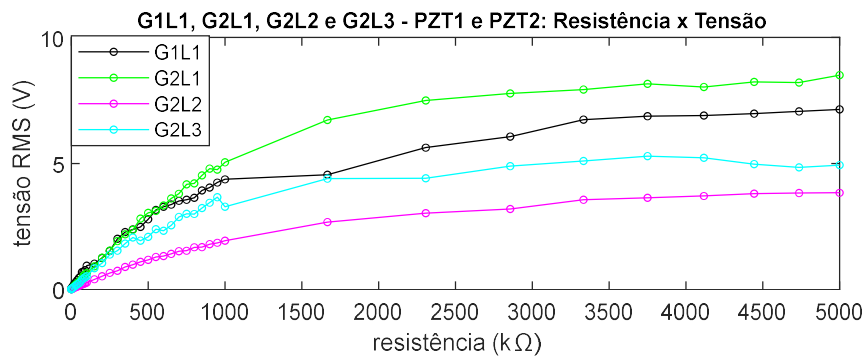
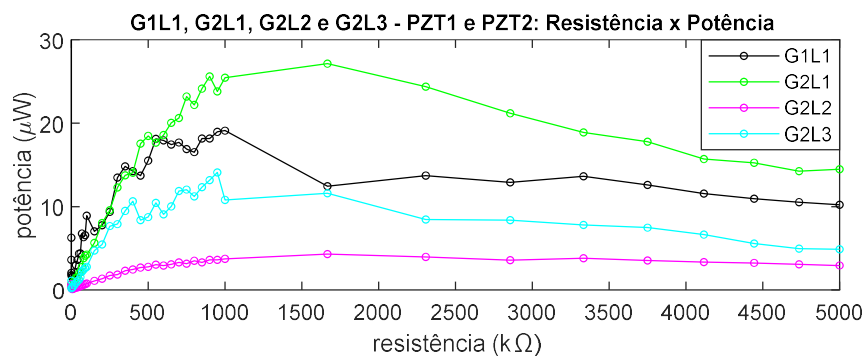


Figura 5.16: Valor da potência gerada pelas vigas do gerador 1 e gerador 2 para as resistências de 500 Ω a 5 M Ω .



Durante a construção das vigas, em cada lâmina o PZT1 foi conectado ao PZT2 conforme a Figura 5.17 (a). O circuito formado pelos dois diodos e capacitores da Figura 5.17 (b) foi utilizado para conectar os sinais gerados por cada uma das vigas com uma configuração em série e em paralelo. Para uma configuração mista em cada circuito da Figura 5.17 (b) foi utilizado um único transdutor piezoelétrico. Na Figura 5.18 (a) e Figura 5.18 (b) está respectivamente o layout e o resultado da simulação no *software* PSIM. Considerando que os transdutores piezoelétricos (PZT1 e PZT2) estão representados por uma fonte de tensão senoidal ideal, tendo como referência o PZT1, durante o semiciclo positivo, apenas o diodo D1 conduzirá e o capacitor C1 será carregado, ocorrendo uma queda de tensão em torno de 0,2 V sobre o diodo D1. Da mesma forma, durante o semiciclo negativo, o diodo D2 conduzirá e o capacitor C2 será carregado, ocorrendo uma queda de tensão em torno de 0,2 V sobre o diodo D2.

Figura 5.17: Transdutores PZT1 e PZT2 em cada uma das vigas: (a) Interligação física dos transdutores durante a construção do dispositivo; (b) Circuito utilizado para interligação dos sinais disponibilizados pelas vigas ou transdutores piezoelétricos.

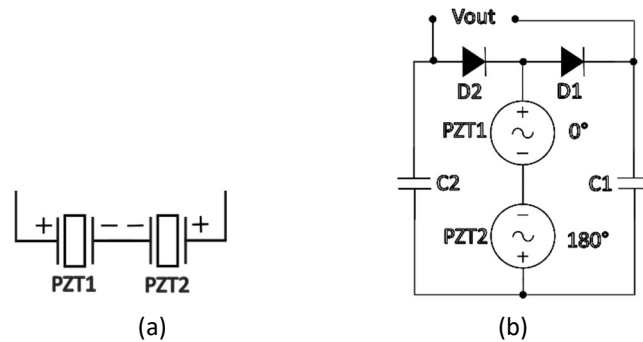
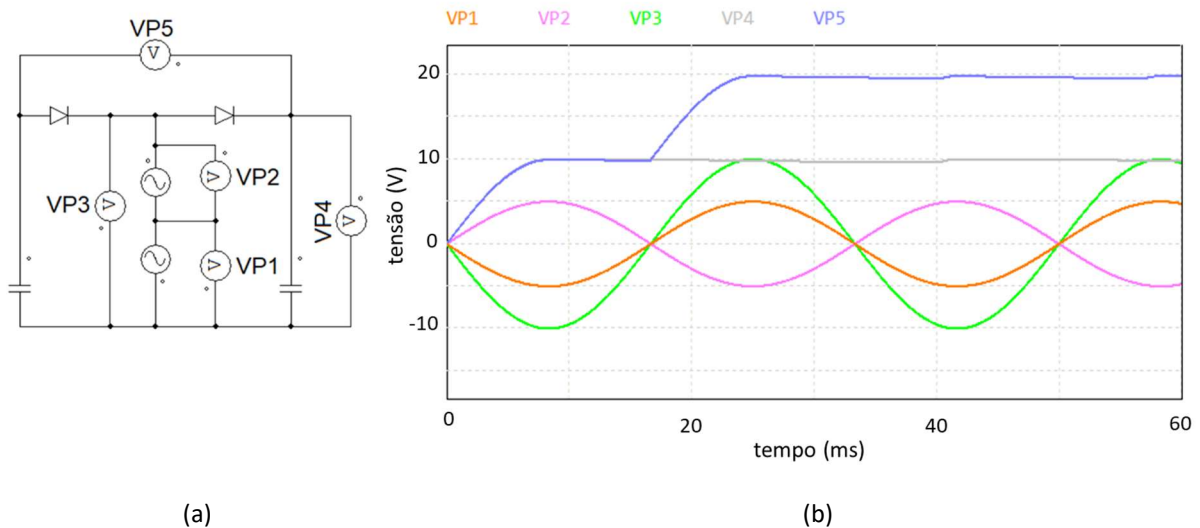


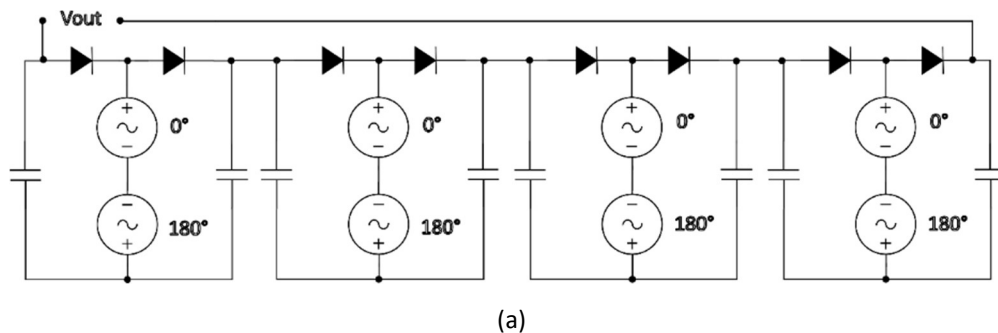
Figura 5.18: Simulação do circuito da Figura 45 no software PSIM: (a) Layout; (b) Resultado da simulação.

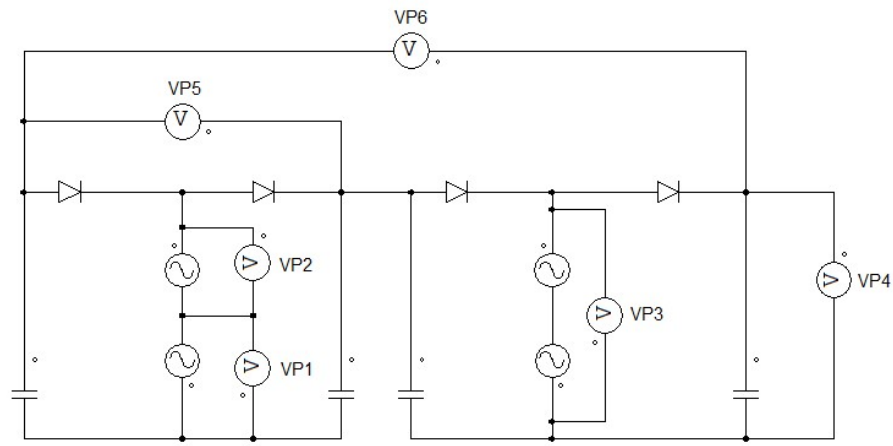


A interligação das quatro vigas, com realização da simulação no *software* PSIM, em uma conexão série, paralela e mista, está na Figura 5.19, Figura 5.20 e Figura 5.21 respectivamente.

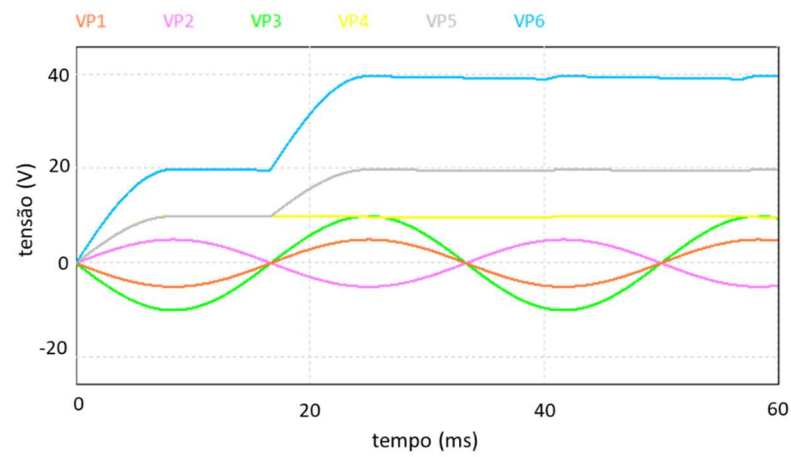
Figura 5.19: Interligação dos transdutores piezoelétricos: (a) Circuito com ligação em série do sinal gerado pelas quatro vigas; (b) Layout no software PSIM para duas vigas com dois elementos piezoelétricos cada; (c)

Resultado da simulação no software PSIM.





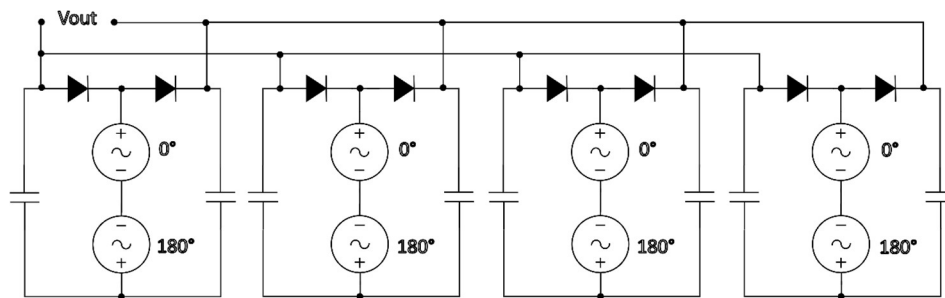
(b)



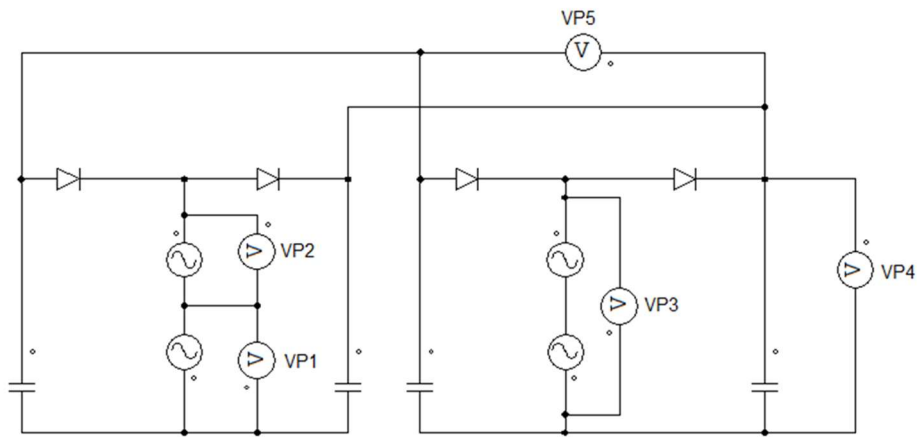
(c)

Figura 5.20: Interligação dos transdutores piezoelétricos: (a) Circuito com ligação em paralelo do sinal gerado pelas quatro vigas; (b) Layout no software PSIM para duas vigas com dois elementos piezoelétricos cada; (c)

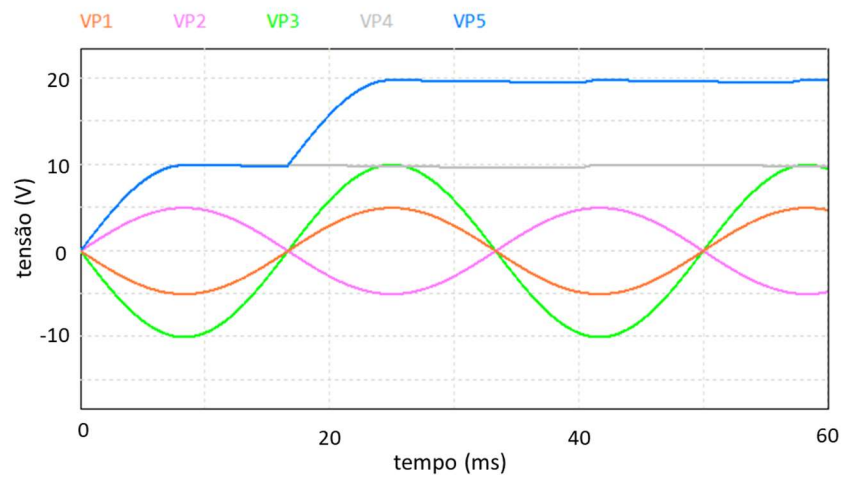
Resultado da simulação no software PSIM



(a)

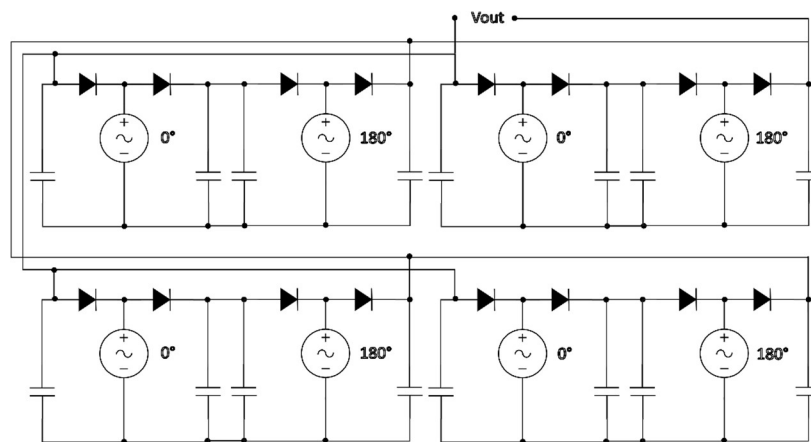


(b)

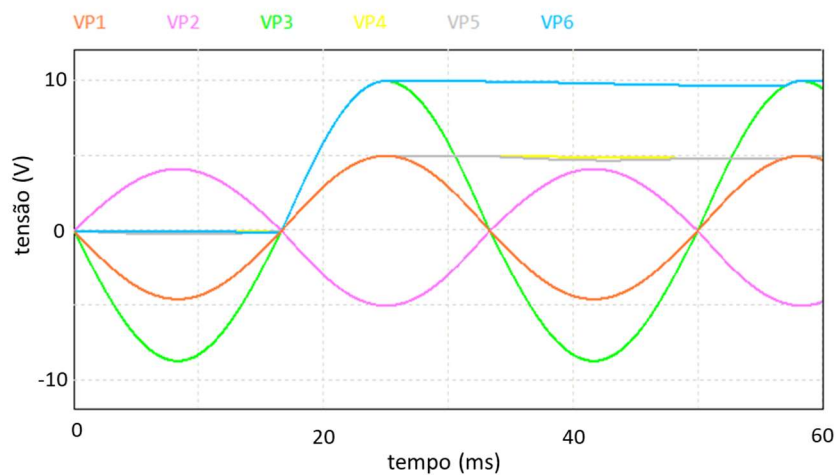
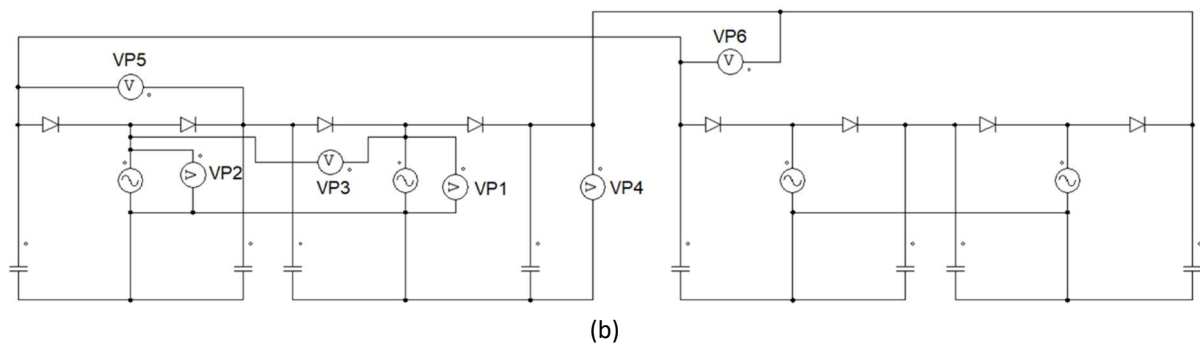


(c)

Figura 5.21: Interligação dos transdutores piezoelétricos: (a) Circuito com ligação mista dos elementos piezoelétricos das quatro vigas; (b) Layout no software PSIM para duas vigas com dois elementos piezoelétricos cada; (c) Resultado da simulação no software PSIM

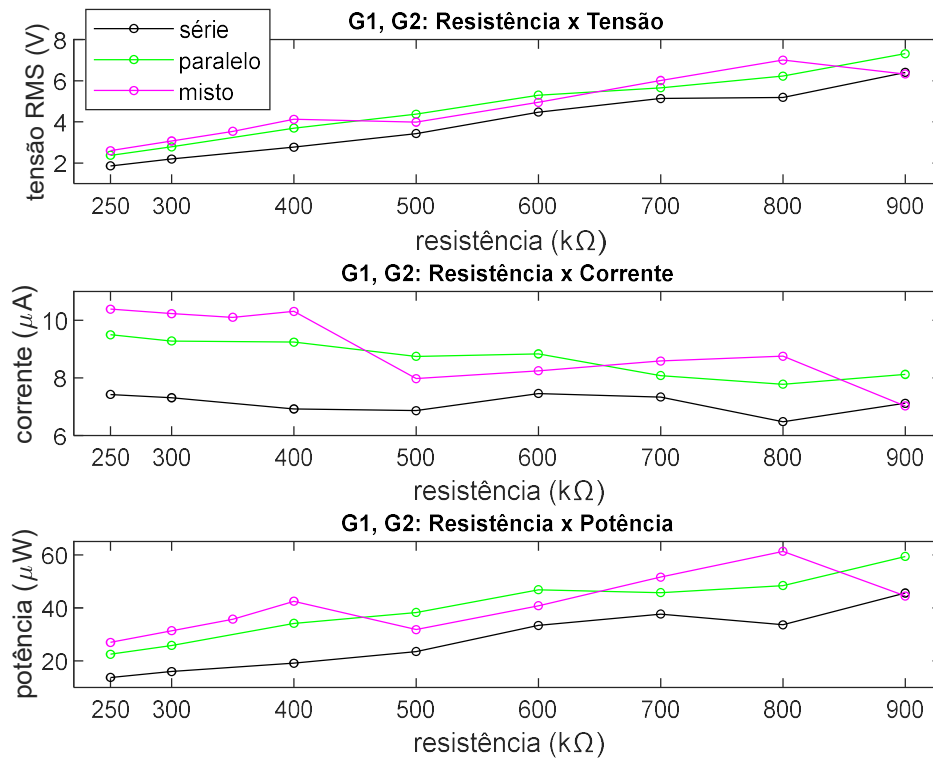


(a)



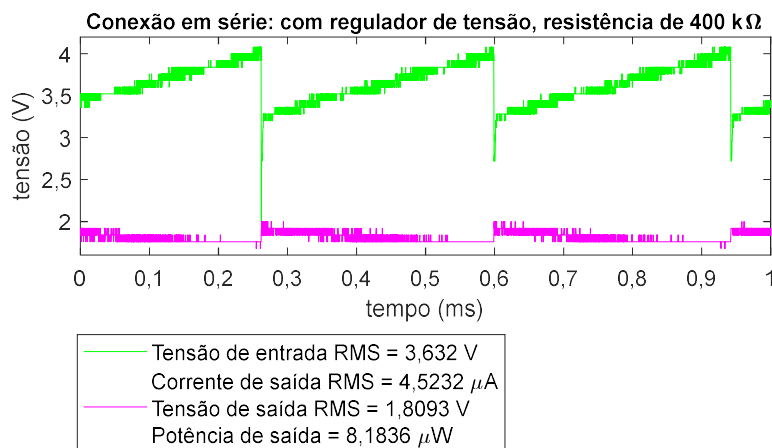
O resultado experimental (com valores de tensão RMS, corrente RMS e potência) para os circuitos com ligação dos sinais gerados pelas quatro vigas em série, paralelo e ligação dos sinais gerados pelos transdutores em uma configuração do tipo misto, utilizando resistências variando de 250 k Ω a 900 k Ω conectadas aos circuitos, com a velocidade de rotação do gerador em 30 Hz, está na Figura 5.22. Embora a configuração em série dos sinais gerados pelas vigas tenha o pressuposto de uma tensão resultante de saída maior relação à configuração em paralelo, no resultado observa-se que a tensão e corrente disponibilizadas pela configuração em paralelo é maior. Enquanto o circuito do tipo misto apresenta comportamento semelhante à configuração em paralelo.

Figura 5.22: Resultado experimental para interligação dos transdutores piezoelétricos utilizando a interligação das vigas em uma configuração série, paralelo, e interligação dos transdutores piezoelétricos em uma configuração mista.

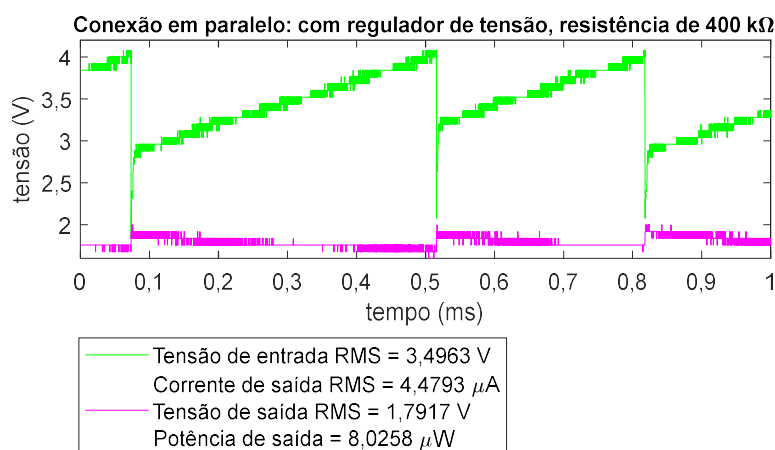


Para regulação da tensão de saída, os circuitos propostos para conexão dos elementos piezoelétricos foram conectados a um módulo retificador de tensão para aplicações de baixa potência, que utiliza o LTC3588-1 da Linear Technology, com a saída de tensão foi configurada para regulação em 1,8 V, obtendo os resultados da Figura 5.23, com uma resistência de 400 kΩ conectada à saída regulada, com a frequência de rotação do gerador em 30 Hz, verificando-se que a tensão de entrada e a potência disponibilizada na saída é semelhante para as três configurações (série, paralelo e misto).

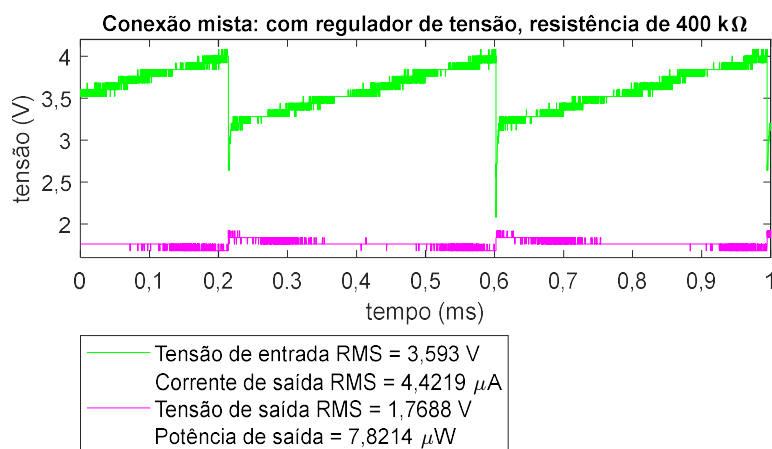
Figura 5.23: Utilização do módulo com o LTC3588-1 como regulador de tensão para as entradas: (a) Circuito com associação em série dos sinais gerados pelas vigas; (b) Circuito com associação em paralelo dos sinais gerados pelas vigas; (c) Circuito com associação misto



(a)



(b)

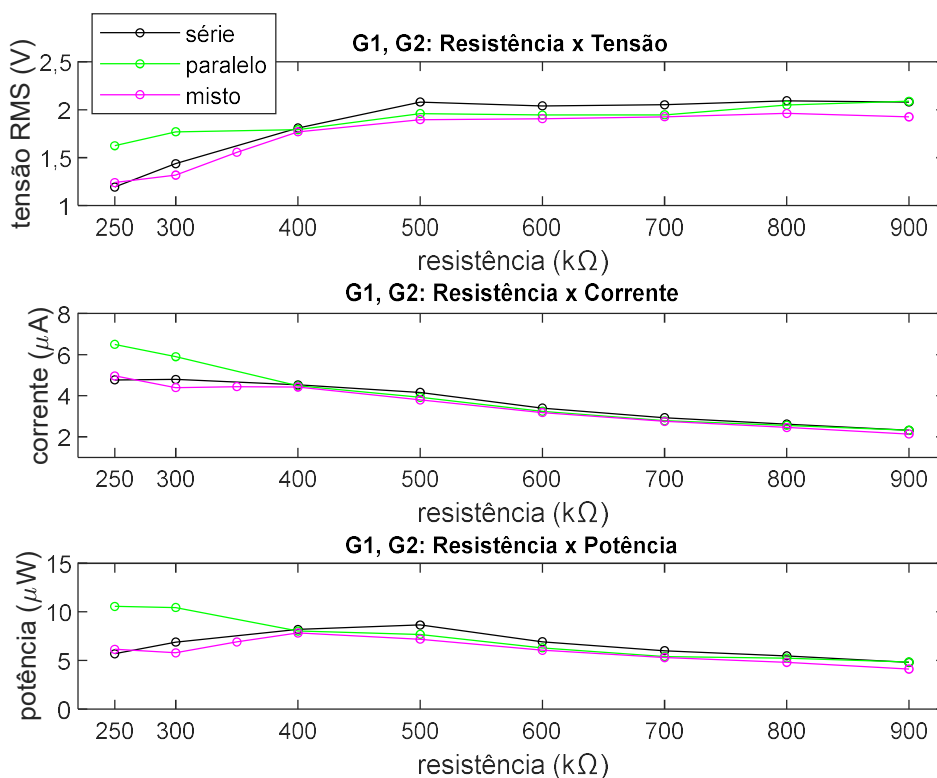


(c)

Na Figura 5.24 está o comportamento da tensão RMS, corrente RMS e potência de saída do módulo utilizado como regulador de tensão para resistências conectadas à saída

variando de 250 k Ω a 900 k Ω . Observa-se que para resistências abaixo de 400 k Ω o regulador não consegue fornecer potência suficiente para manter a tensão regulada em 1,8 V para as configurações série e do tipo misto, enquanto para a configuração em paralelo, as tensões RMS de saída com as resistências de 250 k Ω e 300 k Ω são de respectivamente, 1,6247 V e 1,7701 V.

Figura 5.24: comportamento da tensão RMS, corrente RMS e potência de saída do módulo utilizado como regulador de tensão para resistências conectadas à saída variando de 250 k Ω a 900 k Ω .



A potência máxima variou de 20 μ W a 60 μ W (obtidas com o uso de resistências diretamente conectadas à saída do circuito com configuração do tipo série, paralelo ou misto), para quatro vigas acopladas em dois módulos geradores. Ressalta-se que o uso do módulo com o LTC3588-1 para regulação da tensão forneceu uma potência de saída gerada de forma instantânea pelo funcionamento do gerador, sendo viável a adequação de um circuito para armazenamento da energia produzida e a análise da eficiência do circuito para regulação da tensão de saída.

5.1 VANTAGENS DO DISPOSITIVO

Dentre os resultados obtidos para o gerador proposto, destaca-se: a flexibilidade, justificada pela alternativa de acoplamento de vários módulos geradores (com até seis vigas cada, independente da defasagem na tensão gerada) para aumento da potência disponível, com conexão entre os sinais dos transdutores piezoelétricos em série ou paralelo; adaptabilidade e confiabilidade devido também a redução de interferências do meio nos transdutores piezoelétricos devido à estrutura física na qual estão dispostos, sendo os resultados experimentais obtidos com um único protótipo, que funcionou aproximadamente por 670 horas sem sinais de desgastes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um novo design para um gerador rotacional foi proposto, com a possibilidade de expansão de módulos geradores e da quantidade de transdutores piezoelétricos. O protótipo com as dimensões que foi construído tem a capacidade para até 36 transdutores piezoelétricos, considerando um deslocamento de até 10 mm para cada viga, tendo sido utilizado nos resultados experimentais oito transdutores. A estrutura física do gerador foi desenvolvida pensando na adaptabilidade ao ambiente e confiabilidade do dispositivo, de forma que os transdutores funcionam sem o contato direto com o meio externo.

Uma configuração experimental foi desenvolvida para análise do gerador, obtendo curvas de tensão e potência em função da frequência de rotação do gerador e da resistência conectada aos terminais de um circuito de retificação e interligação de tensões disponibilizadas pelos transdutores com fases diferentes, obtendo valores de potência média de 20 a 60 μW pra resistências de 250 k Ω a 900 k Ω com a velocidade de rotação em 30 Hz. Um módulo regulador de tensão (com o LTC3588-1) para aplicações de colheita de energia foi utilizado para regulação da tensão fornecida pelo gerador em 1,8 V.

Em comparação com os trabalhos já desenvolvidos, a estrutura física para o gerador proposto permite o acoplamento de módulos com até nove transdutores piezoelétricos cada, e os circuitos retificadores propostos possibilitam a interligação de sinais gerados pelos transdutores com fases distintas entre eles para aumento da potência disponível.

Em trabalhos futuros propõe-se a utilização de um circuito de armazenamento de energia e a análise da potência produzida com o aumento da quantidade de transdutores piezoelétricos e da quantidade de ímãs acoplados ao eixo do gerador, que no caso dos ímãs podem ser de até seis, já que os ímãs ficam acoplados em uma porca sextavada. Um ensaio de desgaste e a exposição do gerador à ambientes com poeira e/ou umidade também podem ser realizados para estimar a vida útil do dispositivo e avaliar a adaptabilidade do dispositivo ao meio.

REFERÊNCIAS

- ABELKFI, A. **Global Nonlinear Analysis of Piezoelectric Energy Harvesting from Ambient and Aeroelastic Vibrations**. [S.l.]: Dissertação. Virginia Polytechnic Institute, 2012.
- AL, Zhang L. F. Z. E. Piezoelectric energy harvester for rolling bearings with capability of self-powered condition monitoring. **Energy**, v. 238, 2022.
- AVIROVIK, Dragan *et al.* Miniature Contactless Piezoelectric Wind Turbine. **Integrated Ferroelectrics: An International Journal**, p. 1-13, Jun 2015.
- BAI, F *et al.* Fan-Structure Wind Energy Harvester Using Circular Array of Polyvinylidene Fluoride Cantilevers. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, p. 1-10, 2016.
- BOUZELATA Y, Kurt E. U. Y. C. R. Mitigation of High Harmonicity and Design of a Battery Charger for a New Piezoelectric Wind Energy Harvester. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 273, 2018.
- CHEN, Z. *et al.* Fully integrated inductor-less flipping-capacitor rectifier for piezoelectric energy harvesting. **Journal of Solid-State Circuits**, v. 52, n. 12, 2017.
- CHENG, Tinghai *et al.* A Small Magnetic Pre-Stress Based Piezoelectric Diaphragm Generator Induced By Hyperbaric Air. **IEEE Access**, v. 6, p. 26596-26604, June 2018.
- COVACI, C.; GONTEAN, A. Piezoelectric energy harvesting solutions: A Review. **Sensors**, vol. 20, 2020.
- ERTURK, A; INMAN, D J. A Distributed Parameter Electromechanical Model for Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters. **Journal of Vibration and Acoustics**, v. 130, 2008.
- ERTURK, A; INMAN, D J. Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable duffing oscillator with electromechanical coupling. **Journal of Sound and Vibration**, v. 330, n. 10, p. 2339-2353, 2011.
- FU, Hailing. **Rotational Energy Harvesting for Low Power Electronics**. [S.l.]: Thesis, 2018.
- FU, Hailing; YEATMAN, Eric M. A methodology for low-speed broadband rotational energy harvesting using piezoelectric transduction and frequency up-conversion. **Energy**, p. 152-161, February 2017.
- HABIB M, Lantgios I. A. K. A review of ceramic, polymer and composite piezoelectric materials. **iopscience.iop.org**, 2022.
- HABIB, Mahpara; LANTGIOS, Iza; HORNBOSTEL, Katherine. A review of ceramic, polymer and composite piezoelectric materials. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2022.
- HE L, Zhou J. Z. Z. G. X. Y. Y. C. G. Research on multi-group dual piezoelectric energy harvester driven by inertial wheel with magnet coupling and plucking. **Energy Conversion and Management**, v. 243, 2021.

KARAMI, M. A.; FARMER, J. R.; INMAN, D. J. Parametrically excited nonlinear piezoelectric compact wind turbine. **Renewable Energy**, v. 50, p. 977-987, 2013.

KHAMENEIFAR, F.; ARZANPOUR, S.; MOALLEM, M. A Piezoelectric Energy Harvester for Rotary Motion Applications: Design and Experiments. **IEEE Transactions on Mechatronics**, v. 18, p. 1527-1534, 2013.

KISHORE, R. A.; VUCKOVIC, D.; PRIYA, S. Ultra-Low Wind Speed Piezoelectric Windmill. **Ferroelectrics**, p. 98-107, 2014.

KURT, E. Design and implementation of a new contactless triple piezoelectrics wind energy harvester. **International Journal of Hydrogen Energy XXX**, p. 1-10, 2017.

LÓPEZ, J. C. TFM: Energy Harvesting. **Escuela de Ingeniería y Arquitectura**, 2011.

LOUNG, Hung T.; GOO, Nam S. Use of a magnetic force exciter to vibrate a piezocomposite generating element in a small-scale windmill. **Smart Materials and Structures**, p. 1-10, January 2012.

MADHU P, S P. M. D. M. H. N. N. P. M. Electrical Power Generation by Foot-steps using Piezo-electric Transducers. **International Journal of Recent Trends in Engineering & Research**, v. 2, p. 108-115, 2016.

MICEK P, Grzybek D. Wireless stress sensor based on piezoelectric energy harvesting for a rotating shaft. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 301, 2020.

NA Y, Lee M. L. J. J. Y. Wind energy harvesting from a magnetically coupled piezoelectric bimorph cantilever array based on a dynamic magneto-piezo-elastic structure. **Applied Energy**, v. 264, 2020.

NAROLIA T, Gupta V. I. Design and experimental study of rotary-type energy harvester. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 31, 2020.

OZDEMIR, A. E. Circuit topology for piezoelectric transducers in a piezoelectric energy harvester. **IET Renewable Power Generation**, v. 13, p. 2105-2110, 2019.

PRIYA, S. Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill. **Applied Physics Letters**, v. 87, p. 1-3, 2005.

PRIYA, S. Piezoelectric Windmill: A Novel Solution to Remote Sensing. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 44, p. 104-107, 2005.

RANGEL, R. F. Development and Characterization of an Electric Power Generator Using Piezoelectric (PZT) Subjected to Base Excitation. **IEEE Instrumentation and Measurement Society**, 2017.

RASHIDI R, Summerville N. N. M. Magnetically Actuated Piezoelectric-Based Rotational Energy Harvester With Enhanced Output in Wide Range of Rotating Speeds. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 55, 2019.

RIZAL, M. Design and experimental study of a piezoelectric energy harvester embedded in a rotating spindle excited by magnetic force. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2022.

SILVA, A. G. P. **Concepção de um Aerogerador de Forma Numérica e Experimental Utilizando Transdutores Piezoelétricos Baseados no Conceito de Energy Harvesting**. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, p. 106. 2020.

SILVA, A. G. P. Design, modelling and experimental analysis of a piezoelectric wind energy generator for low-power applications. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2021.

TAO J, Viet N. C. A. W. Q. Energy Harvesting from Wind by a Piezoelectric Harvester. **Engineering Structures**, v. 133, 2017.

TARTAGNI, M. **Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems**. [S.l.]: CATRENE Working Group on Energy Autonomous Systems, 2009. 84 p.

WANG Y, Yang Z. D. On the offset distance of rotational piezoelectric energy harvesters. **Energy**, v. 220, 2021.

YANG, Zhengbao *et al.* High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications. **Joule**, v. 2, p. 642-697, 2018.

ZHANG L, Zhang F. Z. Q. T. F. Piezoelectric energy harvester for rolling bearings with capability of self-powered condition monitoring. **Energy**, 2022.

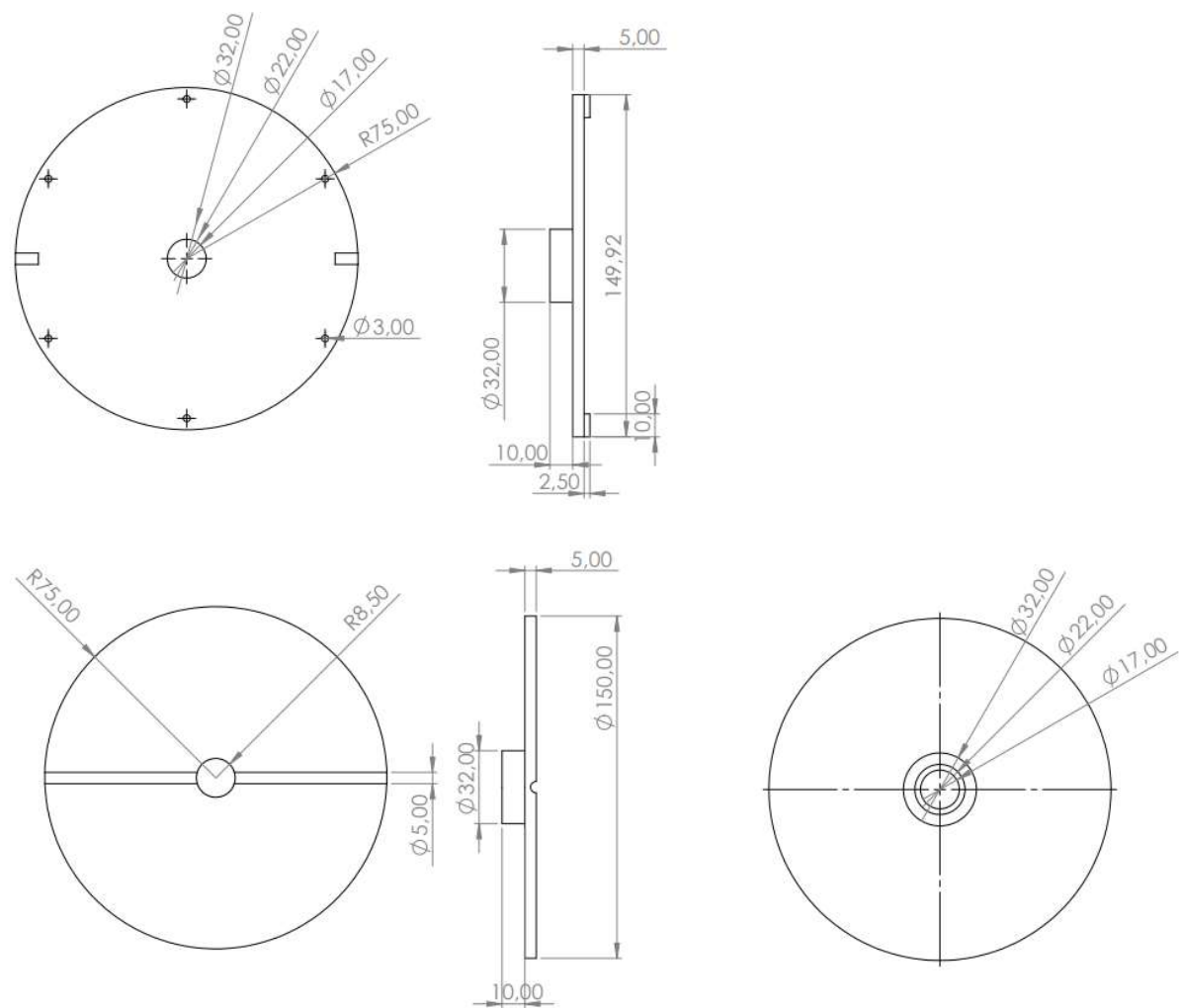
ZHANG, Jiantao *et al.* A rotational piezoelectric energy harvester for efficient wind energy harvesting. **Sensors and Actuators**, May 2017.

ZHAO, L. C. *et al.* A Water-proof Magnetically Coupled Piezoelectric- Electromagnetic Hybrid Wind Energy Harvester. **Applied Energy**, v. 239, p. 735-746., 2019.

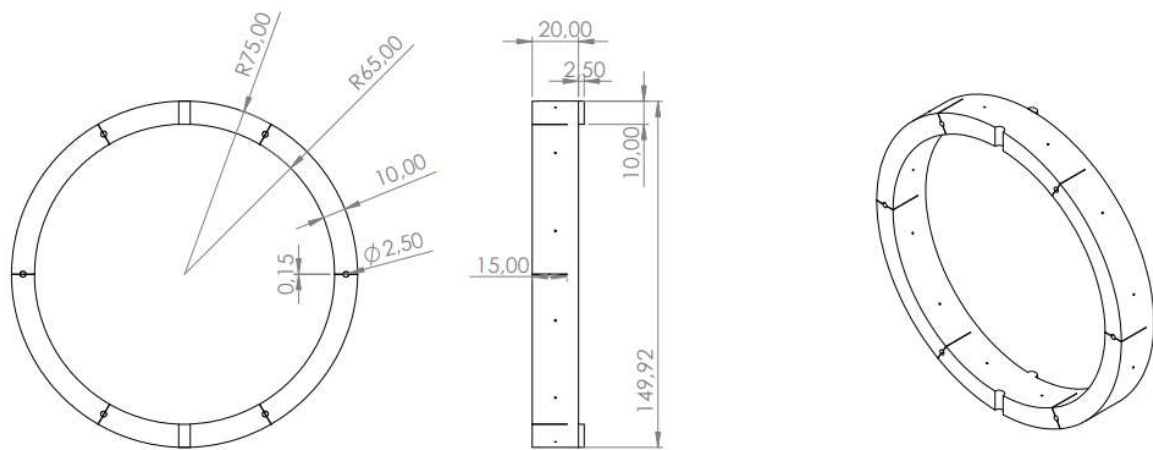
ZOU H, Zhang W. L. W. W. K. G. Q. P. Z. M. G. Design and experimental investigation of a magnetically coupled vibration energy harvester using two inverted piezoelectric cantilever beams for rotational motion. **Energy Conversion and Management**, v. 148, 2017.

ZOU H, Zhang W. W. Q. K. Z. G. Design, modeling and experimental investigation of a magnetically coupled flextensional rotation energy harvester. **Smart Materials and Structures**, v. 27, 2017.

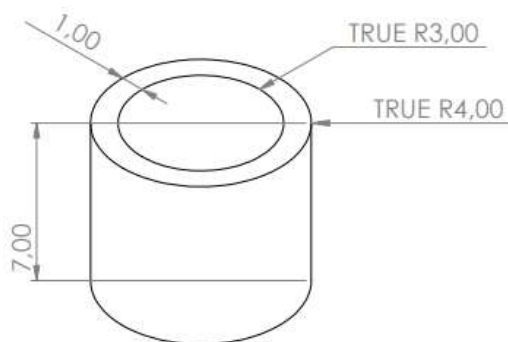
APÊNDICE 1 – TAMPA SUPERIOR E INFERIOR



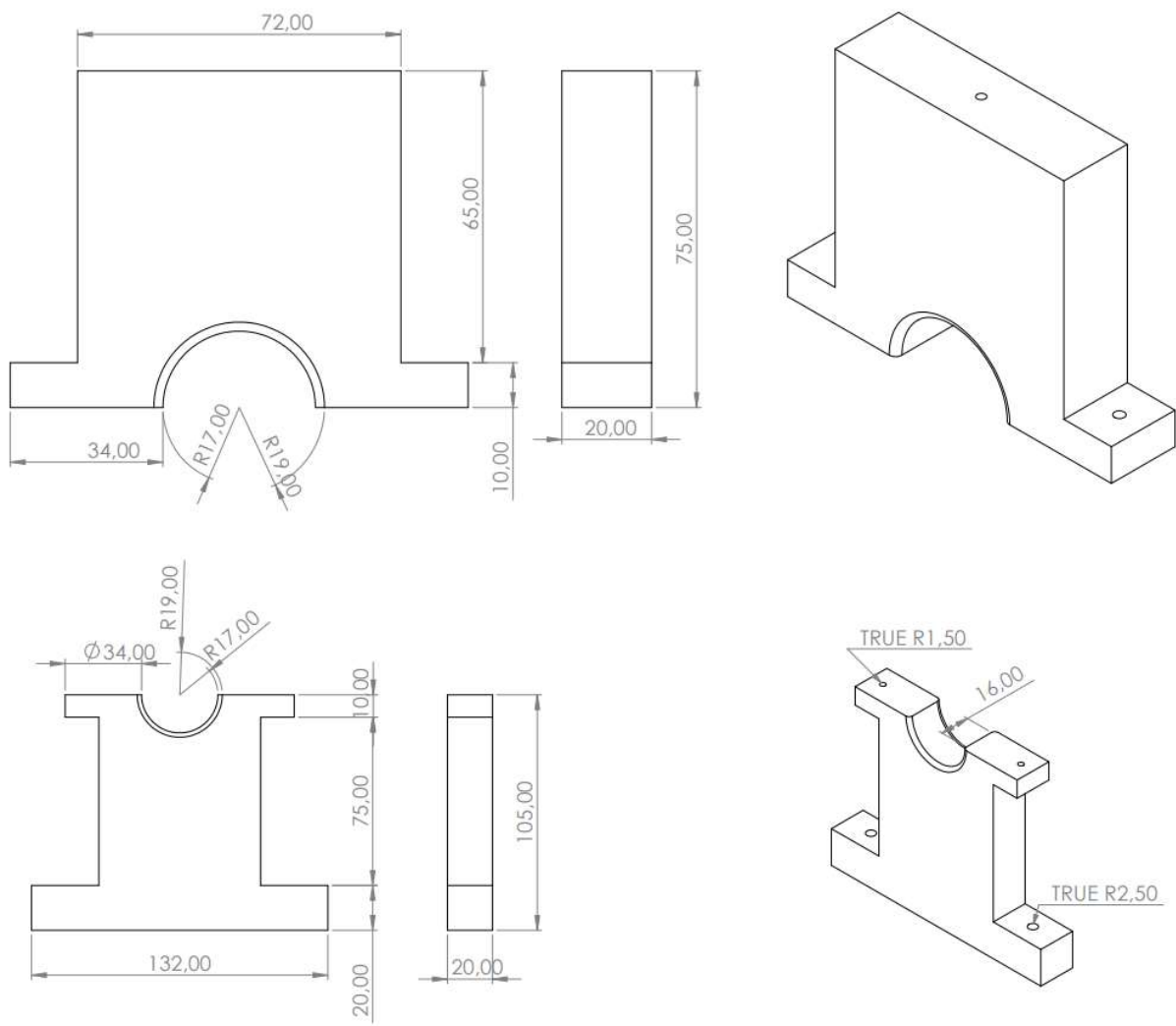
APÊNDICE 2 – ESTRUTURA PARA FIXAÇÃO DAS LÂMINAS COM OS ELEMENTOS PIEZOELÉTRICOS (ESTATOR)



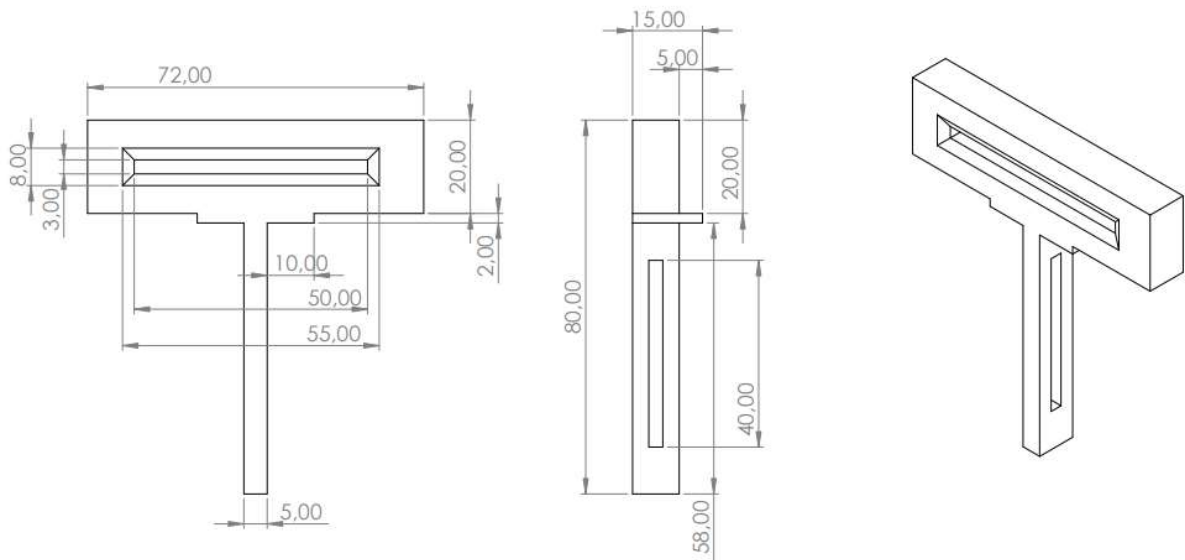
APÊNDICE 3 - ESPAÇADOR COM ROSCA INTERNA



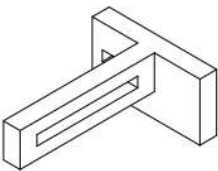
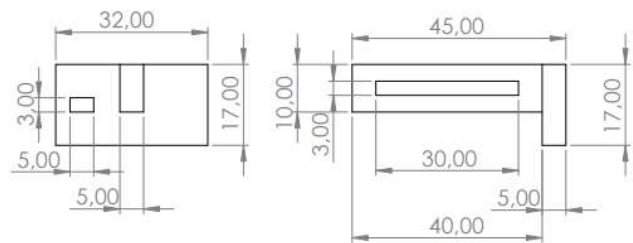
APÊNDICE 4 - BASE SUPERIOR E BASE INFERIOR PARA SUPORTE DO ESTATOR



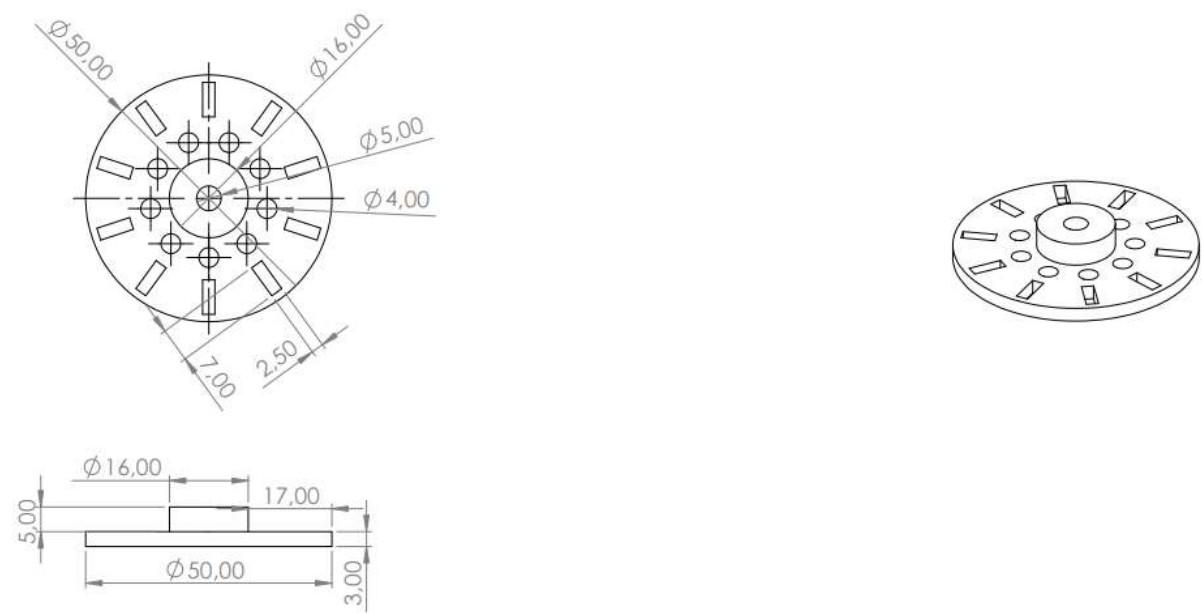
APÊNDICE 5 - BASE PARA MOVIMENTAÇÃO DO SENSOR DO TIPO ENCODER



APÊNDICE 6 – SUPORTE PARA O SENSOR DO TIPO ENCODER



APÊNDICE 7 – DISCO ENCODER



APÊNDICE 8 – CÓDIGO PARA LEITURA DO SINAL FORNECIDO PELO ENCODER NA PLATAFORMA ARDUINO

```
/* Universidade Federal da Paraíba Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica LaSEA - Lab. de Sistemas e Estruturas Ativas
Autor: Wendell Pereira de Farias
Orientadores: Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto, Prof. Dr. Alexandre Cezar de Castro
Data: 18/02/2022 */
// Definições do encoder
#define encoder2 2
int controle = 0;
long tempoAnterior; //Tempo anterior
float tempoDeslocamento = 1000;
float pulsos = 0;
float frequencia = 0;
float rpm = 0;
void setup() {
  Serial.begin(115200); // 115200
  delay (1000);
  pinMode(encoder2, INPUT);
}
void loop() {
  tempoAnterior = millis();
  while((millis()-tempoAnterior) <= tempoDeslocamento){
    if((digitalRead(encoder2) == 1) && (controle == 0)){
      pulsos = pulsos + 1;
      controle = 1;
    }
    if((digitalRead(encoder2) == 0) && (controle == 1)){
      controle = 0; } }
  frequencia = (pulsos*1000)/(10*tempoDeslocamento);
  rpm = frequencia*60;
  Serial.print(frequencia);
  Serial.print(" , ");
  Serial.println(rpm);
  pulsos = 0;}
```

APÊNDICE 9 - CÓDIGO PARA ACIONAMENTO DO MOTOR DC COM VELOCIDADE DE ROTAÇÃO VARIÁVEL

```
/* Universidade Federal da Paraíba Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica LaSEA - Lab. de Sistemas e Estruturas Ativas
Autor: Wendell Pereira de Farias
Orientadores: Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto, Prof. Dr. Alexandre Cezar de Castro
Data: 18/02/2022 */
// --- Variáveis Globais ---
#define R_EN12 12 //Pino ativacao que será ligado o BTS7960
#define L_EN13 13 //Pino ativacao que será ligado o BTS7960
#define PWM5 5 //Pino PWM que sera ligado o BTS7960
#define PWM6 6 //Pino PWM que sera ligado o BTS7960
#define pino8 8
#define analogPin 0 // pino para leitura do potenciômetro
int valor_pwm = 0;
void selecioneFrequencia(char opcao)
{
/*
TABLE:
opcao frequencia
1 62.5 kHz
2 7.81 kHz
3 1.95 kHz
4 976.56 Hz
5 488.28 Hz
6 244.14 Hz
7 61.03 Hz
*/
TCCR2B = opcao;
} //end selecioneFrequencia
void selecionePWM_pin05(int valor)
{
OCR2B = valor;
} //end selecionePWM_pin05
void selecionePWM_pin06(int valor)
{
```

```

OCR2A = valor;
} //end seleccionePWM_pin06
// --- Configurações Iniciais ---
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  TCCR2A = 0xA3; //Configura operação em fast PWM, utilizando registradores OCR2x
para comparação
//1010 0011
seleccioneFrequencia(4); //Seleciona opção 4 para frequência PWM (aprox 7.8kHz)
//Entrada
pinMode(analogPin, INPUT); // configura pino como entrada
//Saida
pinMode(R_EN12, OUTPUT);
pinMode(L_EN13, OUTPUT);
pinMode(PWM5, OUTPUT);
pinMode(PWM6, OUTPUT);
pinMode(pino8, OUTPUT); // configura pino como saída
} //end setup
void loop()
{
  digitalWrite(R_EN12, HIGH);
  digitalWrite(L_EN13, HIGH);
  digitalWrite(PWM5, LOW); //High
//digitalWrite(PWM6, HIGH);
//digitalWrite(pino7, HIGH); //Ativa alimentacao enconder uno
digitalWrite(pino8, HIGH);
valor_pwm = map(analogRead(analogPin), 0, 1023, 0, 255);
//analogWrite(PWM5, valor_pwm);
analogWrite(PWM6, valor_pwm);
  Serial.print("PWM ");
  Serial.println(valor_pwm, DEC);
} //end loop

```