

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS ITUMBIARA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Simulação de circuitos a base de amplificadores operacionais para colheita de energia

Marcus Vinicius Vale Lopes

Itumbiara/GO
2021



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Marcus Vinicius Vale Lopes

Matrícula: 20161040100135

Título do Trabalho: Simulação de circuitos a base de amplificadores operacionais para colheita de energia

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 05 / 08 / 2021.
Local Data

Marcus Vinicius Vale Lopes

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

MARCUS VINICIUS VALE LOPES

**SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS A BASE DE AMPLIFICADORES
OPERACIONAIS PARA COLHEITA DE ENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini

Itumbiara/GO

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

L864s	Lopes, Marcus Vinicius Vale Simulação de circuitos a base de amplificadores operacionais para colheita de energia. / Marcus Vinicius Vale Lopes. -- Itumbiara, 2021. 73 p. : il. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2021. Orientador: Prof. Dr. Bruno Gabriel Leonardo Zambolini Vicente 1. Engenharia 2. Amplificador. 3.Vibração mecânica. I. Título. II. Vicente, Bruno Gabriel Leonardo Zambolini. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. CDD 621.381535
-------	--

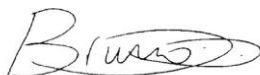
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecária: Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684

Marcus Vinicius Vale Lopes

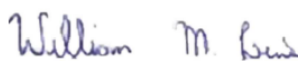
Simulação de circuitos a base de amplificadores operacionais para colheita de energia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca avaliadora, parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia de Controle e Automação junto ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Câmpus Itumbiara.

Aprovado em 22 de julho de 2021.



Prof. Dr. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente
IFG — Campus Itumbiara
Orientador



Prof. Me. Willian Martins Leão
CEFET/MG — Campus Contagem
Avaliador



Prof. Dr. Thales Lima Oliveira
IFG Campus Itumbiara
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha mãe, Walkyria Vale de Lima por me apoiar por todo o meu caminho, ajudar em todos os momentos difíceis, e por possibilitar a me tornar quem sou, sem ela nada seria possível.

Aos meus irmãos Lorena Lina Vale Lopes e Hermes Ferreira da Lima Neto, por sempre estarem ao meu lado, não importando as dificuldades.

A minha Vó Alzira Vale de Lima, que sempre me apoiou e cuidou de mim.

Aos meus amigos Rodrigo Robino, Felipe Oliveira, Raphael Scandura, Willian Robino, Douglas Antônio, José Antônio, Lucas Araújo, Matheus Terra, dentre outros que sempre estiveram ao meu lado durante a minha jornada, me apoiando e me incentivando a continuar em frente.

A todos colaboradores do Instituto Federal de Goiás – Câmpus Itumbiara, foram 5 anos de muito aprendizado e conquistas, no qual, tive o prazer de fazer inúmeras amizades.

Ao corpo docente do Instituto Federal de Goiás – Câmpus Itumbiara, que ajudaram no meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos meus colegas de turma, pelo apoio, ensinamentos e discussões.

Ao professor Dr. Bruno Zambolini Vicente, pela orientação, um excelente profissional e pessoa do qual tive o prazer de conhecer e ser aluno.

RESUMO

O presente trabalho apresenta a avaliação do modelo computacional de dois circuitos a base de amplificadores operacionais para o aproveitamento da energia mecânica gerada por vibrações presentes no ambiente através de materiais piezoelétricos. Esse processo de se converter energia mecânica que seria desperdiçada em energia elétrica utilizável é chamado de *energy harvesting* (colheita de energia). Devido o material piezoelétrico possuir natureza capacitiva, para aumentar a eficiência do circuito de colheita é necessário anular tal reatância utilizando de indutores, e a típica operação em baixas frequências para sistema de colheitas de vibração, implica um alto valor de reatância indutiva. Para lidar com esse cenário, utilizou-se duas configurações de circuitos eletrônicos de indutores sintéticos a base de amplificadores operacionais para atingir tais valores. Através dessas configurações e com intuito de analisar computacionalmente esse tipo de geração, este trabalho contribuiu demonstrando a lei de formação do indutor sintético a base de amplificadores operacionais e investigou os circuitos propostos aplicados na extração de energia de pulsos isolados, pulsos repetidos e tom senoidais, diante aos resultados, comprovou-se capacidade de extração de energia das topologias avaliadas, evidenciando o potencial dessa linha de pesquisa.

Palavras-chave: *Energy harvesting, indutores sintéticos, materiais piezoelétricos, amplificadores operacionais, vibrações mecânicas.*

ABSTRACT

The present work presents the evaluation of the computational model of two circuits based on operational amplifiers, for the utilization of mechanical energy generated by vibrations present in the environment through piezoelectric materials. This process of converting wasted mechanical energy into usable electrical energy is called energy harvesting. Due to the fact that the piezoelectric material has a capacitive nature, to increase the efficiency of the harvesting circuit it is necessary to cancel such reactance using inductors, and the typical operation at low frequencies for vibration harvesting systems implies a high value of inductive reactance, thus we used two configurations of electronic circuits of synthetic inductors based on operational amplifiers to achieve such values. Through these configurations and in order to analyze computationally this type of generation, this work contributed by demonstrating the formation law of the operational amplifier-based synthetic inductor and investigated the proposed circuits applied to the extraction of energy from isolated pulses, repeated pulses and sine tones, given the results, the capacity of energy extraction of the topologies evaluated was proven, highlighting the potential of this line of research.

Keywords: *Energy harvesting, synthetic inductors, piezoelectric materials, operational amplifiers, mechanical vibrations.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estímulo/Resposta em relação a vários efeitos indicados no material. Os materiais inteligentes correspondem às células não diagonais.	16
Figura 2 - Estrutura cristalina (a) centrossimétrico (b) não centrossimétrico.	18
Figura 3 - Relação dos piezoelétricos e subgrupos baseados na simetria.	19
Figura 4 - (a) o efeito piezoelétrico direto e (b) o efeito indireto; (i) contração; (ii) expansão. As linhas tracejadas indicam as dimensões originais.....	20
Figura 5 - Diagrama Tensão X Deformação característico do aço tracionado.....	21
Figura 6 - (a) Efeito piezoelétrico direto; (b) relação entre tensão mecânica e deslocamento elétrico.	22
Figura 7 - (a) Efeito piezoelétrico indireto; (b) relação entre um campo elétrico e deslocamento elétrico de um material piezoelétrico.....	23
Figura 8 - (a) Efeito piezoelétrico indireto; (b) relação entre um campo elétrico e deformação.	23
Figura 9 - Processo de Polarização associado aos materiais piezoelétricos.	26
Figura 10 - Estrutura atômica do PZT: (a) Estado tetragonal distorcido; (b) Estado Cúbico. .	26
Figura 11 - Polarização do PZT. (a) material sem polarização; (b) aplicação de campo elétrico; (c) após a polarização.	27
Figura 12 - Exemplos de fontes de energia para colheita de energia.	28
Figura 13 - Elementos básicos de um sistema de colheita de energia.	29
Figura 14 - Energia disponível pelas atividades humanas.....	30
Figura 15 - Convenção de eixos para um material piezoelétrico.	31
Figura 16 - Modo de operação do coeficiente piezoelétrico. (a) 33; (b) 31.	31
Figura 17 - Modelo conceitual gerador piezoelétrico.....	32
Figura 18 - Tipos de geradores piezoelétricos, unimorfo (acima) e bimorfo (abaixo).....	33
Figura 19 - Circuito equivalente de um gerador piezoelétrico.	34
Figura 20 - O componente de Tellegen: gyrator; a) simbologia; b) geração de fonte de corrente; c) geração de indutor.	36
Figura 21 - Configuração de indutor sintético baseado em amplificadores operacionais aterrado.	37
Figura 22 - Configuração de indutor sintético baseado em amplificadores operacionais flutuante.....	38
Figura 23 - Indutor sintético de Antoniou (1969).....	39

Figura 24 - Estrutura mecânica. (a) Viga em balanço (<i>cantilever</i>); (b) Configuração <i>unimorph</i>	41
Figura 25 - Pastilha piezoelétrica utilizada por Vicente (2019).	41
Figura 26 - Representação do circuito de colheita de energia.	42
Figura 27 - Representação do circuito de colheita de energia com seus respectivos valores...43	
Figura 28 - Representação do circuito sintético aterrado com seus respectivos valores.	44
Figura 29 - Representação do circuito sintético flutuante com seus respectivos valores.	45
Figura 30 - Circuito de colheita de energia utilizando o indutor aterrado no ambiente de simulação <i>Eagle education edition</i>	46
Figura 31 - Circuito de colheita de energia utilizando o indutor sintético flutuante no ambiente de simulação <i>Eagle education edition</i>	46
Figura 32 - Pulso de tensão isolado (1º caso).	49
Figura 33 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (1º caso).	50
Figura 34 - Energia acumulada versus tempo (1º caso).	51
Figura 35 - Pulso de tensão repetido com frequência de 10Hz (2º caso).	52
Figura 36 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (2º caso).	53
Figura 37 - Energia acumulada versus tempo (2º caso).	54
Figura 38 - Pulso de tensão repetido com frequência de 100Hz (3º caso).	54
Figura 39 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (3º caso).	55
Figura 40 - Energia acumulada versus tempo (3º caso).	56
Figura 41 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (4º caso).	58
Figura 42 - Energia acumulada versus tempo (4º caso).	58
Figura 43 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (5º caso).	59
Figura 44 - Energia acumulada versus tempo (5º caso).	60
Figura 45 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (6º caso).	61
Figura 46 - Energia acumulada versus tempo (6º caso).	62
Figura 47 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (7º caso).	63
Figura 48 - Energia acumulada versus tempo (7º caso).	63
Figura 49 - Indutor sintético aterrado com valores extremos de tolerância para as resistências.	65
Figura 50 - Indutor sintético flutuante com valores extremos de tolerância para as resistências.	65
Figura 51 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (8º caso).	66
Figura 52 - Energia acumulada versus tempo (8º caso).	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de potência máxima e média, energia acumulada (regime pulsado, circuito aterrado).....	56
Tabela 2 - Valores de potência máxima e média, energia acumulada (regime pulsado, circuito flutuante).....	56
Tabela 3 - Valores de potência máxima e média, energia acumulada (2º Etapa).....	60
Tabela 4 - Valores de potência máxima e média, energia acumulada (3º Etapa).....	64
Tabela 5 - Valores de potência máxima e média, energia acumulada (4º Etapa).....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	<i>Alternating current</i> (Corrente alternada).
Amp - Ops	Amplificadores Operacionais
BaTiO ₃	Titanato de Bário
DC	<i>Direct current</i> (Corrente contínua).
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de circuito impresso).
PVDF	<i>Polyvinylidene Fluoride</i> (Fluoreto de Polivinilideno)
PZT	<i>Lead zirconate titanate</i> (Titanato Zirconato de chumbo)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	13
INTRODUÇÃO.....	13
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
CAPÍTULO 2	16
CONCEITOS DE PIEZOELETRICIDADE.....	16
2.1 INTRODUÇÃO.....	16
2.2 HISTÓRIA DA PIEZOELETRICIDADE	17
2.3 ESTRUTURA CRISTALINA.....	17
2.4 EFEITO PIEZOELÉTRICO.....	19
2.5 EFEITO DIRETO.....	21
2.6 EFEITO INDIRETO	22
2.7 EQUAÇÕES CONSTRUTIVAS	24
2.8 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS SINTÉTICOS	25
CAPÍTULO 3	28
COLHEITA DE ENERGIA (<i>ENERGY HARVESTING</i>)	28
3.1 INTRODUÇÃO.....	28
3.2 MODOS DE OPERAÇÃO.....	30
3.3 DISPOSITIVO DE CAPTURA DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA.....	32
3.4 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO GERADOR PIEZOELÉTRICO	33
CAPÍTULO 4	35
INDUTOR SINTÉTICO	35
4.1 CIRCUITO PARA GRANDES INDUTANCIAS	35
4.2 CONFIGURAÇÃO DE INDUTOR SINTÉTICO	38
CAPÍTULO 5	41
PROJETO EXPERIMENTAL COMPUTACIONAL	41
5.1 CIRCUITO PARA COLHEITA DE ENERGIA	42
5.2 TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO.....	42
5.3 CIRCUITO DO INDUTOR SINTÉTICO PARA COLHEITA DE ENERGIA.....	43
5.4 CARGA RL	45
5.5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	45

CAPÍTULO 6	48
RESULTADOS	48
6.1 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	48
6.2 RESULTADOS DA 1º ETAPA DE SIMULAÇÕES	49
6.2.1 RESULTADOS PARA O 1º CASO	49
6.2.2 RESULTADOS PARA O 2º CASO	51
6.2.3 RESULTADOS PARA O 3º CASO	54
6.2.4 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	56
6.3 RESULTADOS DA 2º ETAPA DE SIMULAÇÕES	57
6.3.1 RESULTADOS PARA O 4º CASO	57
6.3.2 RESULTADOS PARA O 5º CASO	59
6.3.3 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	60
6.4 RESULTADOS DA 3º ETAPA DE SIMULAÇÕES	61
6.4.1 RESULTADOS PARA O 6º CASO	61
6.4.2 RESULTADOS PARA O 7º CASO	62
6.4.3 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	64
6.5 RESULTADOS DA 4º ETAPA DE SIMULAÇÕES	64
6.5.1 RESULTADOS PARA O 8º CASO	64
6.5.2 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	67
CAPÍTULO 7	68
CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS.....	70

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Diante do agravamento do aquecimento global, a sociedade busca pela diminuição dos impactos ambientais causados pelas fontes de energias tradicionais, e em decorrência a isso, todos os esforços estão na implantação e no desenvolvimento de alternativas limpas e renováveis para solucionar esse problema, essas energias renováveis são oriundas de recursos naturais como sol, vento, chuva, marés e energia geotérmica, que são recursos naturalmente reabastecidos (LEITE, 2013), uma vertente dessa área é o conceito de colheita de energia (*Energy Harvesting*), que é o processo de retirar energia de fontes externas e armazena-la para pequenos dispositivos autônomos, sendo a conversão da deformação mecânica em energia elétrica a partir de um elemento piezoelétrico uma das formas amplamente estudadas (PERLINGEIRO, et al., 2016).

Atualmente a conversão de energia através do elemento piezoelétrico produz baixos níveis de energia, logo não seria possível desenvolver grandes usinas de energia para substituir as tradicionais a combustão, porém, com o avanço da micro e nanotecnologia os dispositivos eletrônicos portáteis estão cada vez menores e capazes de trabalhar com níveis de energia muito baixos. Esses dispositivos costumam ser na maioria das vezes alimentadas por baterias, que são fontes finitas de energia, esse fato se torna um problema em algumas ocasiões (ROCHA, 2012). Com o avanço da tecnologia de colheita de energia (*Energy Haversting*) a utilização do elemento piezoelétrico poderá ser uma solução ao uso de tais baterias, ou até mesmo podendo ser utilizado em conjunto da mesma, fazendo a recarga no local do dispositivo eletrônico.

Quando se fala das fontes de energia disponíveis no meio ambiente, logo se pensa na energia solar e eólica, porém, uma energia que se encontra facilmente em nosso meio é a energia cinética na forma de vibrações mecânicas, e uma das abordagens mais promissoras para captação dessa energia cinética é por meio da piezoeletricidade (KHALIGH *et al.*, 2010). Consequente, os transdutores de vibração com tecnologia piezoelétrica têm sido estudados de forma acentuada, se caracterizando como uma tecnologia mais madura, com um considerável número de pesquisas em andamento e publicações efetivadas, que demonstram que os materiais piezoelétricos são candidatos mais adequados para converter de forma eficiente tensão

mecânica em energia elétrica, podendo suportar uma grande quantidade de tensão mecânica além de possuir flexibilidade quanto ao material piezoelétrico a ser utilizado (FRANKLIN, 2014).

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Devido ao cenário atual causado pela pandemia da COVID-19, no qual o isolamento social e o distanciamento são essenciais para o combate do vírus, o presente trabalho de conclusão de curso sofreu algumas adaptações, visto que a prática de experimentos em laboratórios pode levar riscos à saúde dos envolvidos e de seus familiares.

Este trabalho teve o principal objetivo propor e analisar computacionalmente modelos computacionais de dois circuitos a base de amplificadores operacionais para o aproveitamento da energia mecânica gerada por vibrações presentes no ambiente através de materiais piezoelétricos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado conforme descrito abaixo:

- Capítulo 1 – Introdução
- Capítulo 2 – Conceitos de piezoeletricidade
- Capítulo 3 – Colheita de Energia (*Energy Harvesting*)
- Capítulo 4 – Indutor Sintético
- Capítulo 5 – Projeto Experimental Computacional
- Capítulo 6 – Resultados
- Capítulo 7 – Considerações Finais e Sugestões para Trabalhos Futuros
- Referências Bibliográficas

O **Capítulo 2** apresenta uma introdução aos materiais inteligentes. Em seguida, a história do fenômeno da piezoeletricidade, conceitos relacionados ao funcionamento do material piezoelétrico, entre outras características.

O **Capítulo 3** introduz os aspectos gerais do termo colheita de energia (*Energy Harvesting*), apresenta modos de operação do circuito de colheita, mostra o dispositivo de captura de energia piezoelétrica e o circuito equivalente do gerador piezoelétrico. Além disso, uma revisão bibliográfica das principais obras presentes na literatura é apresentada.

O **Capítulo 4** aborda o indutor sintético e apresenta duas configurações de circuitos eletrônicos que simulam grandes valores de indutância. No decorrer do capítulo, uma das

configurações é escolhida e mapeada, e por fim é mostrado a equação que calcula o valor da indutância do circuito eletrônico.

O **Capítulo 5** descreve o projeto experimental computacional. Neste capítulo são apresentados o modelo de material piezelétrico escolhido, o circuito de colheita de energia, o *software* utilizado nas simulações computacionais, bem como, os valores dos elementos que compõe os circuitos eletrônicos dos indutores sintéticos. Além disso, são definidos os parâmetros a serem calculados no trabalho.

O **Capítulo 6** descreve as etapas adotadas para as simulações computacionais e os seus resultados obtidos, gráficos de potência máxima, média e energia acumulada. Em seguida, são apresentadas as discussões sobre os resultados obtidos.

O **Capítulo 7** apresenta as considerações finais sobre o trabalho e sugestões de trabalhos futuros seguindo a linha de pesquisa no campo de aproveitamento de energia do ambiente.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS DE PIEZOELETRICIDADE

2.1 INTRODUÇÃO

Os materiais piezoelétricos fazem parte dos chamados materiais inteligentes, ou materiais multifuncionais, os quais possuem a habilidade de reagir significativamente aos estímulos de diferentes naturezas físicas (PREUMONT, 2006). Em resumo, os materiais inteligentes possuem um acoplamento entre grandezas mecânicas e não mecânicas, que confere ao material um tipo especial de comportamento (OLIVEIRA; SAVI, 2013), um exemplo desses comportamentos é a foto-elasticidade, no qual quando o material é pressionado, o mesmo emite como resposta luz. A Figura 1 lista, diversos efeitos que são observados em materiais que respondem as tais entradas, como, por exemplo, entradas mecânicas, elétricas, magnéticas, térmicas e luz.

Figura 1 - Estímulo/Resposta em relação a vários efeitos indicados no material. Os materiais inteligentes correspondem às células não diagonais.

Saída Entrada	Força	Carga Elétrica	Fluxo Magnético	Temperatura	Luz
Pressão	Elasticidade	Piezo-Eletricidade	Magnetostricção		Foto-elasticidade
Campo Elétrico	Piezo-Eletricidade	Permissividade			Efeito optico elétrico
Campo Magnético	Magnetostricção	Efeito eletro-magnético	Permeabilidade		magneto-optico
Calor	Expansão Térmica	Piro-eletricidade		Calor Específico	
Luz	Foto-estricção	Efeito Fotovoltaico			Índice de Refração

Fonte: Adaptado de Preumont (2006).

A utilização dos materiais inteligentes na área tecnológica tenta explorar a ideia de construir sistemas e estruturas com comportamento adaptativo que tenham capacidade de alterar propriedades, devido às mudanças ambientais (OLIVEIRA; SAVI, 2013), se a magnitude do material é adequada, o acoplamento pode ser usado para construir transdutores

discretos ou distribuídos de vários tipos, os quais podem ser usados como sensores, atuadores, ou mesmo estruturas integradas com vários graus de adaptação e complexidade (PREUMONT, 2006).

2.2 HISTÓRIA DA PIEZOELETRICIDADE

Em 1880 os irmãos Jacques e Pierre Curie descobriram que existiam materiais que, sob pressão ou tensão mecânica geram carga elétrica em sua superfície. Esse efeito foi posteriormente denominado de efeito piezoelétrico (PERLINGEIRO, et al., 2016), esse termo deriva da palavra grega “πιέζειν” (“piezen”), que significa pressão ou apertar, logo esse termo significa “eletricidade por pressão”. Um ano depois Jonas Ferdinand Gabriel Lippmann mostrou com argumentos baseados na termodinâmica que devia existir também o efeito inverso, isto é, quando se aplica uma tensão elétrica nestes materiais, eles devem se deformar (IKEDA, 1996). Logo após os irmãos Curie observaram este efeito também.

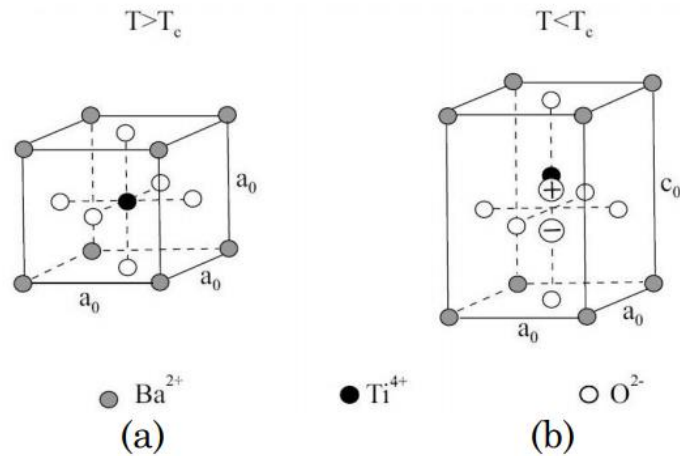
A primeira utilização prática foi feita por um físico francês chamado Paul Langevin, no desenvolvimento de sonares durante a Primeira Guerra Mundial. Utilizando cristais de quartzo acoplados a massas metálicas, assim inventando o transdutor tipo Langevin, para gerar ultrassom na faixa de algumas dezenas de quilo Hertz (kHz) (ARMEDANI et al. 2016).

Devido à dificuldade de estimular a fabricação de transdutores construídos a base de quartzo, por dependerem de geradores de alta tensão, após a Primeira Guerra Mundial começou uma busca por desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos. A URSS e o Japão desenvolveram durante a década de 40 e 50 as cerâmicas piezoelétricas de Titanato de Bário, os EUA desenvolveram as cerâmicas piezoelétricas de Titanato Zirconato de Chumbo, ou PZT's, isto é, eles consistem em cristais mistos de zirconato de chumbo e titanato de chumbo, sendo esta, a mais utilizada atualmente, devido suas diversas variações (ARMEDANI et al. 2016).

2.3 ESTRUTURA CRISTALINA

O efeito piezoelétrico só pode ser exibido por materiais cuja estrutura cristalina não possua centro de simetria, sendo essa assimetria natural ou uma propriedade resultante da fabricação (SCHULZ, 2012). Observe na Figura 2 a estrutura cristalina dos materiais:

Figura 2 - Estrutura cristalina (a) centrossimétrico (b) não centrossimétrico.

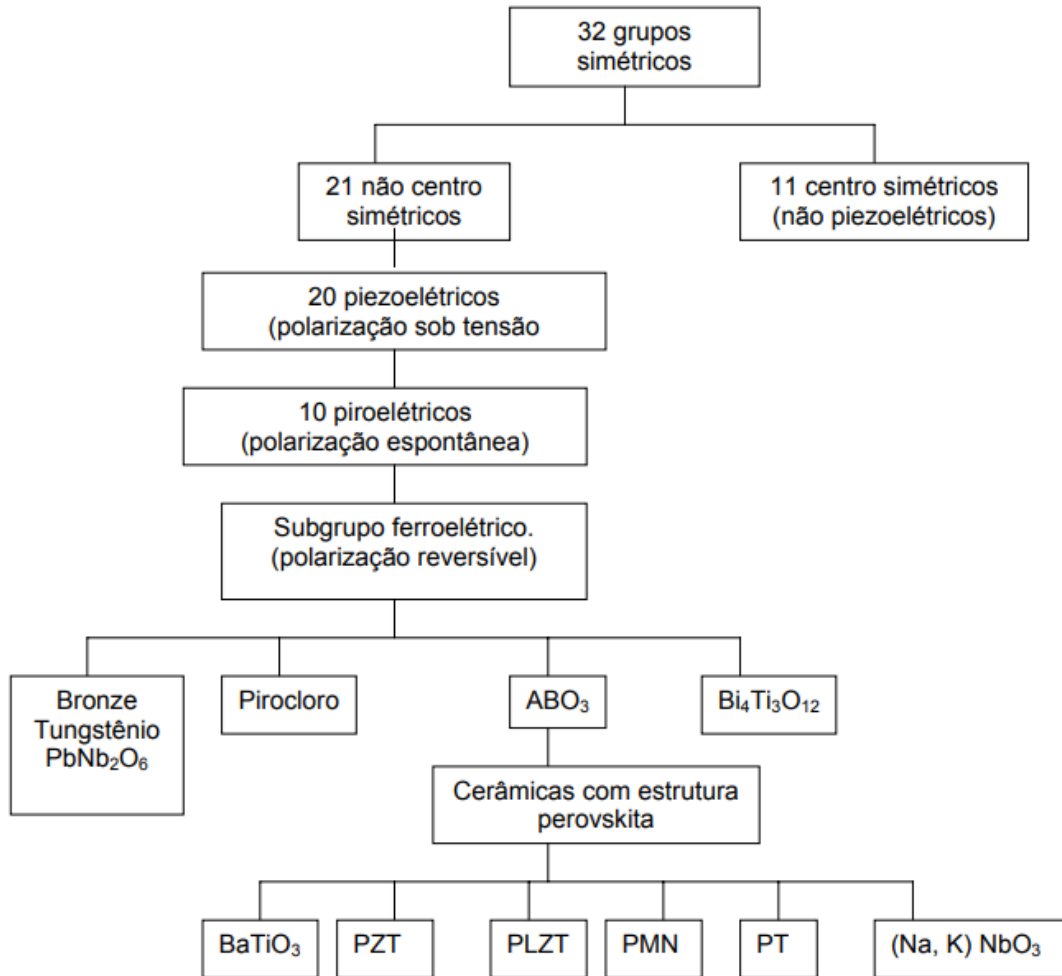


Fonte: Kaltembacher, (2007) apud Schulz, (2012).

Considerando essas propriedades de simetria, todos os cristais são divididos em 32 grupos diferentes, e desses 32 grupos 21 não possuem um centro de simetria, ou seja, possuem condições necessárias para existir piezoelectricidade, e desses 21 grupos, apenas 20 deles são piezoelétricos (DROESCHER, 2009). Dentre os grupos de materiais piezoelétricos 10 deles são piroelétricos, estes materiais possuem a propriedade de se polarizarem numa certa faixa de temperatura. Diferente da maioria dos grupos piezoelétricos, que sob tensão desenvolvem polarização, a polarização dos piroelétricos é desenvolvida de forma espontânea e formam dipolos permanentes em sua estrutura. Esta polarização muda conforme a temperatura e este efeito é chamado de piroelectricidade (HAERTLING, 1999) *apud* (GASPAROTO, 2002).

Segundo Gaudenzi (2009) *apud* Schulz (2012), desses 20 grupos que possuem propriedades piezoelétricas, na maioria dos casos também são materiais ferroelétricos, onde pela ocorrência de altas temperaturas ocorre uma transformação em que o material perde as propriedades de piezoelectricidade possuindo uma alta simetria. Essa temperatura que se situa abaixo do limite para transformação do material é conhecida como temperatura de Curie T_c . Observe na Figura 3 a seguir a classificação desses cristais segundo a simetria.

Figura 3 - Relação dos piezoelétricos e subgrupos baseados na simetria.



Fonte: Haertling, (1999) *apud* Gasparoto, (2002).

Na Figura 3 também é visto alguns exemplos dos materiais piezoelétricos cerâmicos comumente utilizados na atualidade.

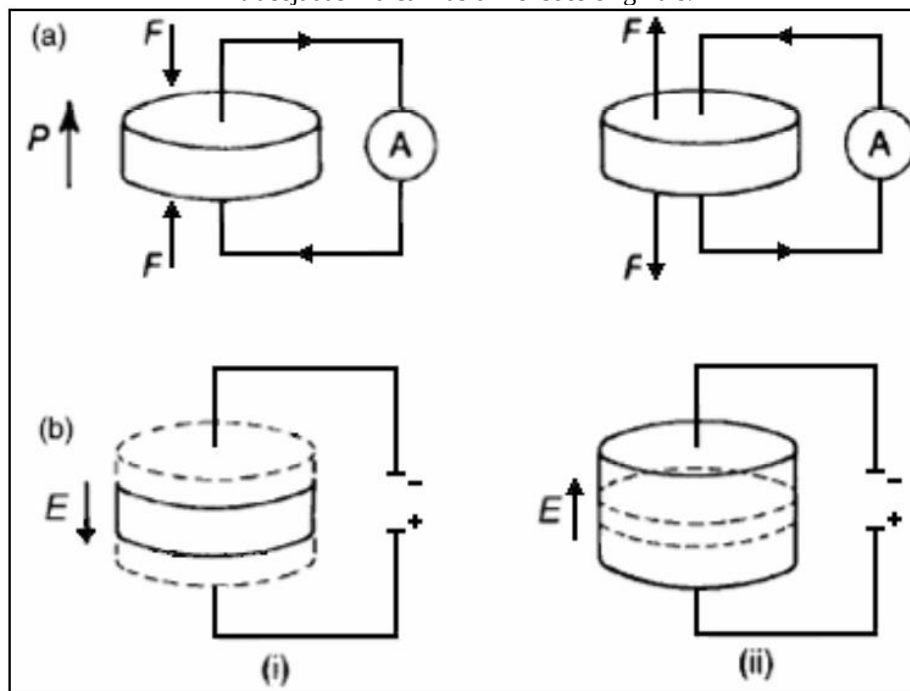
2.4 EFEITO PIEZOELÉTRICO

De acordo com Tichý, Erhart, Kittinger e Prívratská (2010) *apud* Domingos, Weiss e Wolf (2013) a piezoeletricidade é uma interação linear entre sistemas mecânicos e elétricos em cristais sem centro de simetria.

O efeito piezoelétrico de uma forma geral pode ser descrito como a propriedade que alguns materiais possuem em gerar cargas elétricas em sua superfície ao sofrerem uma pressão mecânica em suas extremidades, caracterizando o efeito direto. O efeito indireto é observado quando o material gera uma deformação ao ser submetido a uma diferença de potencial em

todos os seus eletrodos (RODRIGUES, 2017). Os efeitos direto e indireto podem ser observados a seguir na Figura 4.

Figura 4 - (a) o efeito piezoelétrico direto e (b) o efeito indireto; (i) contração; (ii) expansão. As linhas tracejadas indicam as dimensões originais.



Fonte: Moulson e Herbert, (2003) *apud* Droescher, (2009).

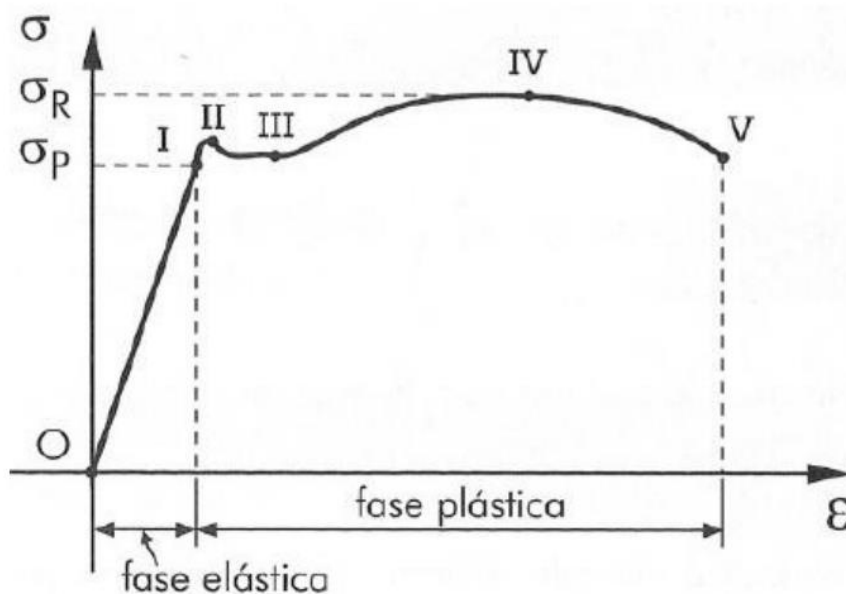
Segundo Silva, et al. (2009) *apud* Iliuk (2012), a piezoeletricidade (direta) é a capacidade de certos materiais que ao serem submetidos a um esforço mecânico, apresentam uma diferença de potencial, com intensidade proporcional ao esforço aplicado, ou seja, quanto maior o esforço mecânico, maior será diferença de potencial gerada. Dependendo do esforço mecânico, tração ou compressão aplicada ao material piezoelétrico, o sentido da polarização resultante é inversamente à aplicação de um campo elétrico a um cristal, em resultado da tensão que aquele corpo ocasiona. Assim, o efeito piezoelétrico inverso (indireto) apresenta uma tensão/deformação no cristal que é proporcional a intensidade do campo elétrico exercido, além de depender do sentido desse campo, aonde nas direções nos quais ocorrem uma extensão positiva do cristal, passa-se a verificar uma extensão negativa, e vice-versa, quando se modifica o sentido do campo atuante.

Atualmente o efeito piezoelétrico é utilizado em áreas como medicina (aparelho de ultrassom, eletroterapia), música (amplificadores sonoros), balanças, como elementos de sensores e/ou atuadores em amplificações tecnológicas, transformadores, na produção de energia, em detonadores de impacto, geradores de faíscas, atuadores, transdutores e em diversas outras aplicações onde o efeito piezoelétrico é útil (ARMENDANI et al., 2016).

2.5 EFEITO DIRETO

Os materiais quando são submetidos a uma tensão podem apresentar dois tipos de deformação, a deformação plástica e/ou elástica (GOULARTE, 2014). Os materiais que apresentam a deformação elástica são capazes de voltar a sua forma primitiva, uma vez cessada a causa determinantes de sua deformação. A deformação elástica é reversível, ou seja, desaparece quando a tensão aplicada é removida, além disso, a tensão aplicada é praticamente proporcional a deformação obtida. Já os materiais que apresentam a deformação plástica, são materiais que sofrem deformações permanentes provocados por tensões que ultrapassam o limite de elasticidade, sendo a deformação plástica o resultado de um deslocamento permanente de átomos que constituem o material, portanto, difere da deformação elástica, onde os átomos mantêm suas posições relativas (BERNARDI, 2007). Na Figura 5 pode-se ver um exemplo no diagrama da relação tensão x deformação característico do aço tracionado.

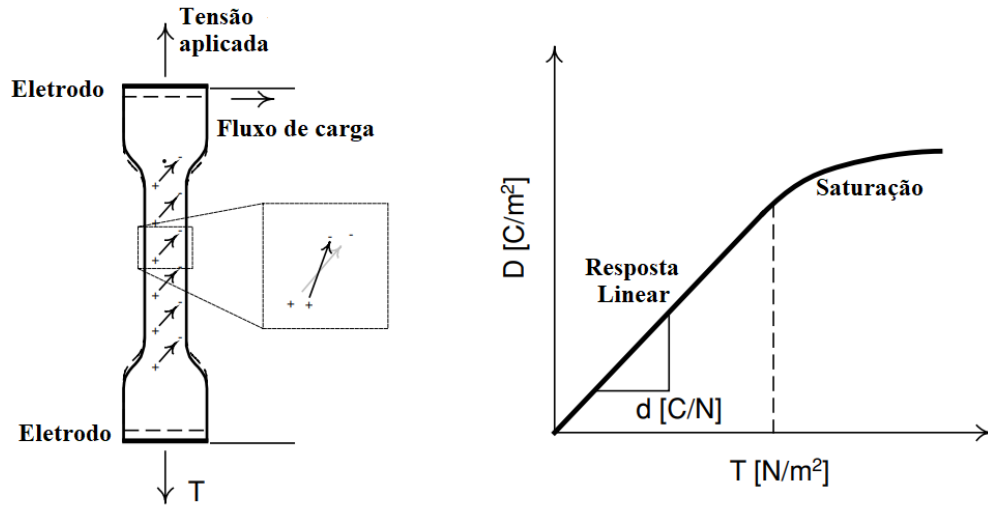
Figura 5 - Diagrama Tensão X Deformação característico do aço tracionado.



Fonte: Pinto (2002) *apud* Bernardi (2007).

Os materiais piezoelétricos se comportam da mesma maneira que os materiais que apresentam deformação elástica quando sofrem uma tensão mecânica, isto é, ocorre o alongamento ou encurtamento do material conforme o sentido da força. Porém o material piezoelétrico quando sofre uma deformação, produz um fluxo de carga elétrica que pode ser medido nos eletrodos acoplados nas extremidades do material. O fluxo da carga é causado pelo movimento dos dipolos elétricos no material. A aplicação de tensão mecânica externa faz com que as partículas carregadas se movam, criando um fluxo de carga aparente, que pode ser visto nos dois eletrodos. O fluxo de carga dividido pela área dos eletrodos é chamado de descolamento elétrico D (C/m^2) (LEO, 2007).

Figura 6 - (a) Efeito piezoelétrico direto; (b) relação entre tensão mecânica e deslocamento elétrico.



Fonte: Adaptado de Leo (2007).

Conforme mostra a Figura 6, a aplicação de uma tensão mecânica T produzirá um aumento na rotação dos dipolos elétricos e consequentemente um deslocamento elétrico maior. Em um determinado intervalo de tensão mecânica, há uma relação linear entre a tensão mecânica aplicada e deslocamento elétrico medido. A inclinação da curva é chamada de coeficiente de deformação piezoelétrico, sendo indicado pela variável d (C/N). A Equação 1 representa essa relação de proporcionalidade.

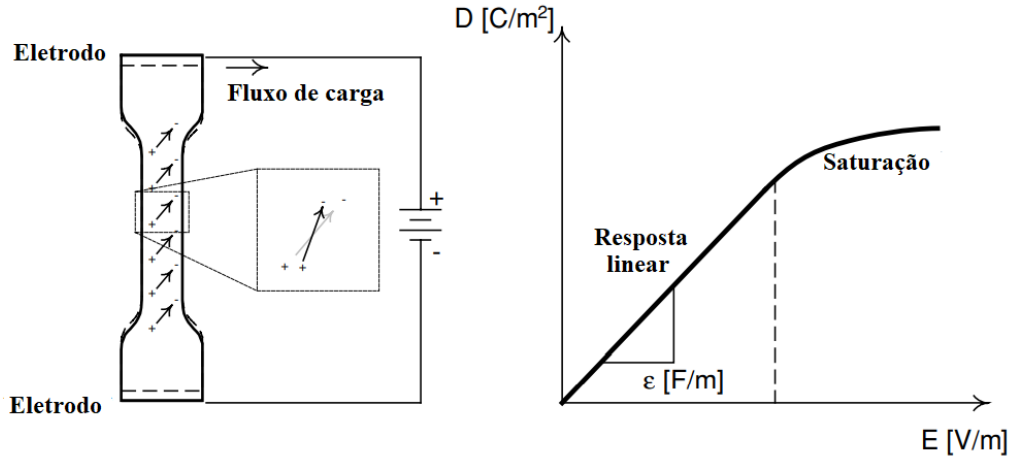
$$D = dT \quad (1)$$

Após um nível específico de tensão aplicada, a relação se torna não linear e entra em saturação.

2.6 EFEITO INDIRETO

Os materiais piezoelétricos também apresentam um efeito inverso, onde quando um campo elétrico é aplicado, o material produzirá uma resposta mecânica. Considerando a aplicação de um potencial constante em todo o eletrodo do material piezoelétrico conforme é mostrado na Figura 7, e supondo que o material piezoelétrico é um isolante perfeito, o potencial aplicado produz um campo elétrico E (V/m), que é igual ao campo aplicado dividido pela distância entre os eletrodos. A aplicação de um campo elétrico ao material produzirá atrações entre a carga aplicada e os dipolos elétricos. Assim ocorrerá rotações dos dipolos e consequentemente será medido um deslocamento elétrico nos eletrodos do material (LEO, 2007).

Figura 7 - (a) Efeito piezoelétrico indireto; (b) relação entre um campo elétrico e deslocamento elétrico de um material piezoelétrico.



Fonte: Adaptado de Leo (2007).

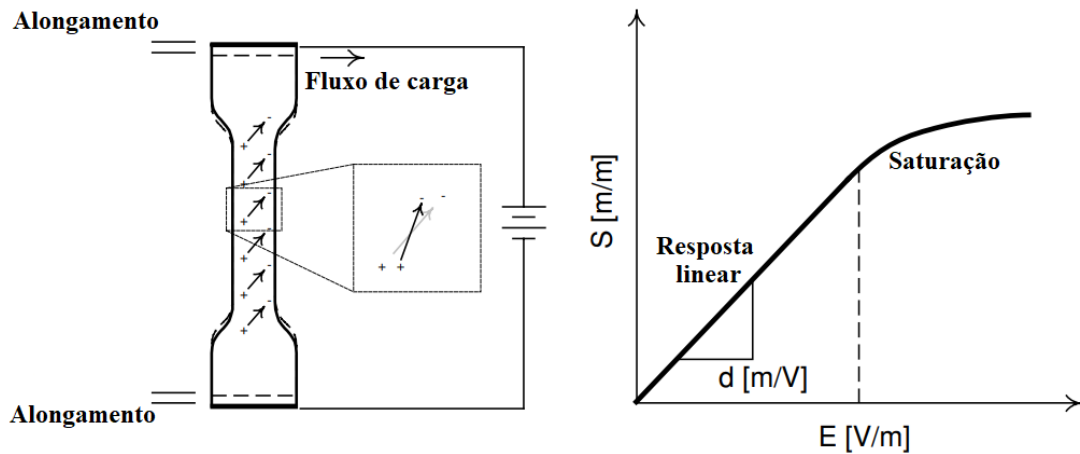
Conforme ilustrado na Figura 7, para baixos valores de campo elétrico, existe uma relação linear entre campo elétrico E e o deslocamento elétrico D através da constante de permissividade ϵ (F/m). Essa relação linear é dada pela Equação 2.

$$D = \epsilon E \quad (2)$$

Assim como no caso do efeito direto, a aplicação de campos elétricos cada vez maiores irá eventualmente resultar na saturação do movimento do dipolo, e consequentemente na perda da linearidade.

Com um campo elétrico E aplicado sobre o piezoelétrico, os dipolos irão rotacionar e essa rotação produzirá uma deformação S (m/m) no material como visto na Figura 8. Até um valor limite de campo elétrico, há uma relação linear entre o campo elétrico aplicado e a deformação no material.

Figura 8 - (a) Efeito piezoelétrico indireto; (b) relação entre um campo elétrico e deformação.



Fonte: Adaptado de Leo (2007).

O termo que relaciona o campo elétrico E e a deformação do material S no efeito indireto é a constante de piezoeletricidade d . A Equação 3 expressa o efeito indireto do piezoeletrico durante o intervalo de linearidade.

$$S = dE \quad (3)$$

2.7 EQUAÇÕES CONSTRUTIVAS

Materiais piezoeletricos apresentam acoplamento eletromecânico sendo possível operar nos modos direto e indireto. A teoria envolvida no fenômeno de piezoeletricidade pode ser descrita pelo acoplamento entre as equações eletromagnéticas e as equações mecânicas dentro do limite elástico, ou seja, quando o material estiver sendo exposto a uma certa faixa de estresse mecânico e campos de tensão elétrica (PERLINGEIRO, et al., 2016).

A forte interação eletromecânica nos materiais piezoeletricos pode ser descrita de forma genérica e simplificada por sua equação constitutiva (Equação 4), seguindo as anotações apresentadas por Leo (2007). O Efeito indireto é representado pela parte superior da matriz, enquanto o efeito direto é representado pela parte inferior.

$$\begin{Bmatrix} S \\ D \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{Y} & d \\ d & \varepsilon \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ E \end{Bmatrix} \quad (4)$$

Onde:

- S – Deformação (m/m);
- D – Deslocamento elétrico (C/m²);
- $\frac{1}{Y}$ – Conformidade Mecânica (m²/N);
- d – Coeficiente de deformação piezoeletrico (C/N ou m/V);
- ε – Permissividade dielétrica (F/m);
- T – Tensão mecânica (N/m²);
- E – Campo elétrico (V/m);

Examinando a expressão matricial, observa-se que os termos na diagonal representam as relações constitutivas de um material mecânico e elétrico respectivamente. Por exemplo, o termo (1,1) da matriz, $\frac{1}{Y}$, representa a relação constitutiva entre a tensão e deformação, enquanto o termo (2,2) da matriz, ε , representa a equação elétrica constitutiva. Essas relações

constitutivas devem existir em materiais que são puramente elásticos ou puramente dielétricos (LEO, 2007).

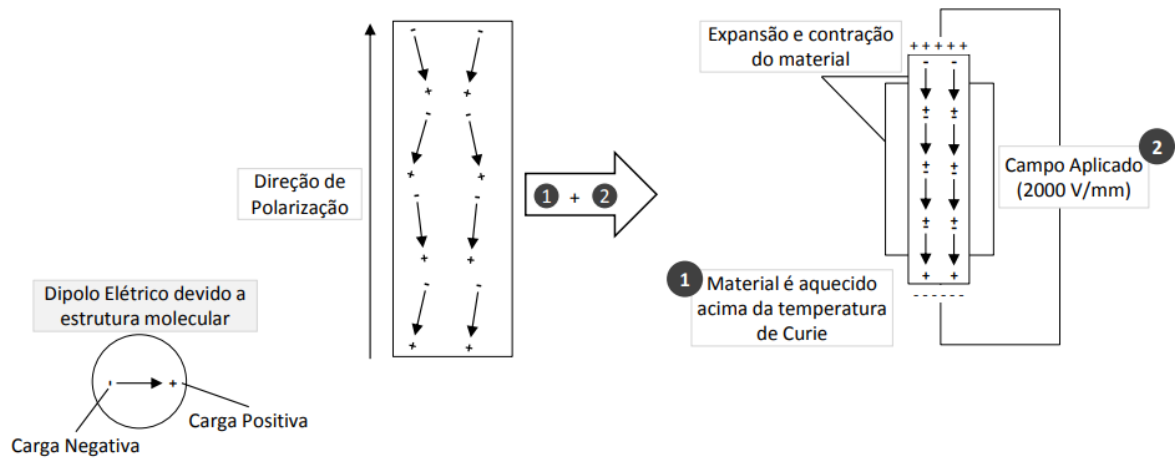
2.8 MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS SINTÉTICOS

Segundo Kaltembacher (2007) apud Schulz (2012), materiais piezoelétricos podem ser subdivididos em três categorias: cristais isolados, como o quartzo; cerâmicas piezoelétricas como titanato de bário (BaTiO_3) ou titanato zirconato de chumbo (PZT) e polímeros como fluoreto de polivinilideno (PVDF). O efeito piezoelétrico é fraco nos cristais e nas cerâmicas sendo utilizados geralmente em sensores.

Dentre essas categorias os materiais piezoelétricos possuem diversas formas, podendo ter origem natural ou artificial, em condições normais, os dipolos elétricos estão dispostos de maneira aleatória e não possuem um acoplamento eletromecânico entre os comportamentos mecânico e elétrico consideravelmente forte que permitam a sua utilização em aplicações de engenharia (SANTOS, 2016). Por isso faz-se necessário que estes materiais passem por um processo denominado polarização (*poling*) para que o efeito piezoelétrico seja apresentado de forma aplicável nos materiais que apresentam essas propriedades (PERLINGEIRO, et al., 2016).

Segundo Santos (2016), o primeiro passo para realizar a polarização consiste no aquecimento do material até a chamada temperatura de Curie, fazendo com que exista a perda na polarização eletrostática. Após esse alto aquecimento o material é submetido a um forte campo elétrico, reorientando os dipolos conforme o campo, como mostrado na Figura 9. Quando o material for esfriado novamente os dipolos manterão essa orientação e o material estará polarizado, apresentando o efeito piezoelétrico. Portanto, a orientação dos dipolos amplifica o efeito piezoelétrico no material.

Figura 9 - Processo de Polarização associado aos materiais piezoelétricos.

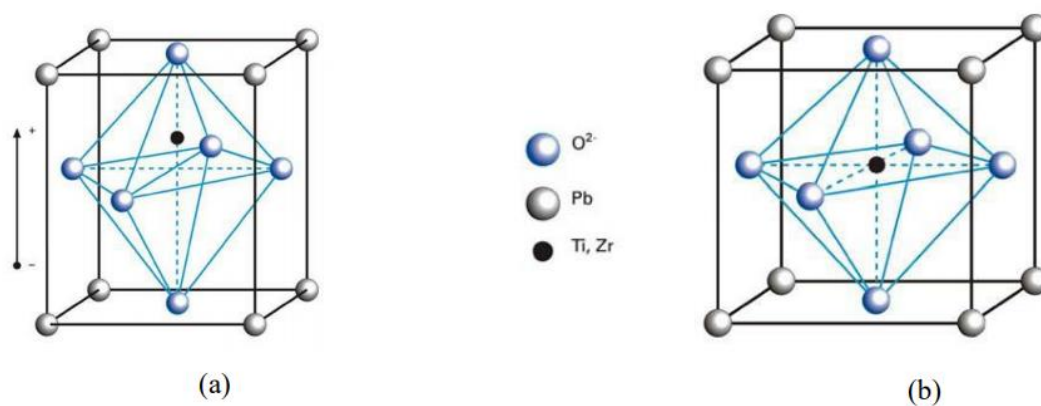


Fonte: Leo (2007) *apud* Santos (2012).

É importante salientar que essa propriedade será perdida caso a temperatura exceder a temperatura de Curie ou se o material estiver sujeito a um campo elétrico excessivo na direção oposta do campo de polarização (ROCHA, 2012).

Um dos materiais piezoelétricos mais populares é o *Lead-Zirconate-Titanate* (Titanato Zirconato de Chumbo) ou PZT (ROCHA, 2012). O PZT é formado por blocos microscópicos chamados domínios que, no que lhe concerne, são formados por células unitárias tetragonais distorcidas quando se encontram abaixo da temperatura de Curie (Figura 10(a)). A célula unitária forma um dipolo elétrico devido à posição deslocada do íon de titânio ou zircônio e, dentro de um domínio as células apresentam polarização e orientação na mesma direção. Como os domínios encontram-se distribuídos aleatoriamente, o PZT não apresenta propriedades piezoelétricas macroscópicas (PERLINGEIRO, et al., 2016).

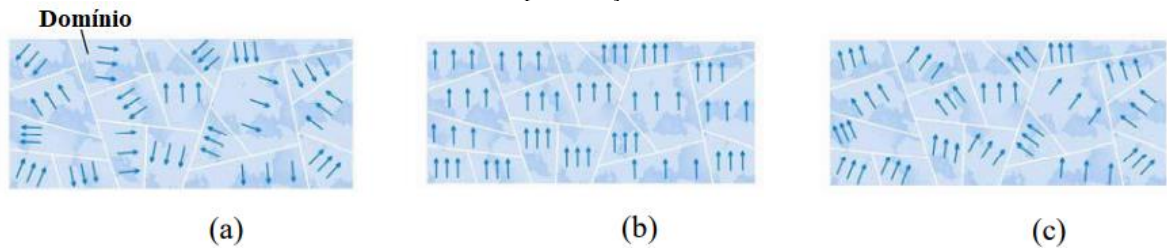
Figura 10 - Estrutura atômica do PZT: (a) Estado tetragonal distorcido; (b) Estado Cúbico.



Fonte: Perlingeiro, et al., (2016).

Durante o aquecimento para a polarização do PZT, o estado das células unitárias do material passa a apresentar simetria cubica, como demonstrado na Figura 11 (a). Com o material aquecido, e sob o efeito de um campo elétrico intenso as células unitárias se expandem na direção do campo, como mostrado na Figura 11 (b). Após o resfriamento do material e a retirada do campo elétrico, as células unitárias mantêm o alinhamento, porém, não completamente como mostrado na Figura 11(c). Contudo, o alinhamento remanescente é suficiente para que o PZT passe a exibir o efeito piezoelétrico (PERLINGEIRO, et al., 2016).

Figura 11 - Polarização do PZT. (a) material sem polarização; (b) aplicação de campo elétrico; (c) após a polarização.



Fonte: Adaptado de Perlingeiro, et al., (2016).

Devido a suas propriedades piezoelétricas, as cerâmicas a base de PZT são encontradas em diversas aplicações na área de materiais inteligentes e colheita de energia. Dentre suas principais utilidades encontram-se os sensores e atuadores, além dos sistemas microeletromecânicos (SANTOS, 2016).

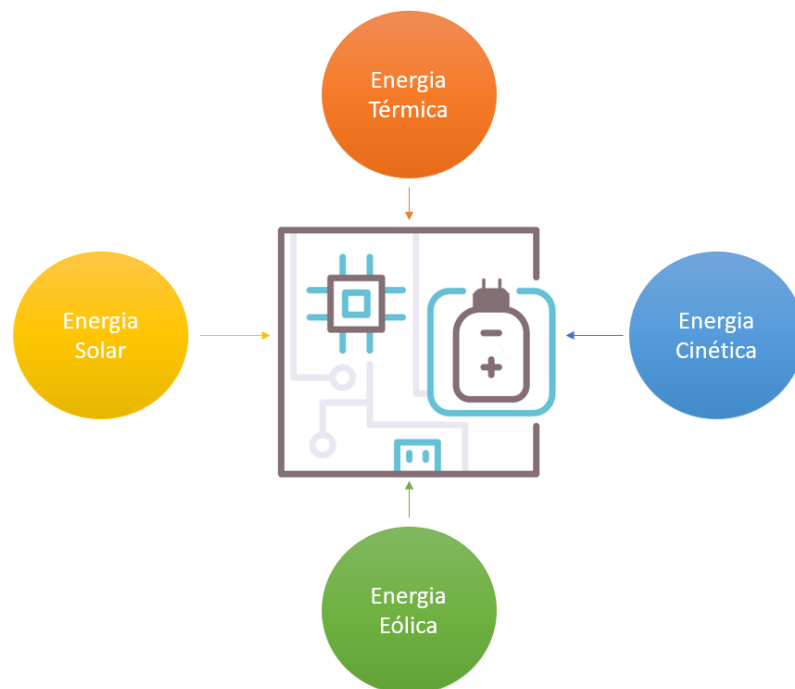
CAPÍTULO 3

COLHEITA DE ENERGIA (*ENERGY HARVESTING*)

3.1 INTRODUÇÃO

Energia renovável é um dos maiores desafios atuais da humanidade, a busca por meios de diminuir a emissão dos gases do efeito estufa proporcionou a evolução da tecnologia chamada de colheita de energia (*Energy Harvesting*). A colheita de energia é o processo onde a energia é derivada de uma fonte externa, como, por exemplo, energia solar, energia térmica, energia cinética, etc. Essa energia é colhida e armazenada para pequenos dispositivos autônomos, como aqueles usados em redes sem-fio e, ainda, para estender o tempo de vida de baterias antes da troca (ROCHA, 2012).

Figura 12 - Exemplos de fontes de energia para colheita de energia.



Fonte: Autor.

Segundo Chang et al. (2011) e Macias (2012) *apud* Franklin (2014), do ponto de vista macroenergético a colheita de energia vem sendo empregada já a vários anos por meio dos parques eólicos e fotovoltaicos, por exemplo, mas nos últimos anos, com a evolução de novas tecnologias a tendência é para a miniaturização de dispositivos eletrônicos, baixo consumo e mobilidade. Com a redução simultânea do tamanho e requisitos de energia para microeletrônica, é concebível que alguns circuitos poderiam ser diretamente alimentados com energia extraída

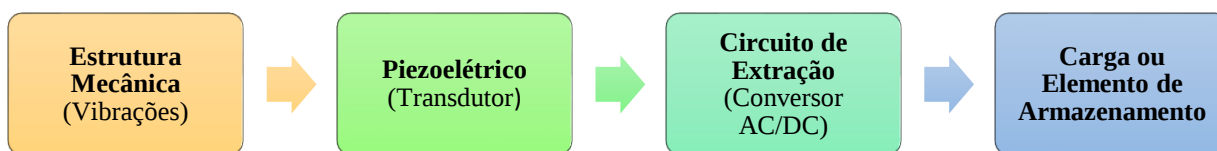
a partir do ambiente onde o circuito opera. Assim, estudos vêm sendo desenvolvidos em busca de meios para produção de energia em microescala para alimentação dos dispositivos eletrônicos com essas novas características.

Um sistema de colheita de energia normalmente requer quatro elementos importantes, uma fonte de energia disponível no ambiente (vibração, solar, térmica), um dispositivo transdutor (conversor) compatível com a fonte extraída (painel solar, piezoelétrico), um módulo de coleta de energia que captura e gerência a energia para o dispositivo e uma aplicação final, como uma carga ou elemento de armazenamento (ENERGY HARVESTING FÓRUM, 2012) *apud* (VICENTE, 2019).

Dentre as várias possibilidades, a captação de energia cinética sob a forma de vibração é a que possui maiores números de publicações e aplicações atualmente, se mantendo como uma tecnologia promissora para alimentação de dispositivos eletrônicos de baixo consumo (FRANKLIN, 2014). Três possíveis mecanismos para converter vibração em energia elétrica são: transdutores eletromagnéticos, eletrostáticos e piezoelétricos, sendo o piezoelétrico o mais estudado entre eles.

A Figura 13 mostra os elementos básicos de um sistema de colheita de energia (*Energy Harvesting*) utilizando transdutores piezoelétricos. O primeiro item é a fonte de energia externa, neste caso é a estrutura mecânica submetida a deformações (vibrações). Em seguida, no segundo item, é utilizado um transdutor piezoelétrico acoplado a estrutura, em que é o responsável pela geração de energia. Já o terceiro item é composto pelo circuito de extração de potência, onde, o conversor AC/DC é responsável a retificar/converter o sinal alternado oriundo do piezoelétrico. Por fim o dispositivo de armazenamento (baterias, capacitores etc.), que serão responsáveis por aproveitar a energia gerada pelo sistema (SANCHES, 2015).

Figura 13 - Elementos básicos de um sistema de colheita de energia.

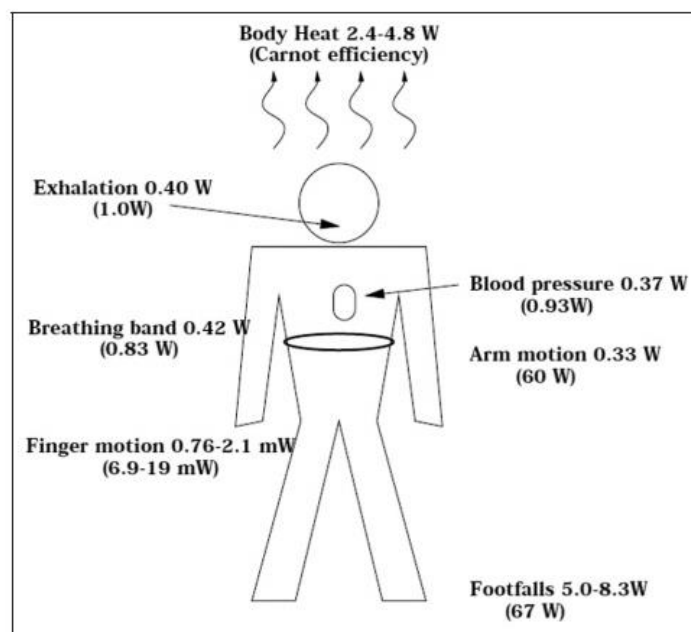


Fonte: Autor.

A possibilidade de se extrair energia a partir de vibrações mecânicas através de materiais piezoelétricos atraíram diversas pesquisas pelo mundo. Como, por exemplo, Willian e Yates (1996), Lu, et al. (2004), Sodano (2005) e Priya & inman (2009), que trouxeram diversos avanços para este seguimento, e resultou em um rápido crescimento do campo de colheita de energia (*Energy Harvesting*).

Como relatado por Vicente (2019) e Delgado (2021) dentre as várias possibilidades para a aplicação da colheita de energia, a energia dissipada durante a rotina humana tem chamado bastante atenção dentre os pesquisadores. No trabalho de Zuo & Tang (2013), é possível ver diversos exemplos de aplicações de sistemas de colheita de energia que já foram publicados na literatura. Como, por exemplo, um estudo do potencial de colheita de energia pela atividade humana por Starner e Paradiso (2004), aonde foi visto que a respiração tem um potencial de geração de 1W, os passos durante a caminhada 67 W, a movimentação do braço 60 W, entre outros como é visto na Figura 14.

Figura 14 - Energia disponível pelas atividades humanas.



Fonte: Starner e Paradiso (2004) *apud* Zuo & Tang (2013).

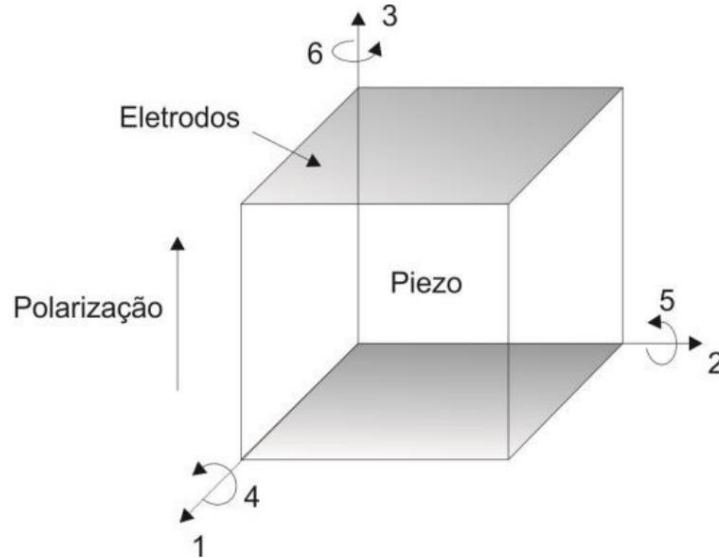
No trabalho de Shenck & Paradiso (2001) é visto um dispositivo de colheita de energia em um sapato, onde foi implantado materiais piezoelétricos na planilha do calçado, esse sistema podia gerar eletricidade durante a caminhada, e a energia média gerada era 1,8 mW, com potência de pico de 60 mW. Em uma análise desses dados, tem-se que a energia colhida por este dispositivo é muito baixa em comparação com a energia potencial teórica, e um dos desafios deste seguimento de pesquisa é elaborar formas para conseguir extrair a máxima energia possível do sistema.

3.2 MODOS DE OPERAÇÃO

Os materiais piezoelétricos são transversalmente isotrópicos, ou seja, os efeitos dependem da sua direção. Por conversão a direção positiva de polarização (*poling direction*) é usualmente escolhida para ser coincidente com o eixo 3 (direção z) como mostra a Figura 15.

Esta direção é estabelecida durante a fabricação do material. Os eixos 1 e 2 são arbitrários e os movimentos de cisalhamento representados por 4, 5 e 6 (PERLINGEIRO, et al., 2016).

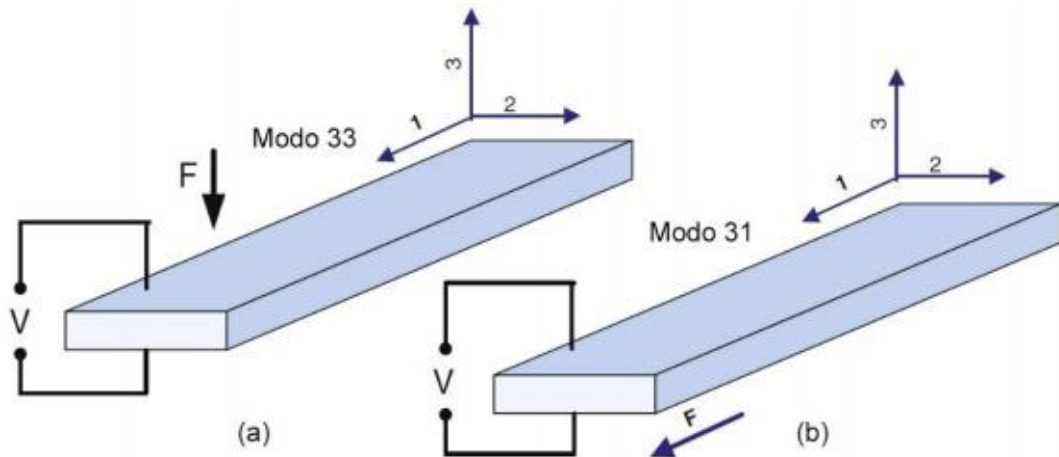
Figura 15 - Convenção de eixos para um material piezoelétrico.



Fonte: Adaptado de Perlingeiro, et al., (2016).

Em aplicações de colheita de energia ou *energy harvesting* o modo de operação do material piezoelétrico é definido através do coeficiente piezoelétrico, utilizando-se comumente d_{33} ou d_{31} . O primeiro índice indica a direção onde o campo elétrico é obtido e o segundo a direção onde as forças são aplicadas. Na Figura 16 são apresentados os dois modos mais utilizados em extração e armazenamento de energia (SANCHES, 2015).

Figura 16 - Modo de operação do coeficiente piezoelétrico. (a) 33; (b) 31.



Fonte: Adaptado de Priya & Inman (2009).

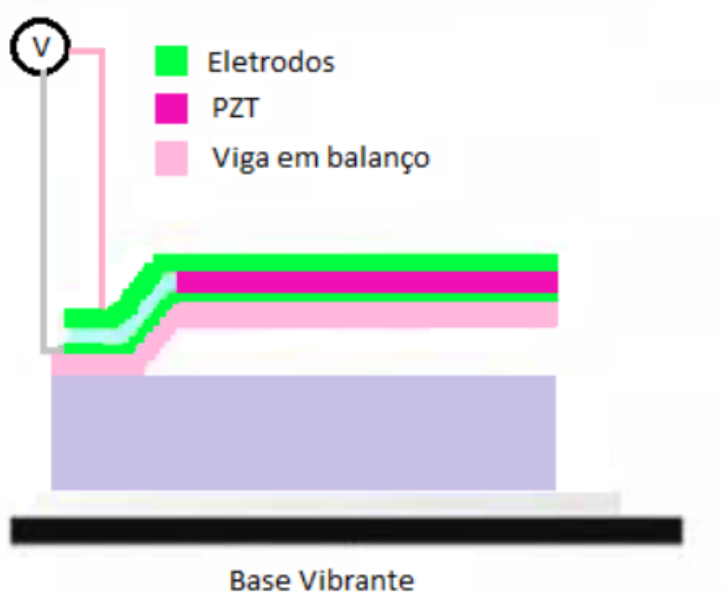
Convencionalmente, o modo 31 tem sido o modo de acoplamento mais comumente utilizado devido a maior simplicidade de aplicação, no entanto, de acordo com a literatura, o modo 31 produz um coeficiente de acoplamento menor do que o modo 33. Como, por exemplo,

no PZT, o modo 33 apresenta uma eficiência quase três vezes maior que no modo 31 (FRANKLIN, 2014).

3.3 DISPOSITIVO DE CAPTURA DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA

Segundo Santos (2016) geradores de energia piezoelétricos convertem energia de vibrações a partir do efeito piezoelétrico direto. Várias configurações são investigadas na literatura, mas geralmente a mais simples são as vigas conhecidas como *cantilever*, normalmente recobertas por um material piezoelétrico e excitadas através de sua base. Para os estudos encontrados na literatura, normalmente a viga é conectada a um circuito simples, composto por um elemento resistivo utilizado para mensurar a potência gerada através das vibrações mecânicas.

Figura 17 - Modelo conceitual gerador piezoelétrico.



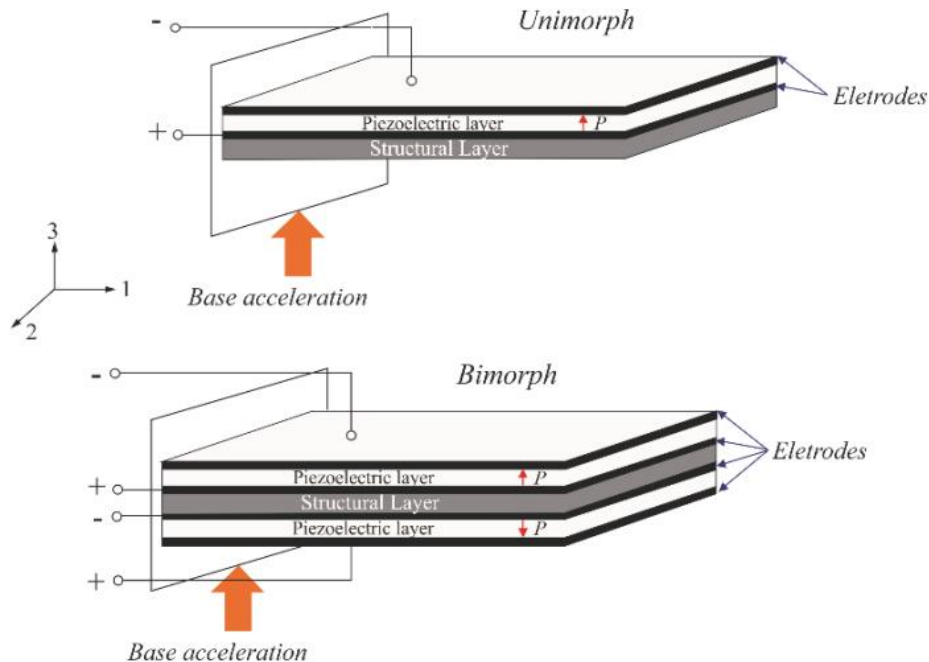
Fonte: Adaptado de Cottone (2007).

A maior potência de saída ocorrerá quando a estrutura vibrar na sua frequência de ressonância, o que justifica a escolha pela viga, visto que ela possui menores frequências de ressonância e podem ser reduzidas ainda mais pela adição de uma massa na sua extremidade livre (ILIUK, 2013). Além disso, as configurações baseadas em vigas possuem outras vantagens como: a energia convertida ser intimamente relacionada com a deformação média da viga, as deformações médias são relativamente altas para uma dada entrada de força e dispõem de um simples processo para fabricação de dispositivos de tamanho reduzido (FRANKLIN, 2014).

As estruturas podem ser compostas por uma camada piezoelétrica, conhecida como *piezoelectric unimorph beam*, ou composta por duas camadas piezoelétricas designada como

bimorph cantilever beam, como pode ser observado na Figura 18. Os bimorfos são os mais utilizados, pois fornecem maiores níveis de energia.

Figura 18 - Tipos de geradores piezoelétricos, unimorfo (acima) e bimorfo (abaixo).



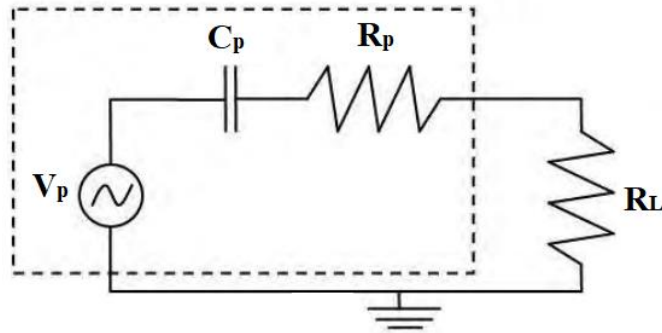
Fonte: Perlingeiro, et al., (2016).

3.4 CIRCUITO ELÉTRICO EQUIVALENTE DO GERADOR PIEZOELÉTRICO

Os geradores piezoelétricos possuem alta impedância interna, ao contrário das fontes convencionais de energia. Esta alta impedância interna restringe a quantidade de corrente de saída, limitando-a na faixa de micro amperes. Outra característica é a baixa tensão de saída para os baixos níveis de vibração de entrada (RAMADASS e CHANDRAKASAN, 2010) *apud* (DELGADO, 2021). O gerador piezoelétrico pode ser modelado através de um circuito elétrico equivalente, que pode ser representado como uma fonte de tensão elétrica, uma resistência e um capacitor, na Figura 19 é demonstrado o circuito equivalente de um gerador piezoelétrico.

Figura 19 - Circuito equivalente de um gerador piezoelétrico.

Gerador Piezoelétrico



Fonte: Adaptado de Cottone (2007).

Na representação apresentada por Cottone (2007), a fonte de tensão representa a tensão que se desenvolve devido ao excesso de carga na superfície sobre o cristal. O capacitor “ C_p ” em série representa a capacitância da camada piezoelétrica que é proporcional a permissividade do filme e área que é inversamente proporcional à espessura do filme. “ R_p ” representa a resistência do elemento piezoelétrico interno e “ R_L ” uma carga puramente resistiva.

CAPÍTULO 4

INDUTOR SINTÉTICO

4.1 CIRCUITO PARA GRANDES INDUTÂNCIAS

Os materiais piezoelétricos possuem a capacidade de gerar e sustentar tensão elétrica em seus terminais, e segundo os fundamentos da eletricidade, essa característica permite o comparar com um circuito de caráter capacitivo (ZAMBOLINI-VICENTE, 2014).

Segundo Alexandre e Sadiku (2013), os elementos capacitivos e indutivos não dissipam energia, mas sim armazenam energia que pode ser posteriormente recuperada, por isso são chamados de elementos de armazenamento. O efeito de armazenar energia gera o que se chama de reativo, para o efeito capacitivo, o reativo é dado por $X_C = 1/sC$, onde, C é conhecido como a capacitância do capacitor e sua unidade é *Farad* (F). Para aumentar a eficiência do material piezoelétrico, deve-se anular o reativo capacitivo, e para isso necessita-se de um reativo indutivo $X_L = sL$, onde L é a indutância do indutor e sua unidade é o *Henry* (H). As equações 5 e 6 mostram que o valor da indutância é inversamente proporcional ao quadrado da frequência complexa s .

$$X_L = X_C \rightarrow sL = \frac{1}{sC} \quad (5)$$

$$L = \frac{1}{s^2C} \quad (6)$$

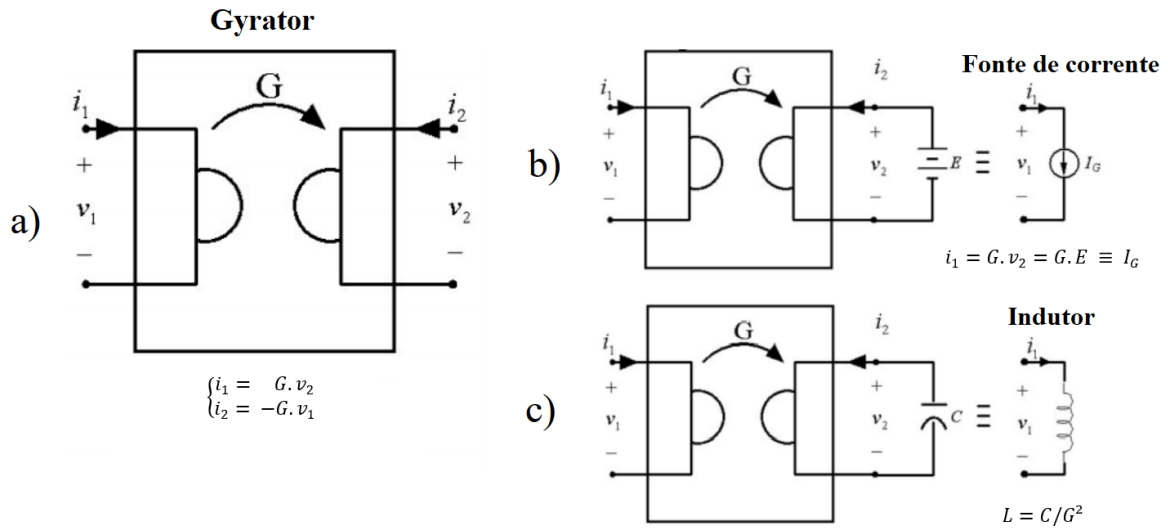
Nos trabalhos desenvolvidos por Zambolini-Vicente et al. (2016), notou-se que para baixas frequências, os valores de indutâncias que devem ser acoplados aos elementos piezoelétricos, para atingir o equilíbrio da natureza capacitiva do material, atingem valores de indutância acima dos mili-*Henrys* (mH). Este fato impossibilita a utilização de indutores baseados em enrolamentos, pois, o total de enrolamentos é diretamente proporcional ao valor em *henries* do parâmetro indutivo necessário, o que impacta diretamente no volume e massa do componente indutivo (SEDRA & SMITH, 2009). Portanto, uma solução para esse problema é a utilização de indutores sintéticos, nos quais são circuitos eletrônicos que podem emular grandes valores de indutância, sem possuir as mesmas desvantagens dos indutores discretos.

Em 1948 o engenheiro holandês Bernard Tellegen, propôs um novo componente linear chamado *gyrator*, também conhecido como indutor sintético, o nome *gyrator* deriva da analogia

do funcionamento que tal circuito com o torque e a velocidade angular em um giroscópio de dois eixos (TELLEGEN, 1948).

Segundo Adams, et al. (1945) *apud* Zambolini-Vicente (2019), a principal característica deste tipo de circuito (*gyrator*) baseia-se na sua capacidade de inverter o comportamento tensão/corrente de componentes ou redes lineares fixadas em seus terminais. Isto se faz possível através de um circuito interno que produz o acoplamento cruzado de corrente/tensão entre entrada e saída, ponderando por uma condutância, G conforme a Figura 20. Tal efeito cria a possibilidade, da obtenção de uma fonte de corrente através de uma fonte de tensão, ou um indutor, foco deste trabalho, a partir de um capacitor.

Figura 20 - O componente de Tellegen: gyrator; a) simbologia; b) geração de fonte de corrente; c) geração de indutor.



Fonte: Adaptado de Chua (2010).

Considerando-se que a porta de saída de um gyrator ideal é terminada com um capacitor, conforme é mostrado na Figura 20.c, a sua porta de entrada se comportará como um indutor. Essa propriedade de mutação de capacitor para indutor é comprovada no trabalho de Chua (2010). Conforme é apresentado nas equações a seguir.

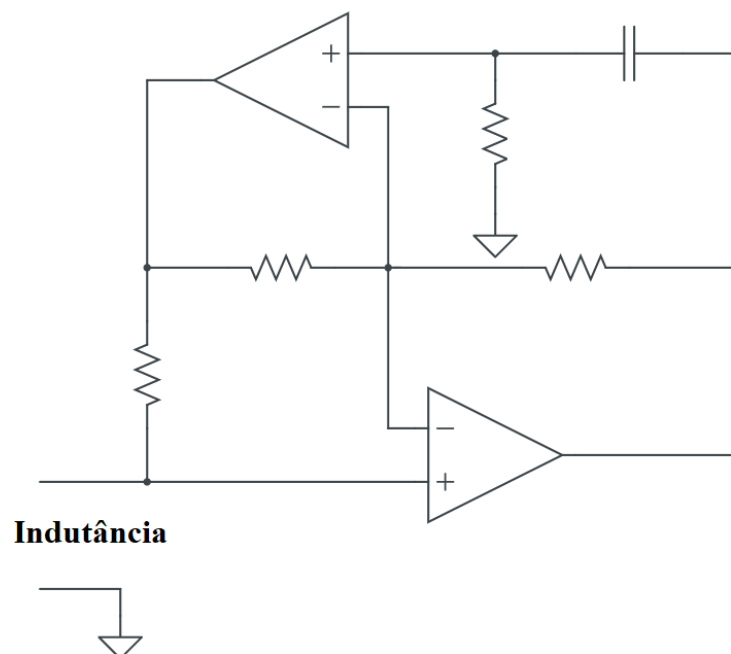
$$v_1 = \frac{1}{G} i_2 = -\frac{1}{G} \left(-C \frac{dv_2}{dt} \right) = \frac{C}{G} \left(\frac{1}{G} \frac{di_1}{dt} \right) \quad (7)$$

$$v_1 = \frac{C}{G^2} \left(\frac{di_1}{dt} \right) \rightarrow v_1 = L \left(\frac{di_1}{dt} \right) \quad (8)$$

A partir do advento e dos avanços da tecnologia de transistores e com a popularização dos circuitos amplificadores operacionais (ou *Amp-ops*), trabalhos como os de Matthaeis et al. (1964) e Adams et al. (1975) exploram o desenvolvimento de *gyrators* utilizando tais componentes. E desde então diversos pesquisadores apresentaram alternativas para os gyrators existentes, como, por exemplo, no trabalho de Riordan (1967), e no trabalho de Antoniou (1969).

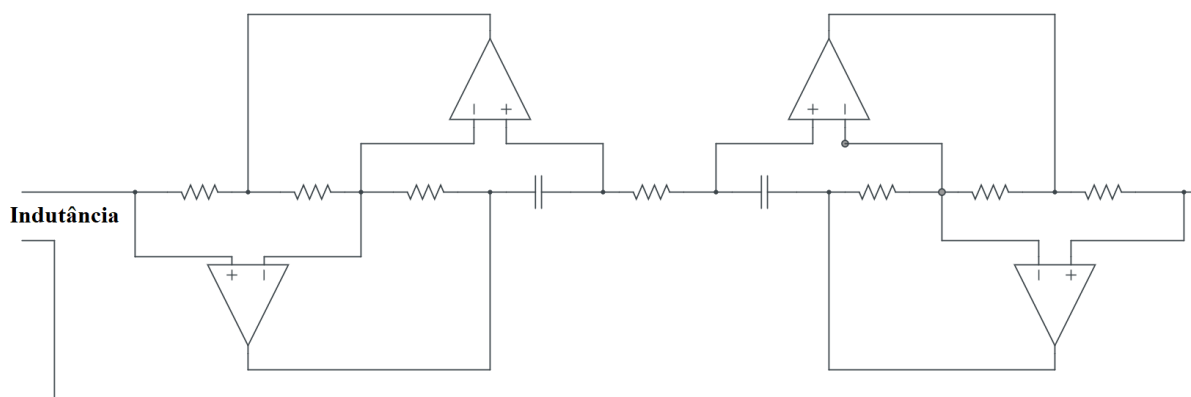
Com o intuito de otimizar a potência de saída do elemento piezoelétrico, uma análise computacional utilizando indutor sintético é investigada, para isso, utilizaram-se os esquemas de circuitos eletrônicos baseados em amplificadores operacionais presentes na literatura de Antoniou (1969), como mostrado nas figuras 21 e 22. Foram escolhidas uma configuração aterrada (Figura 21), que possui uma topologia mais simples, porém, só pode ser utilizada como final de circuito, com ligação interna direta no terra. A outra configuração escolhida foi uma configuração flutuante (Figura 22), esta configuração pode ser colocada em qualquer posição, por isto o nome de flutuante, assim possuindo maior versatilidade, porém, ela exige mais amplificadores operacionais em sua topologia.

Figura 21 - Configuração de indutor sintético baseado em amplificadores operacionais aterrado.



Fonte: Autor.

Figura 22 - Configuração de indutor sintético baseado em amplificadores operacionais flutuante.



Fonte: Autor.

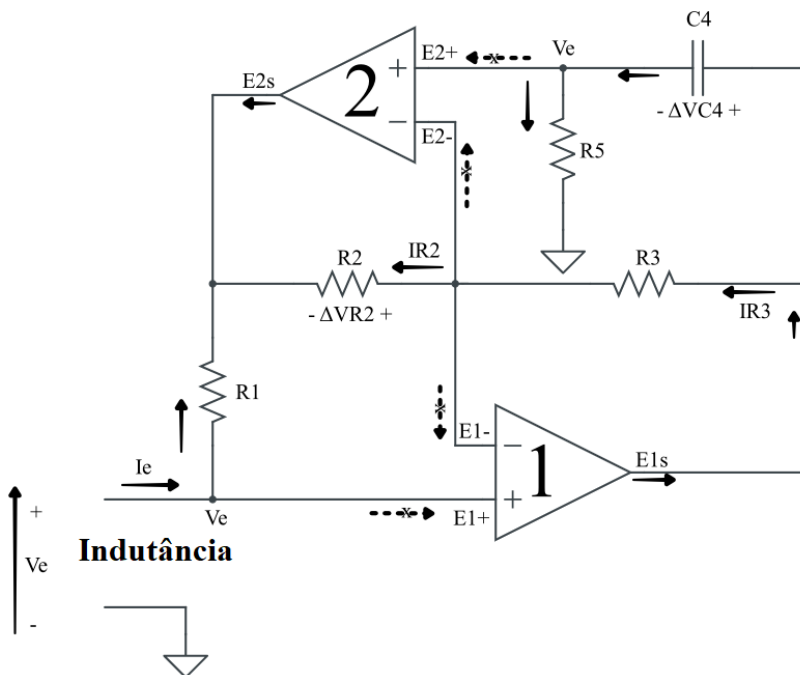
4.2 CONFIGURAÇÃO DE INDUTOR SINTÉTICO

Dentre as várias configurações de indutores sintéticos baseados em amplificadores operacionais, foram escolhidos as duas da sessão anterior por apresentar uma maior versatilidade, e um melhor desempenho. A utilização de dois amplificadores operacionais compensa todas as perdas do circuito, visto em configurações de somente um amplificador.

Antoniou (1969) apresentou uma nova abordagem para o desenvolvimento de circuitos *gyrators*, incluindo em sua análise condições de estabilidade de resposta em frequência, que conduziram uma configuração mais robusta e estável para baixas frequências, especialmente abaixo de 1kHz. Na Figura 23 é mostrado o circuito com *Amp-ops* desenvolvido por Antoniou (1969) e todos os seus parâmetros.

De modo a se elucidar o mapeamento do circuito da Figura 23 em indutor sintético *gyrator*, considera-se o amplificador operacional como ideal, ou seja, as correntes que adentram o dispositivo via terminais + e – são consideradas nulas bem como a relação de amplificação diferencial, $e_s = A(e_+ - e_-)$, conta com o parâmetro de ganho A com valor infinito, ou seja, o amplificador maximizará, até o limite da alimentação do circuito, o valor da diferença de tensões das entradas (MALOBERTI, 2015). É essencial destacar-se que o circuito tem por objetivo produzir, entre seus terminais, comportamento tensão/corrente (v_e e i_e) idêntico ao de um indutor normal, ou seja, o circuito deve apresentar reatância indutiva de $X_L = sL$, para que seja possível então sintonizá-lo de modo a eliminar a reatância capacitiva do material piezelétrico.

Figura 23 - Indutor sintético de Antoniou (1969).



Fonte: Autor.

Partindo do fato de que os amplificadores operacionais estão em malha de realimentação negativa, pode-se usar a informação de que ocorrerá, depois do regime permanente do circuito, a anulação da diferença entre as tensões em seus terminais de entrada e_+ e e_- , ou seja, tais terminais tornam-se *curtos-circuitos virtuais* (SEDRA & SMITH, 2009; BOYLESTAD, 2012; HOROWITZ & HILL, 2017) *apud* (ZAMBOLINI-VICENTE, 2019). Observando o circuito da Figura 23, segundo Zambolini-Vicente (2019), a tensão de entrada v_e se propagará nos pontos indicados, provocando a circulação da corrente conforme as setas indicadas.

Para determinação da impedância z_e gerada pelo indutor sintético deve-se calcular a tensão v_e e corrente i_e . Observando que não há corrente circulando na entrada e_{2+} , a queda de tensão no capacitor C_4 será:

$$\Delta V_{c4} = X_{c4} I_{c4} = X_{c4} \frac{v_e}{R_5} \quad (9)$$

A corrente que circula pelo resistor R_3 é obtida por:

$$(\Delta V_{c4} + v_e) - v_e = R_3 I_{R3} \quad (10)$$

Substituindo a Equação (9) na (10), tem-se:

$$X_{c4} \frac{v_e}{R_5} = R_3 I_{R3} \rightarrow I_{R3} = \frac{X_{c4}}{R_3 R_5} v_e \quad (11)$$

Por outro lado, $I_{R2} = I_{R3}$, já que não há influxo de corrente nas entradas de *Amp-Ops* ideais. Dessa maneira, a tensão e_{2s} é dada a seguir:

$$e_{2s} = v_e - \Delta V_{R2} = v_e - I_2 R_2 \rightarrow e_{2s} = v_e - \frac{R_2 X_{c4}}{R_3 R_5} v_e \quad (12)$$

Do ponto de vista de entrada a tensão em R_1 será a queda de tensão provocada diretamente pela corrente de entrada i_e , já que também não há circulação de corrente em e_{1+} :

$$i_e = \frac{v_e - e_{2s}}{R_1} \quad (13)$$

Substituindo a Equação (12) em (13), tem-se a seguinte relação para i_e :

$$i_e = \frac{\left(v_e - \left(v_e - \frac{R_2 X_{c4}}{R_3 R_5} v_e \right) \right)}{R_1} \rightarrow i_e = \frac{R_2 X_{c4}}{R_1 R_3 R_5} v_e \quad (14)$$

A partir da Equação (14) isola-se $z_e = v_e / i_e$, e substituindo $X_{c4} = 1/sC_4$, obtém-se:

$$z_e = \frac{s R_1 R_3 C_4 R_5}{R_2} \quad (15)$$

A Equação 15 é a impedância sintética obtida pelo arranjo, que é puramente reativa. Em comparação a outras configurações, Antoniou (1969) mostra que a disposição das realimentações do esquema favorece a mitigação da piora do fator de qualidade, mas, apesar da melhora do nível de estabilidade, o aparato apresenta mais oscilações no seu transitório, especialmente em taxas de subida de tensões mais elevadas. Antoniou (1969) comenta em seus trabalhos que a equação da impedância para a configuração flutuante é a mesma equação encontrada para aterrada.

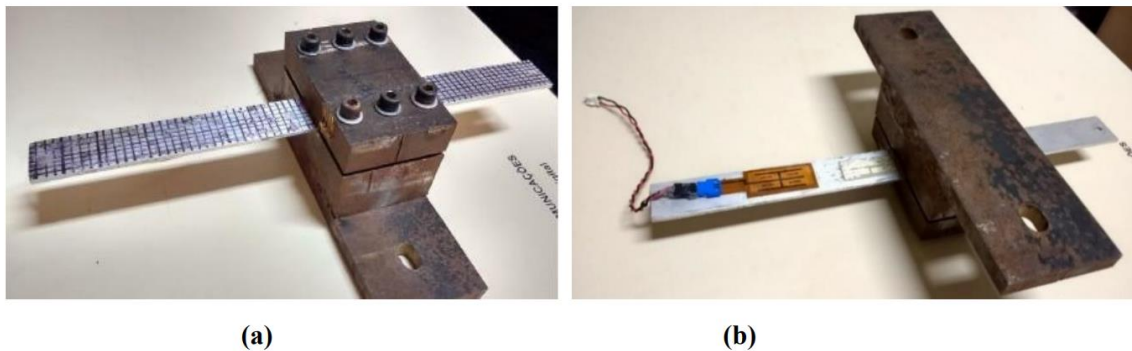
CAPÍTULO 5

PROJETO EXPERIMENTAL COMPUTACIONAL

Considerando que o presente trabalho consiste na continuação dos estudos iniciados por Vicente (2019) e Delgado (2021), todo o projeto experimental computacional utilizou-se dos dados adquiridos nos trabalhos anteriores, como mostrado a seguir.

No trabalho de Vicente (2019) foi utilizado uma viga em aço engastada (381 x 32 x 3 mm), na qual uma das extremidades foi fixa através de um suporte rígido enquanto a outra permanece livre, esse esquema pode ser visto na Figura 24 (a). A viga foi coberta por uma película de material piezoelétrico (*unimorph*), ou seja, apenas na parte inferior da viga (Figura 24 (b)). Os eletrodos se encontram na parte superior e inferior do piezoelétrico.

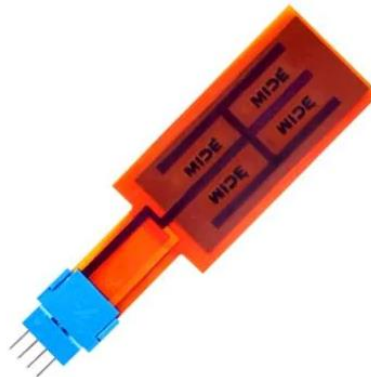
Figura 24 - Estrutura mecânica. (a) Viga em balanço (*cantilever*); (b) Configuração *unimorph*.



Fonte: Vicente (2019) *apud* Delgado (2021).

A pastilha piezoelétrica utilizada foi da fabricante norte-americana *Midé*®, modelo *QuickPack*® QP16N, como mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Pastilha piezoelétrica utilizada por Vicente (2019).



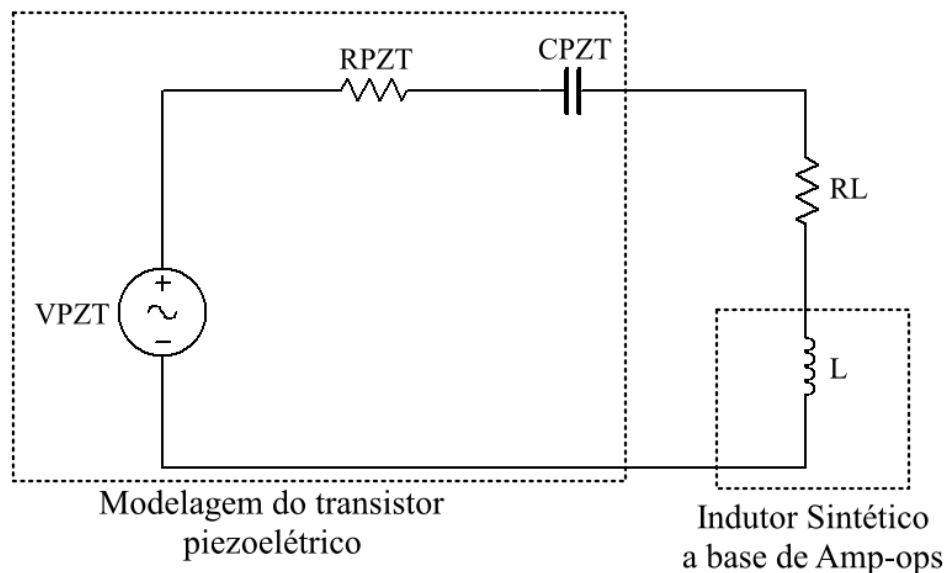
Fonte: *Mouser Electronics*.

5.1 CIRCUITO PARA COLHEITA DE ENERGIA

Segundo os conceitos elétricos vistos no livro de Alexandre e Sadiku (2013), a máxima transferência de potência de um circuito é conseguida quando a impedância da carga for igual ao conjugado complexo da impedância do circuito de colheita de energia.

Como mostrado na Seção 3.4, o circuito de colheita de energia é formado por um transdutor piezoelétrico, representado por uma fonte de energia em série com um capacitor e um resistor, a carga é formada por um resistor em série com um indutor sintético a base de amplificadores operacionais, como pode ser visto na Figura 26. O indutor sintético a base de *Amp-ops* é formado por uma associação de elementos ativos (Amplificadores operacionais e fonte de tensão) e passivos (capacitor e resistor).

Figura 26 - Representação do circuito de colheita de energia.

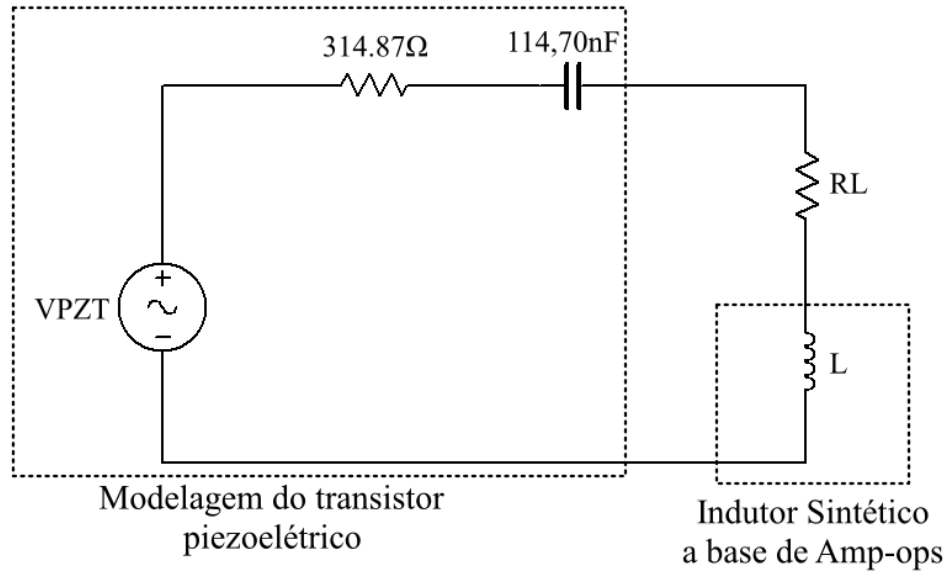


Fonte: Autor.

5.2 TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO

Para medir com precisão o valor da impedância do transdutor piezoelétrico, Vicente (2019) utilizou um medidor LCR. Na medição, definiu-se 100 Hz como frequência de teste e a impedância medida foi de $Z_{PZT} = 314,87 - j13875,42 \, \Omega$, confirmando o comportamento capacitivo do material piezoelétrico. Portanto, os valores da resistência e capacitância do piezoelétrico para o projeto experimental computacional são indicados no circuito da Figura 27.

Figura 27 - Representação do circuito de colheita de energia com seus respectivos valores.



Fonte: Autor.

5.3 CIRCUITO DO INDUTOR SINTÉTICO PARA COLHEITA DE ENERGIA

A utilização do indutor sintético no circuito de colheita de energia tem o objetivo de “anular” a natureza capacitiva do elemento piezoelétrico, assim, uma maior parte da energia será dissipada na carga. Dessa forma utilizou-se a Equação 6 para definir o valor da indutância desejada, conforme mostra na Equação 16.

$$L = \frac{1}{s^2C} = 22,08 \text{ H} \quad (16)$$

Com o intuito de substituir um indutor de bobinas, L , por um indutor sintético, empregou-se as duas configurações apresentadas nas figuras 20 e 21. Para definir o valor dos elementos que compõem o indutor sintético de 22,08H, utilizou-se a Equação 15 presente no Capítulo 4 deste trabalho. Vale salientar que para a segunda configuração basta utilizar os mesmos valores referentes a primeira configuração.

Se todos os valores das resistências nos circuitos de indutores sintéticos forem iguais, e substituindo a impedância Z_e por sL , a Equação 15 se dá por:

$$L = RRC_4 \quad (17)$$

Inicialmente, escolheu-se o valor do capacitor para determinar os valores das resistências, buscando sempre valores comerciais, logo, para o capacitor o valor escolhido foi 2,2nF, então para determinar os valores das resistências temos:

$$R = \sqrt{\frac{L}{C_4}} \quad (18)$$

$$R = \sqrt{\frac{22,08}{2,2 \cdot 10^{-9}}} \quad (19)$$

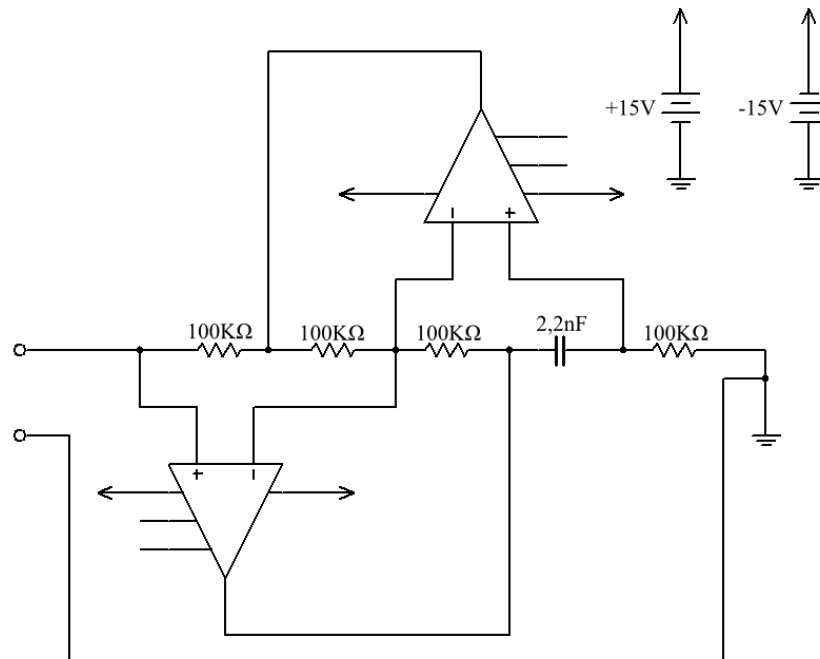
$$R = 100,18K\Omega \quad (20)$$

Como o valor das resistências encontradas foram 100,18KΩ, foram escolhidos valores de resistências comerciais de 100KΩ. Logo o valor da indutância será de:

$$L = (100 \cdot 10^3)(100 \cdot 10^3)(2,2 \cdot 10^{-9}) = 22 H \quad (21)$$

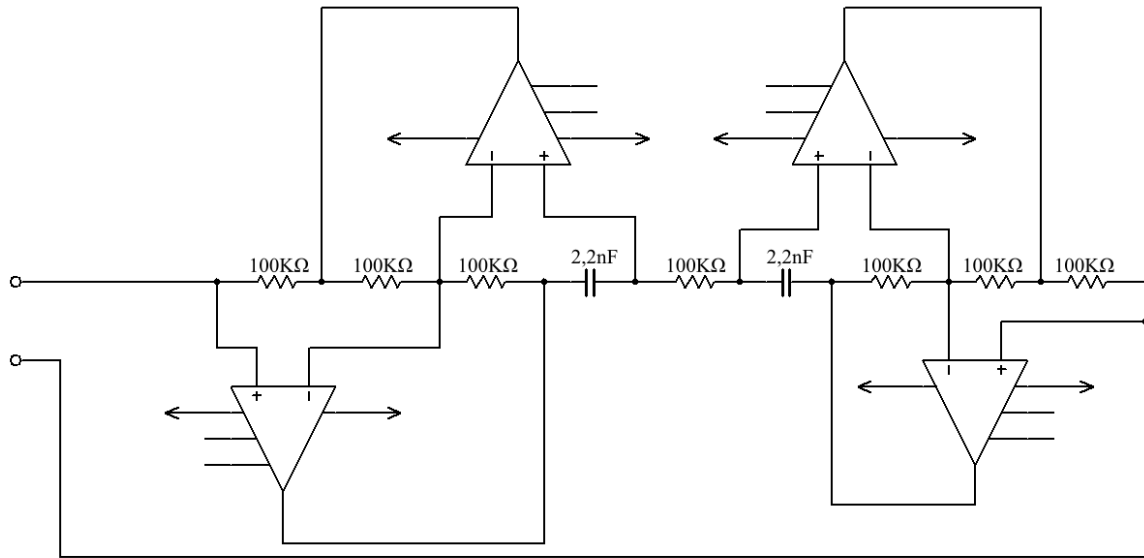
Para as simulações computacionais deste trabalho, foram utilizados os seguintes valores adotados nas configurações dos indutores sintéticos, como pode ser visto nas figuras 28 e 29.

Figura 28 - Representação do circuito sintético aterrado com seus respectivos valores.



Fonte: Autor.

Figura 29 - Representação do circuito sintético flutuante com seus respectivos valores.



Fonte: Autor.

5.4 CARGA RL

O valor da resistência da carga para o circuito de colheita de energia será igual ao valor da resistência gerada pelo transdutor piezoelétrico, como visto na Equação 22.

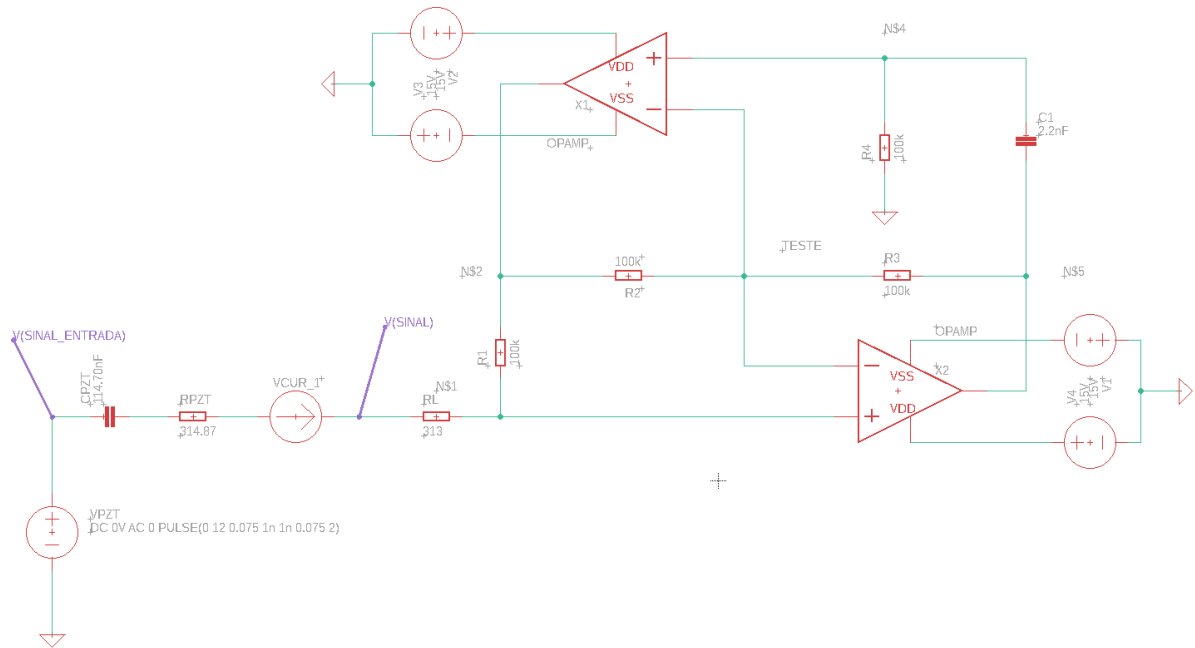
$$R_L = R_{PZT} = 314.87\Omega \quad (22)$$

Respeitando os valores comerciais, adotou-se R_L como uma associação série entre resistores de 300Ω e 13Ω , resultando em 313Ω .

5.5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

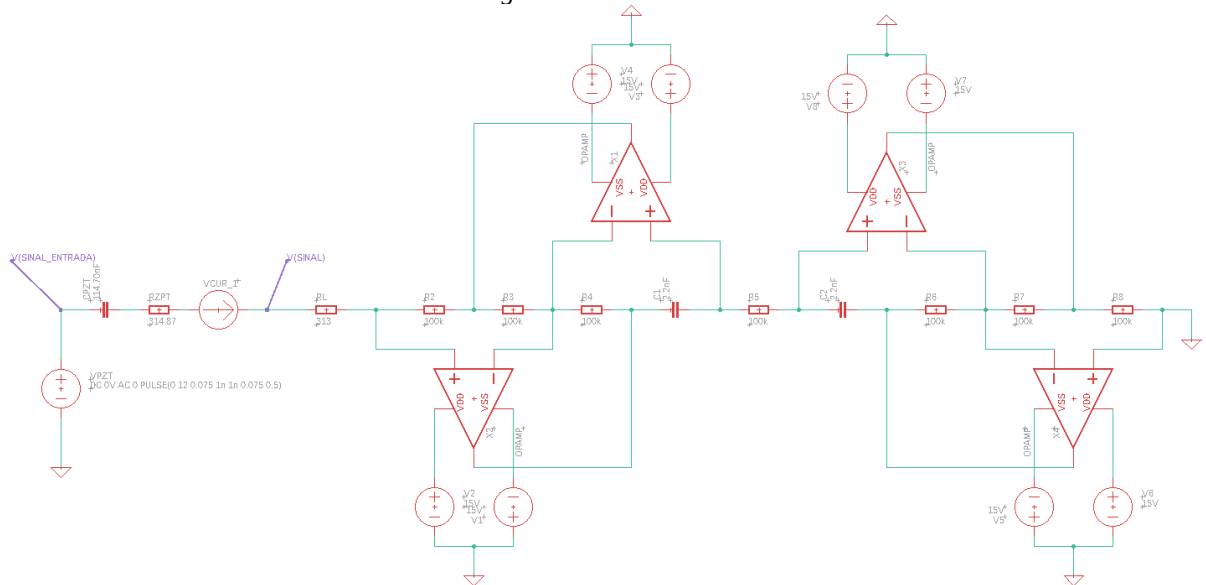
Para as simulações computacionais deste trabalho utilizou-se o *software Eagle 9.6.2 education*, disponibilizado gratuitamente através da parceria do IFG com a empresa de *software e design Autodesk®*. O *software Eagle* é um aplicativo de automação de *design* eletrônico programável com captura esquemática, *layout* da placa de circuito impresso, roteador automático e recursos de fabricação auxiliados por computador, além de incluir o ambiente de simulação *SPICE* padrão da indústria. *EAGLE* significa Editor de *Layout* Gráfico Facilmente Aplicável (Autodesk, 2021). Os dois circuitos simulados utilizando o *Eagle* podem ser vistos nas figuras 30 e 31.

Figura 30 - Circuito de colheita de energia utilizando o indutor aterrado no ambiente de simulação *Eagle education edition*.



Fonte: Autor.

Figura 31 - Circuito de colheita de energia utilizando o indutor sintético flutuante no ambiente de simulação *Eagle education edition*.



Fonte: Autor.

A potência calculada para a carga foi calculada de duas maneiras, potência máxima (Equação 23) e potência média (Equação 24). Sendo a potência máxima a maior potência entregue a carga pelo circuito de colheita de energia. Já a potência média indica o valor constante de potência que abastece a carga durante o tempo de simulação. Outro parâmetro

apresentado foi a energia acumulada (Equação 25), que calcula o somatório de toda energia transferida para a carga.

$$P_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x}^2}{R} \quad (23)$$

$$P_{med} = \frac{\sum_{i=1}^{Npts} \frac{V_i^2}{R}}{Npts} \quad (24)$$

$$E_{acum} = \sum_{i=2}^{Npts} \Delta t \left(\frac{P_i + P_{i-1}}{2} \right) \quad (25)$$

Os resultados das simulações realizadas estão dispostos no próximo capítulo.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Seguindo os testes realizados com indutores sintéticos transistorizados realizado por Delgado (2021), iniciou-se com uma análise dos circuitos de colheita de energia utilizando as configurações de indutores sintéticos operando em regime pulsado. Em seguida as simulações computacionais deste trabalho foram divididas em quatro etapas.

Na primeira etapa as simulações foram dadas por pulsos de tensão de forma isolada e pulsos repetidos (10 Hz e 100 Hz), sendo que tais pulsos de tensão simulam os impactos na estrutura mecânica onde o material piezoelétrico está acoplado. Na segunda etapa as simulações foram dadas por fontes de tensão senoidais de 10Hz e 100Hz, com o intuito de possibilitar uma comparação direta com os resultados encontrados no trabalho de Delgado (2021). As simulações da terceira etapa foram dadas por fontes de tensão senoidais de 75Hz e 125Hz, com intuito de observar frequências próximas à frequência que o circuito foi projetado. Já para quarta etapa de simulações, foram alterados os valores das resistências encontradas nos indutores sintéticos, com uma variação de 5% que é a tolerância encontrada nas resistências reais.

Assim as simulações das quatro etapas ficaram organizadas da seguinte forma:

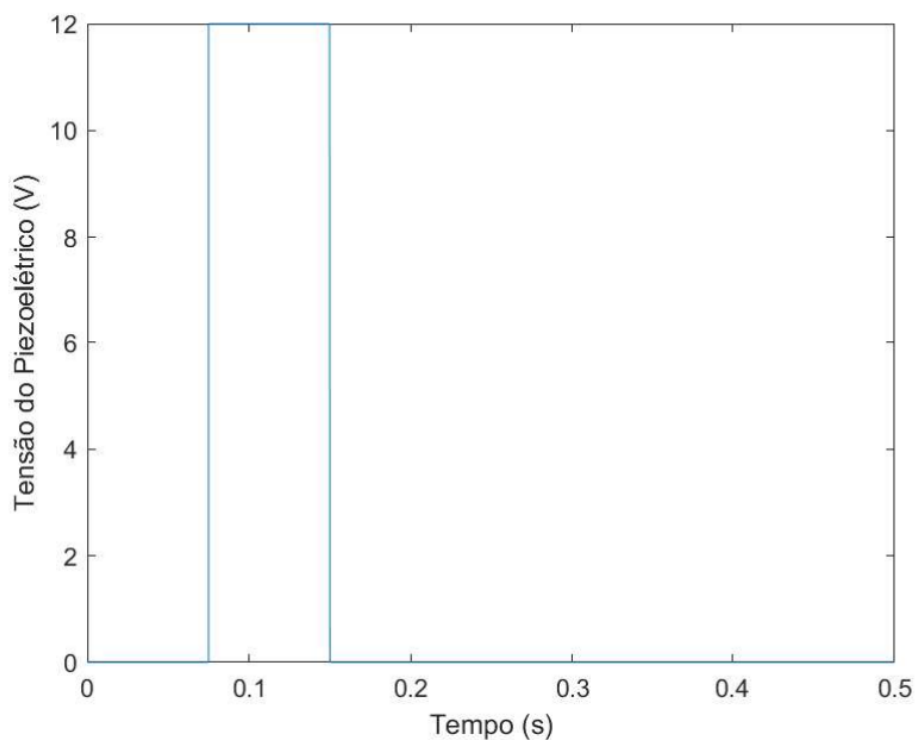
- ❖ Etapa 1
 - 1º caso: circuitos de colheita de energia com pulso isolado;
 - 2º caso: circuitos de colheita de energia com pulsos repetidos (10 Hz);
 - 3º caso: circuitos de colheita de energia com pulsos repetidos (100 Hz);
- ❖ Etapa 2
 - 4º caso: circuitos de colheita de energia com fonte de tensão senoidal (10 Hz);
 - 5º caso: circuitos de colheita de energia com fonte de tensão senoidal (100 Hz);
- ❖ Etapa 3
 - 6º caso: circuitos de colheita de energia com fonte de tensão senoidal (75 Hz);
 - 7º caso: circuitos de colheita de energia com fonte de tensão senoidal (125 Hz);
- ❖ Etapa 4
 - 8º caso: circuitos de colheita de energia com fonte de tensão senoidal (100 Hz), com valores de resistências com tolerância de 5%;

6.2 RESULTADOS DA 1ª ETAPA DE SIMULAÇÕES

6.2.1 RESULTADOS PARA O 1º CASO

O pulso de tensão aplicado de forma isolada (Figura 32), possui valor de 12V. Esse valor é referente a tensão máxima de entrada do piezoelétrico encontrada no trabalho experimental de Vicente (2019).

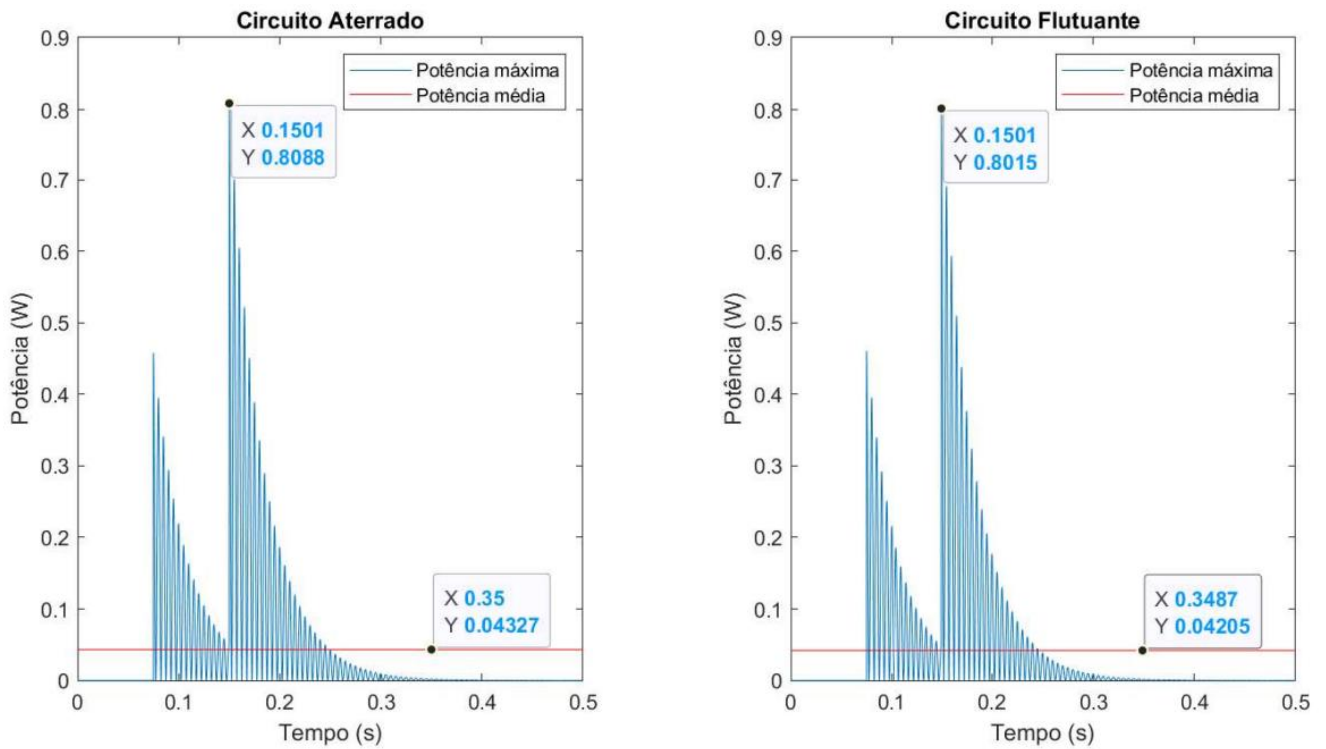
Figura 32 - Pulso de tensão isolado (1º caso).



Fonte: Autor.

Com os dados da tensão na carga e a partir das equações 23 e 24 obtiveram-se os valores de potência para as duas configurações dos circuitos de colheita de energia. O gráfico da Figura 33 mostra a potência máxima entregue a carga e a potência média da primeira e segunda configuração.

Figura 33 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (1º caso).

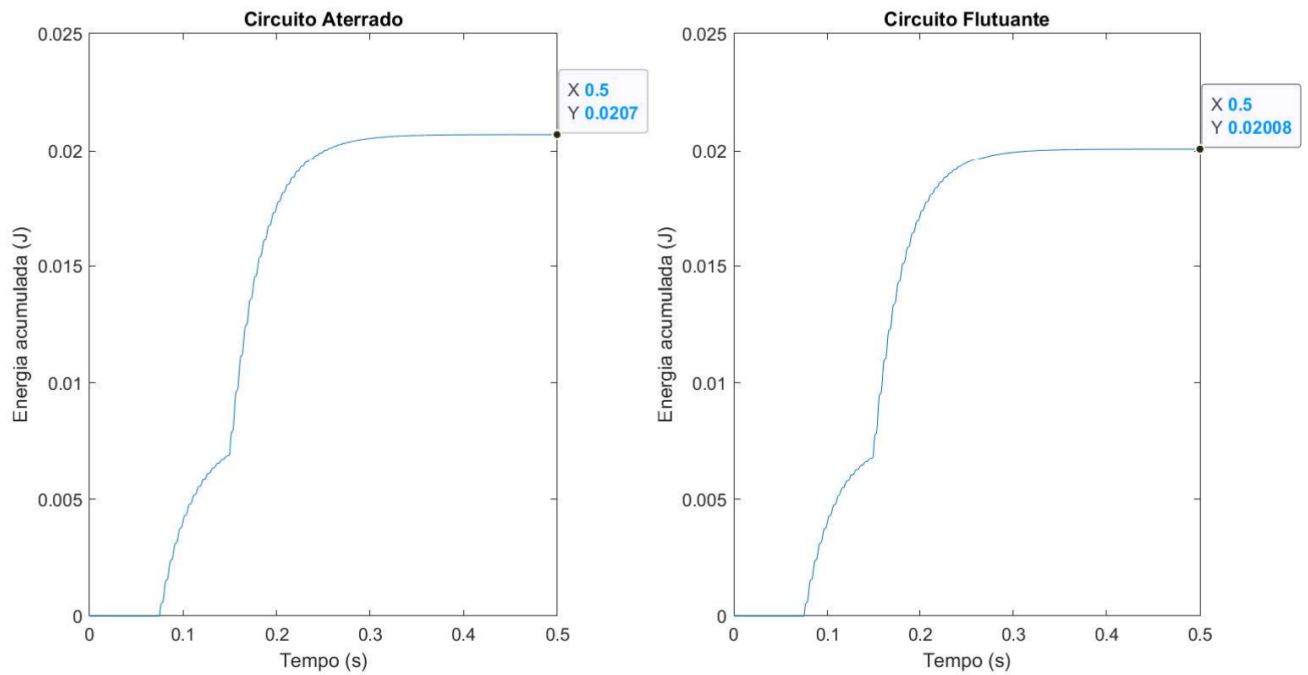


Fonte: Autor.

Conforme visto na Figura 33 a potência máxima entregue a carga pelo circuito com o indutor sintético aterrado foi de 808,8mW, no instante de 150,1ms, já a potência média foi de 43,27mW em um intervalo de 500ms. Já para o circuito flutuante a potência máxima entregue foi de 801,5mW, no instante de 150,1ms, já a potência média foi de 42,05mW em um intervalo de 500ms.

A energia acumulada na carga em função do tempo pode ser vista na Figura 34 com tempo de 500ms. Aonde para o circuito com indutor sintético aterrado obteve-se 20,7mJ de energia, e para o circuito com indutor sintético flutuante obteve-se 20,008mJ de energia.

Figura 34 - Energia acumulada versus tempo (1º caso).

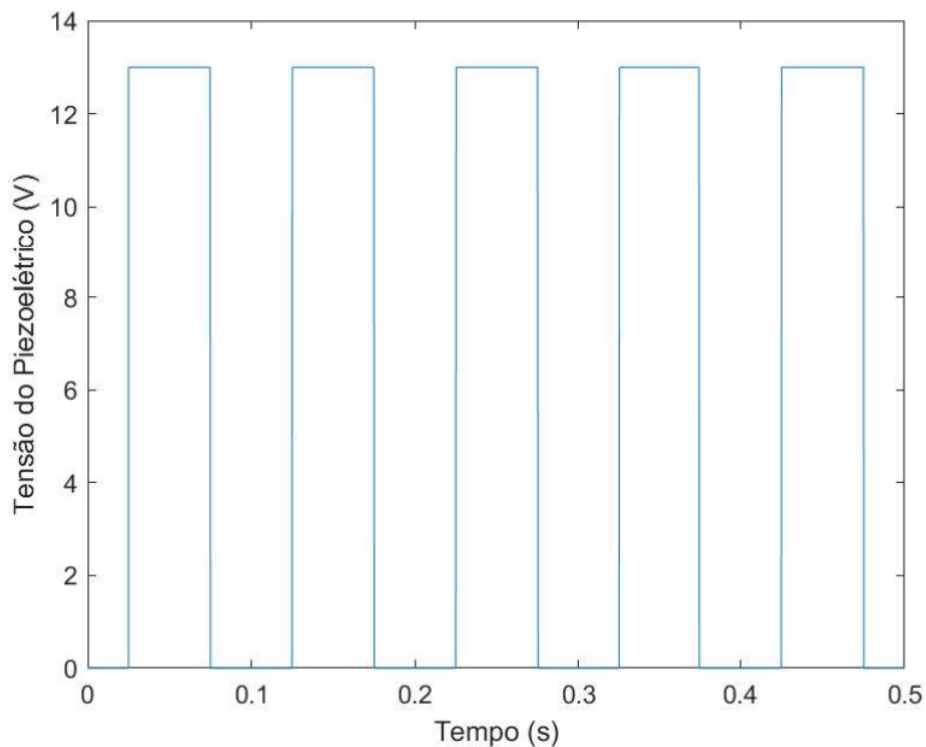


Fonte: Autor.

6.2.2 RESULTADOS PARA O 2º CASO

Para o segundo caso foram aplicados pulsos repetidos de tensão com frequência de 10Hz. Os pulsos repetidos de tensão (Figura 35) tem valor de 13V, referente a tensão máxima de entrada do piezoelétrico encontrada no trabalho experimental de Vicente (2019).

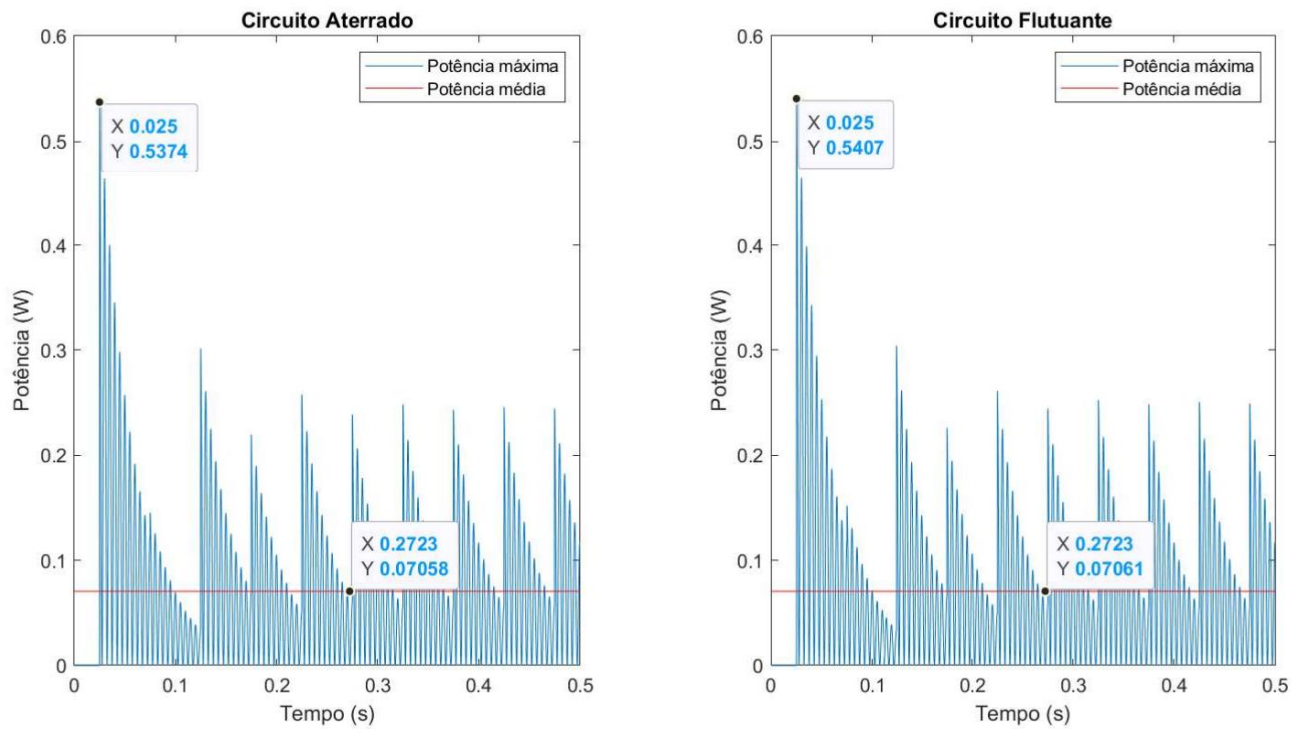
Figura 35 - Pulso de tensão repetido com frequência de 10Hz (2º caso).



Fonte: Autor.

Os gráficos das potências para o segundo caso são apresentados na Figura 36. A potência máxima entregue a carga foi de 537,4mW, no instante de tempo 25ms, enquanto a potência média apresentou valor de 70,58mW durante o tempo de 500ms para o circuito de colheita com indutor sintético aterrado. Já para o circuito de colheita com indutor sintético flutuante a potência máxima entregue a carga foi de 540,7mW, no instante de tempo 25ms, enquanto a potência média apresentou valor de 70,61mW durante o tempo de 500ms.

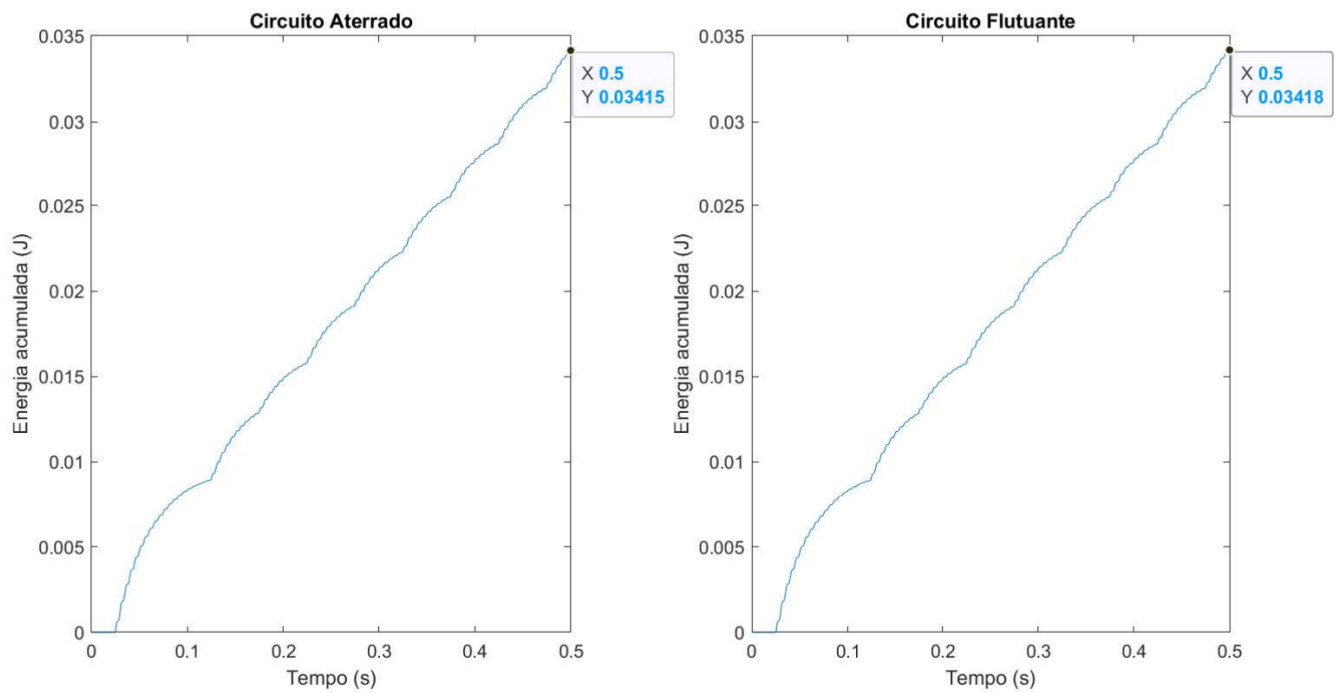
Figura 36 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (2º caso).



Fonte: Autor.

Com os dados de potência para o segundo caso e com o tempo de simulação de 500ms, obteve-se 34,15mJ de energia acumulada para o circuito com indutor sintético aterrado. Já para o circuito com indutor sintético flutuante obteve-se 34,18mJ de energia acumulada, como pode ser visto na Figura 38.

Figura 37 - Energia acumulada versus tempo (2º caso).

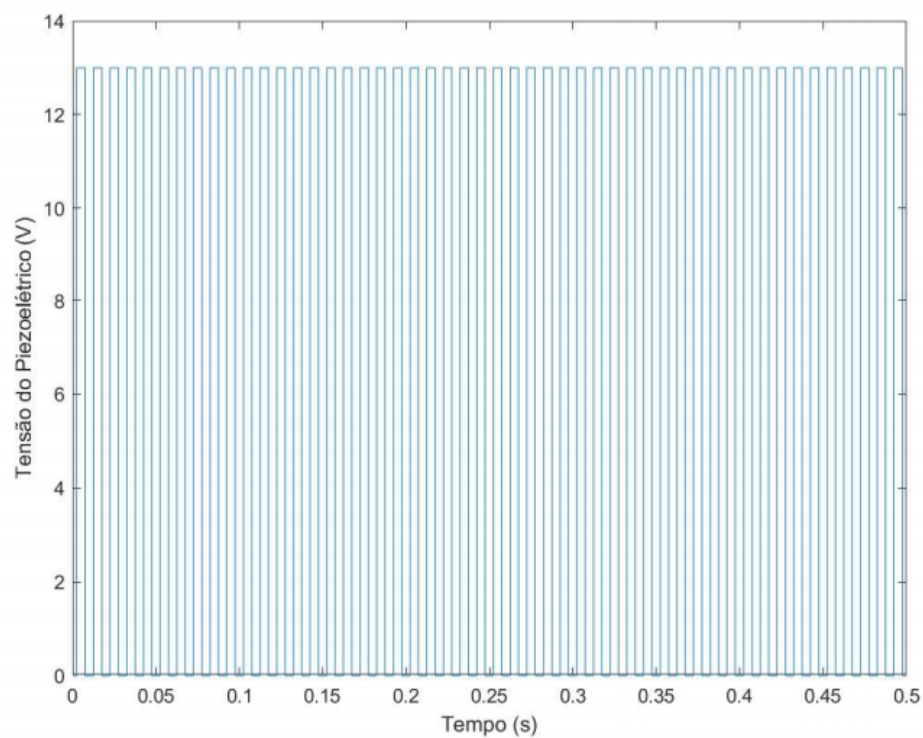


Fonte: Autor.

6.2.3 RESULTADOS PARA O 3º CASO

Para o terceiro caso se aplicaram pulsos repetidos de tensão com frequência de 100Hz, com valor de tensão de 13V, como é mostrado na Figura 38.

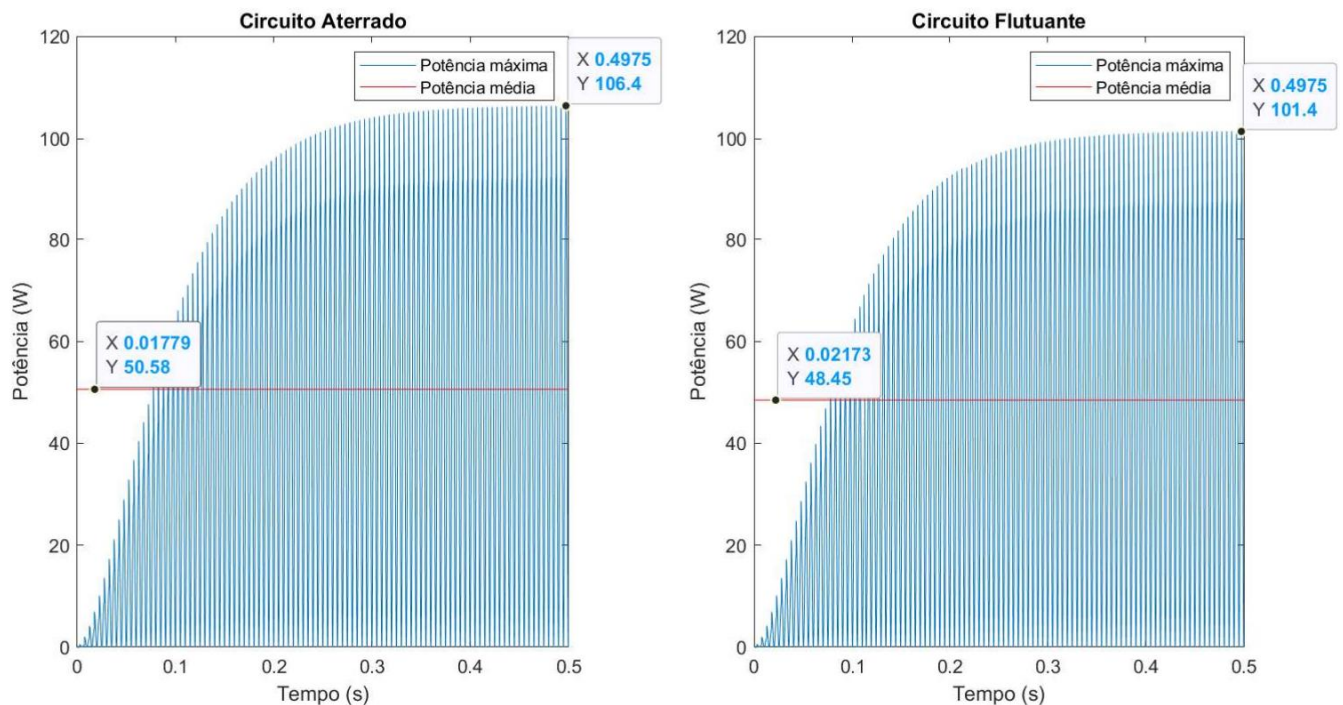
Figura 38 - Pulso de tensão repetido com frequência de 100Hz (3º caso).



Fonte: Autor.

A Figura 39 mostra o gráfico das potências, máxima e média, correspondente a aplicação dos pulsos da Figura 38 nas duas configurações dos circuitos de colheita de energia. Para o circuito de colheita de energia com indutor sintético aterrado, obteve-se a potência máxima de 106,4W, enquanto a potência média apresentou valor de 50,58W. Para o circuito de colheita de energia com indutor sintético flutuante a máxima potência entregue foi de 101,4W, enquanto a potência média apresentou valor de 48,45W. Para as duas configurações foram utilizados tempo de simulação de 500ms.

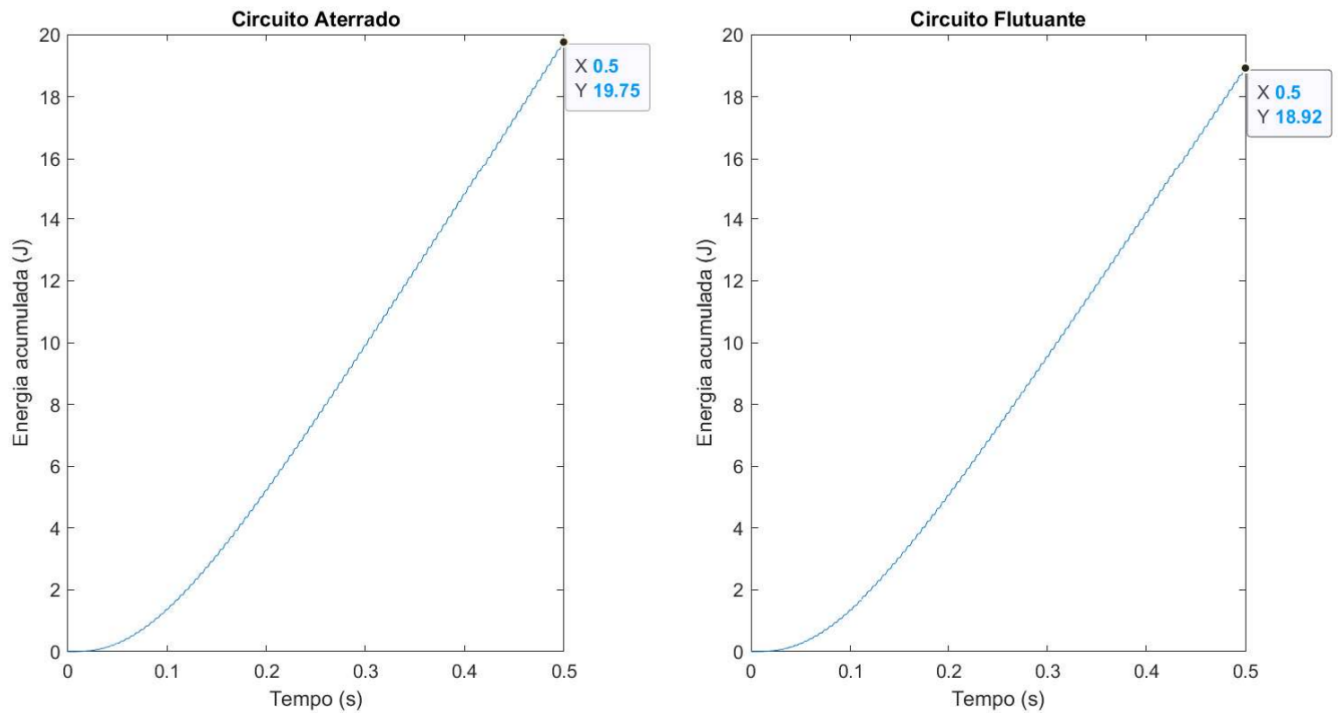
Figura 39 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (3º caso).



Fonte: Autor.

A energia acumulada nas duas configurações para este caso (Figura 40) foram de 19,75J para o circuito com indutor sintético aterrado, e 18,92J para o circuito com indutor flutuante, com tempo de simulação de 500ms.

Figura 40 - Energia acumulada versus tempo (3º caso).



Fonte: Autor.

6.2.4 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A partir dos gráficos foram construídas a Tabela 1 com os dados de potência máxima, média e energia acumulada do circuito de colheita com indutor sintético aterrado, e a Tabela 2 com os dados do circuito de colheita com indutor flutuante, para a análise em regime pulsado.

Tabela 1 - Valores de potência máxima e média, energia acumulada (regime pulsado, circuito aterrado).

	Pulso Isolado	Pulsos 10Hz	Pulsos 100Hz
$P_{m\acute{a}x}$	808,8mW	537,4mW	106,4W
$P_{m\acute{e}d}$	43,27mW	70,58mW	50,58W
E_{acum}	20,7mJ	34,15mJ	19,75J

Fonte: Autor.

Tabela 2 - Valores de potência máxima e média, energia acumulada (regime pulsado, circuito flutuante).

	Pulso Isolado	Pulsos 10Hz	Pulsos 100Hz
$P_{m\acute{a}x}$	801,5mW	540,7mW	101,4W
$P_{m\acute{e}d}$	42,05mW	70,61mW	48,45W
E_{acum}	20,008mJ	34,18mJ	18,92J

Fonte: Autor.

Através dos resultados apresentados nas tabelas 1 e 2, têm-se que os pulsos aplicados em 100 Hz entregam maior potência máxima, média e energia acumulada, pois, é nesta frequência que a impedância do elemento piezoelétrico foi medida, logo como o circuito do indutor sintético foi projetado para tal impedância, é nesta frequência que ocorre a máxima transferência de potência. Comparando o primeiro e o segundo caso, nota-se que a potência máxima do pulso isolado é maior, já a potência média e energia acumulada entregue pelos pulsos repetidos em 10 Hz apresentam maiores resultados, devido ao maior nível de energia injetado pela fonte.

Inicialmente, para o primeiro caso, tem-se que o circuito de colheita com indutor sintético aterrado apresenta levemente melhor desempenho, porém, para o segundo caso a potência máxima e a energia acumulada do circuito de colheita com indutor sintético flutuante são maiores. Para o regime pulsado de 100 Hz (3º caso), o circuito de colheita com indutor sintético aterrado apresenta maiores valores em todos os parâmetros. É importante salientar que o circuito de colheita com indutor sintético flutuante utiliza o dobro de amplificadores operacionais que o circuito aterrado, o que aumenta a energia requerida pelo circuito, com isso em mente, como os valores das duas configurações possuem resultados próximos, temos que em vista de desempenho por energia requerida, o circuito de colheita com indutor sintético aterrado apresentou melhores resultados.

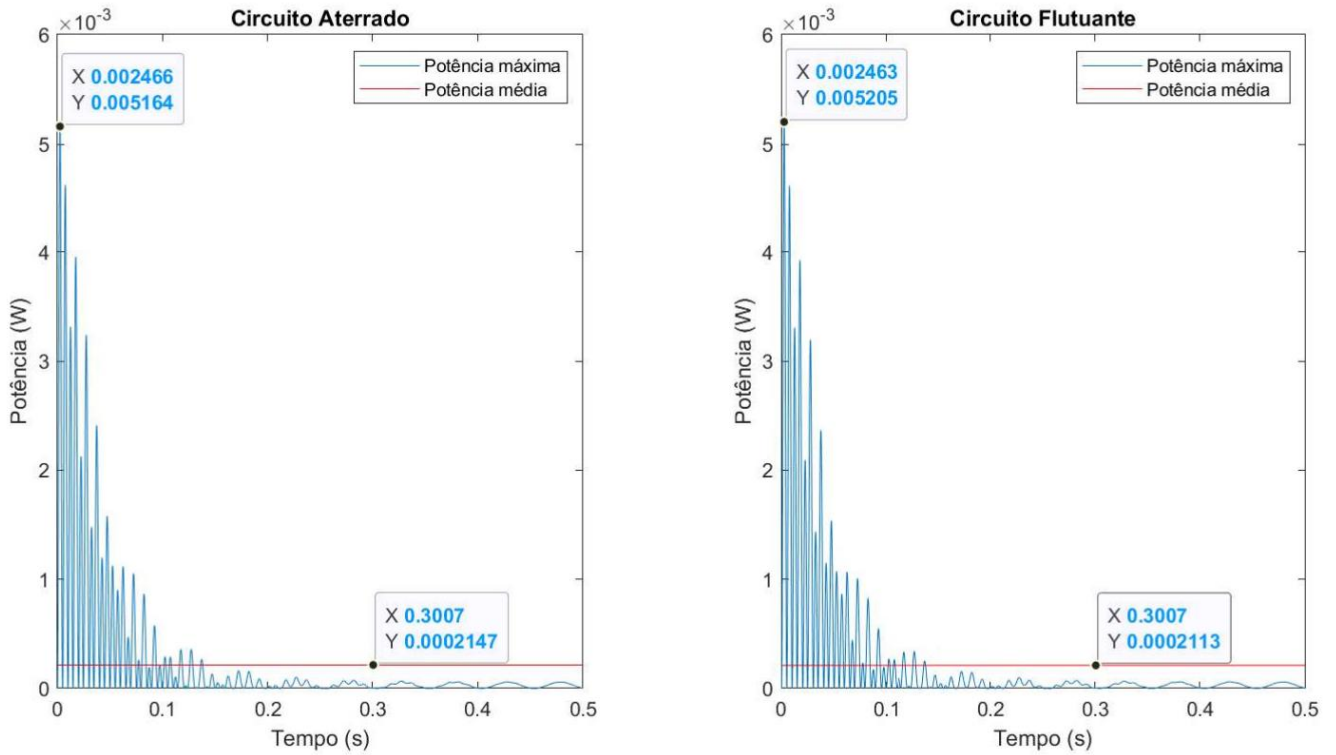
6.3 RESULTADOS DA 2ª ETAPA DE SIMULAÇÕES

6.3.1 RESULTADOS PARA O 4º CASO

As simulações da segunda etapa utilizaram sinais senoidais com magnitude de 13V, para o quarto caso foi aplicado um sinal senoidal de 10Hz na entrada do circuito de colheita de energia. A Figura 41 apresenta as potências máximas e médias obtidas nas duas configurações de indutores sintéticos.

Para o circuito de colheita com indutor sintético aterrado a potência máxima entregue foi de 5,164mW, enquanto a potência média foi de 214,7μW. Já para o circuito com indutor sintético flutuante foram obtidos 5,205mW de potência máxima e 211,3μW de potência média.

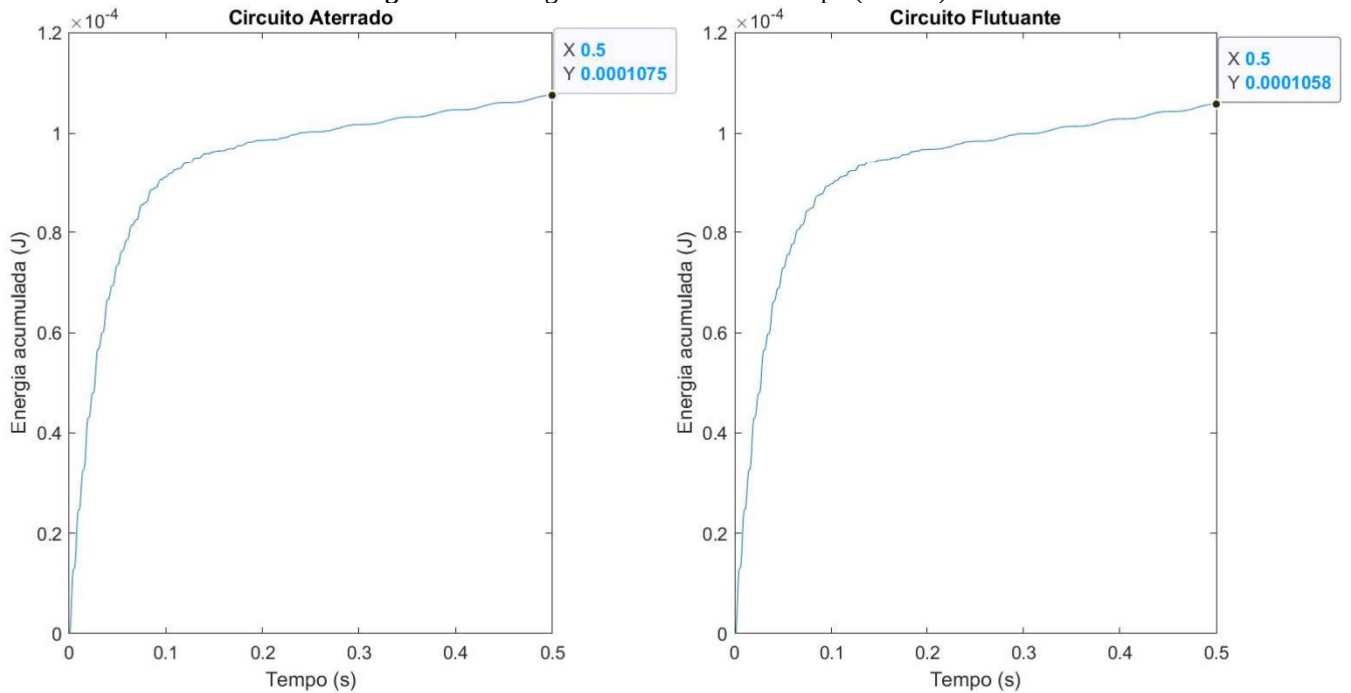
Figura 41 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (4º caso).



Fonte: Autor.

A energia acumulada é vista na Figura 42, para o circuito com indutor aterrado, em 500ms de simulação a energia acumulada foi de 107,5 μ J, enquanto para o circuito com indutor flutuante, a energia acumulada foi de 105,8 μ J.

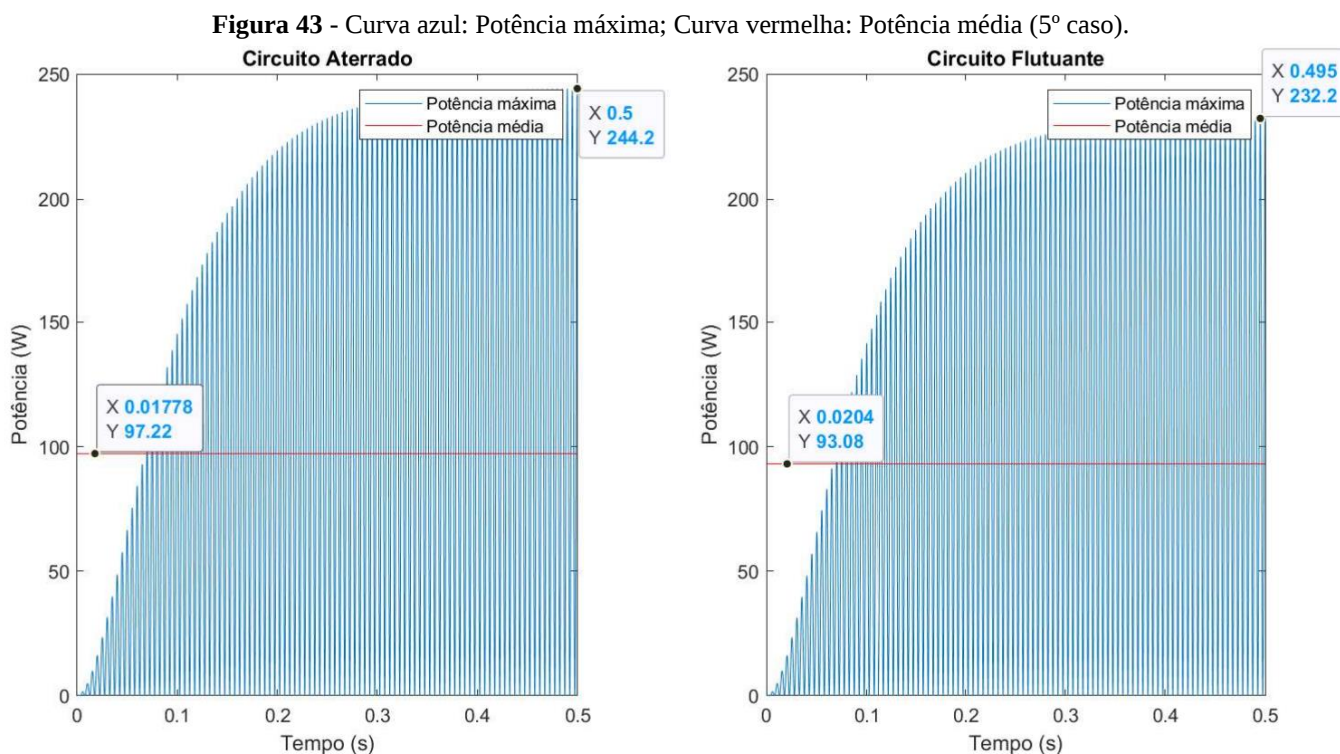
Figura 42 - Energia acumulada versus tempo (4º caso).



Fonte: Autor.

6.3.2 RESULTADOS PARA O 5º CASO

No quinto caso, aplicou-se um sinal senoidal com frequência de 100Hz e, assim como nos casos anteriores, analisaram-se os sinais de potência máxima, média e energia acumulada para as duas configurações dos circuitos de colheita de energia. A Figura 43 apresenta as potências obtidas.

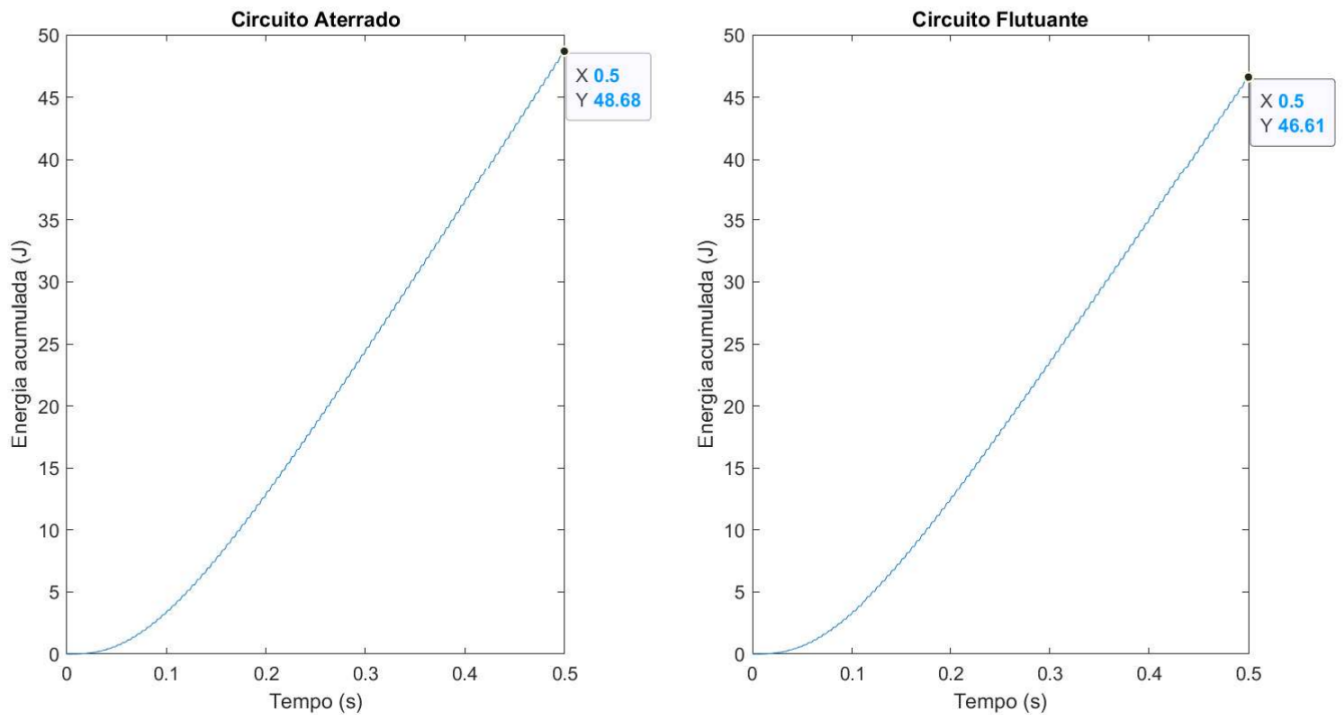


Fonte: Autor.

Conforme visto na Figura 43, para o circuito de colheita com indutor sintético aterrado, a potência máxima extraída pela carga foi de 244,2W, já a potência média entregue a carga teve valor de 97,22W. Já para o circuito com indutor sintético flutuante têm-se que a potência máxima entregue a carga foi de 232,2W, enquanto a potência média foi de 93,08W.

A Figura 44 apresenta a energia acumulada em 500ms para as duas configurações dos circuitos de colheita. Para o circuito de colheita com indutor sintético aterrado a energia acumulada foi de 48,68J, enquanto para o circuito com indutor flutuante a energia acumulada foi de 46,61J.

Figura 44 - Energia acumulada versus tempo (5º caso).



Fonte: Autor.

6.3.3 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A partir dos gráficos obtidos na 2ª etapa foi construída a Tabela 3 com os dados de potência máxima, média e energia acumulada do circuito de colheita com indutor sintético aterrado e flutuante.

Tabela 3 - Valores de potência máxima e média, energia acumulada (2ª Etapa).

	Indutor Aterrado		Indutor Flutuante	
	Senoide 10Hz	Senoide 100Hz	Senoide 10Hz	Senoide 100Hz
$P_{m\acute{a}x}$	5,164mW	244,2W	5,205mW	232,2W
$P_{m\acute{e}d}$	214,7μW	97,22W	211,3μW	93,08W
E_{acum}	107,5μJ	48,68J	105,8μJ	46,61J

Fonte: Autor.

Através dos resultados apresentados na Tabela 3 concluiu-se que, para os dois casos o circuito de colheita com indutor sintético aterrado possui o melhor desempenho, e observando o 5º caso (Senoide de 100 Hz), é visto uma diferença considerável entre os circuitos, e como o circuito de colheita com indutor sintético flutuante possui o dobro de componentes, o que implica um maior gasto de energia e c complexibilidade do circuito, constata-se que a configuração aterrada é a melhor opção, caso ela possa ser utilizada.

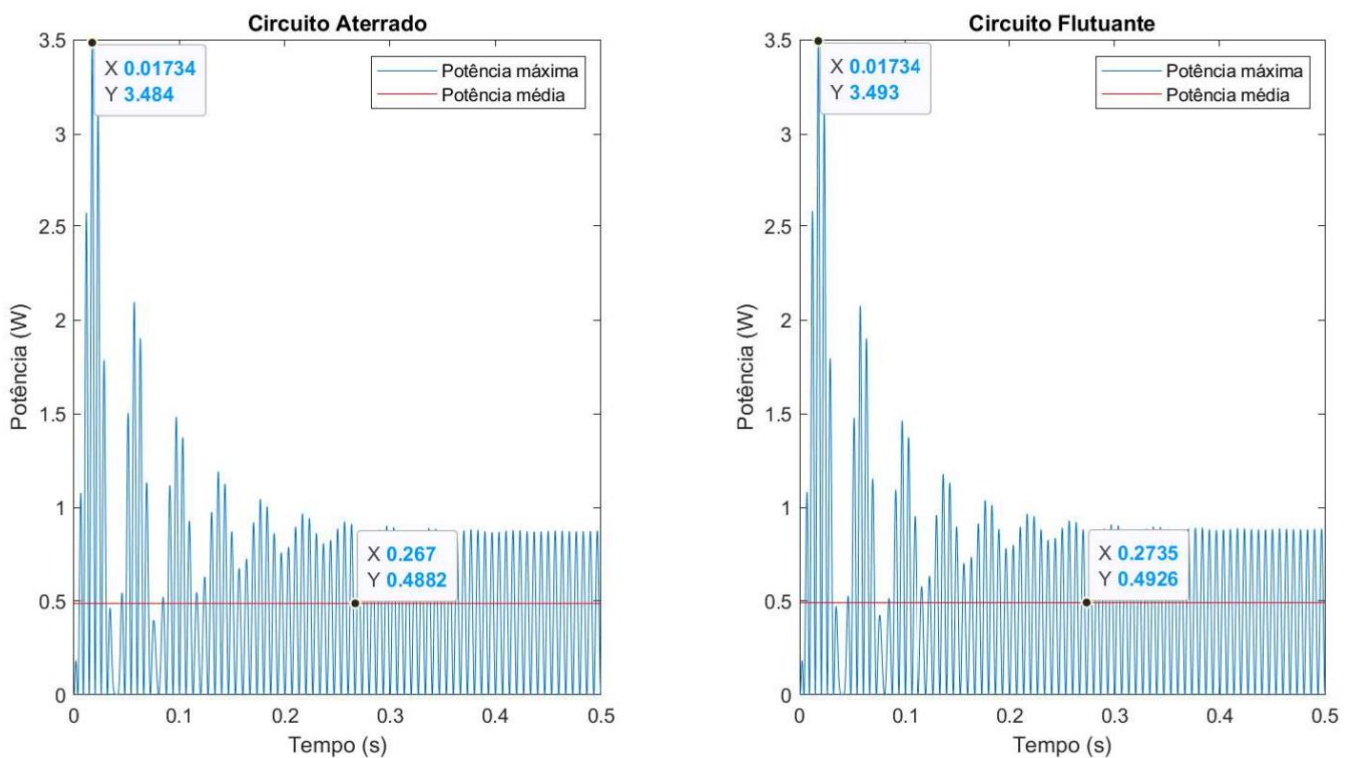
Como esperado, o circuito operando com a frequência onde foi sintonizado apresenta os melhores resultados, confirmando o que foi visto no 3º caso e demonstrando a máxima transferência de potência. Outro fato importante a ser relatado é sobre a grande diferença vista entre o 2º e 4º caso, em que para sinais senoidais com 10Hz tanto quanto as potências quanto a energia acumulada possuem valores 400 vezes menores, enquanto que para sinais senoidais com 100Hz esse cenário muda, com os valores obtidos possuindo o dobro dos valores em relação ao 3º caso. Isto acontece, pois, os sinais pulsados possuem harmônicos, o que implica uma variação de frequências em sua formação, logo para baixas frequências os pulsos repetidos têm incluído em seu sinal, frequências harmônicas acima de 10Hz, o que explica os valores maiores em relação ao sinal puramente senoidal de 10Hz, enquanto para os pulsos repetidos de 100Hz também ocorre o mesmo, por isso possui menores valores de potência em relação ao sinal puramente senoidal de 100z.

6.4 RESULTADOS DA 3ª ETAPA DE SIMULAÇÕES

6.4.1 RESULTADOS PARA O 6º CASO

As simulações da quarta etapa também utilizaram sinais senoidais com magnitude de 13V, para o sexto caso foi aplicado um sinal senoidal de 75Hz na entrada do circuito de colheita de energia. A Figura 45 apresenta as potências máximas e médias obtidas nas duas configurações de indutores sintéticos.

Figura 45 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (6º caso).

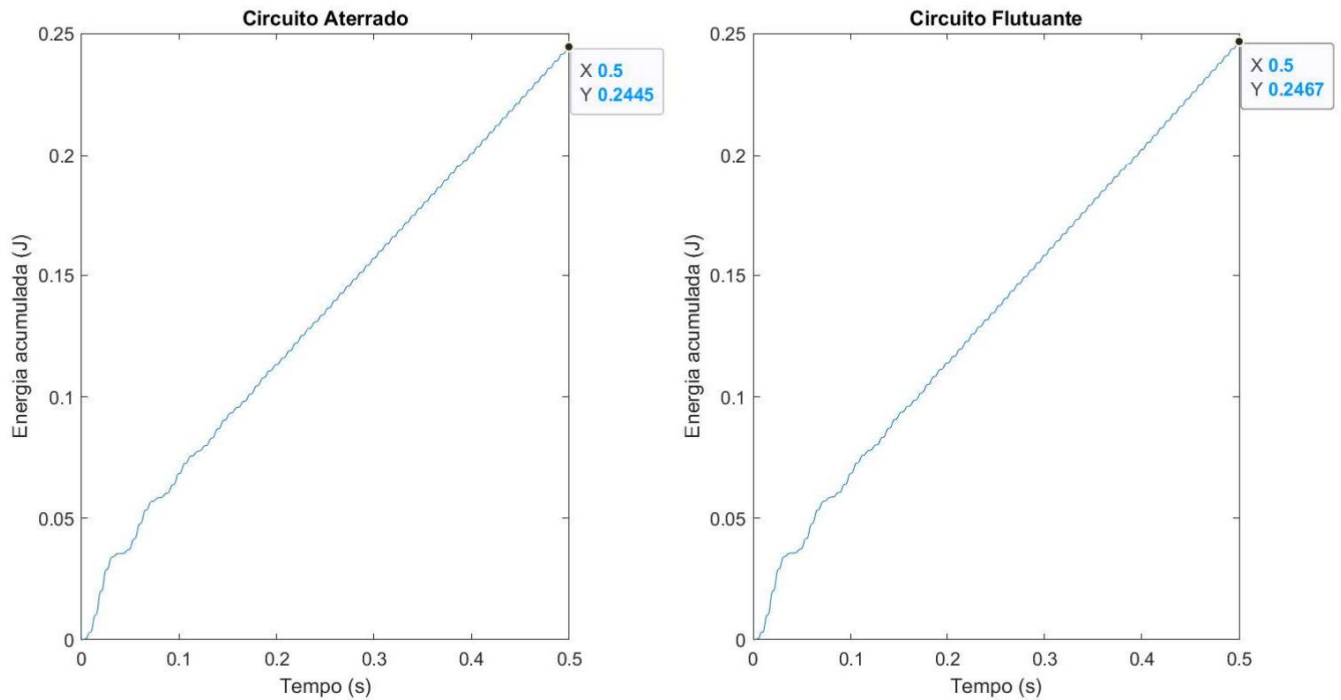


Fonte: Autor.

Para o circuito de colheita com indutor sintético aterrado a potência máxima entregue foi de 3,484W, enquanto a potência média foi de 488,2mW. Já para o circuito com indutor sintético flutuante foi obtido 3,493W de potência máxima e 492,6mW de potência média.

A energia acumulada é vista na Figura 46, para o circuito com indutor aterrado, em 500ms de simulação a energia acumulada foi de 244,5mJ, enquanto para o indutor flutuante, a energia acumulada foi de 246,7mJ.

Figura 46 - Energia acumulada versus tempo (6º caso).

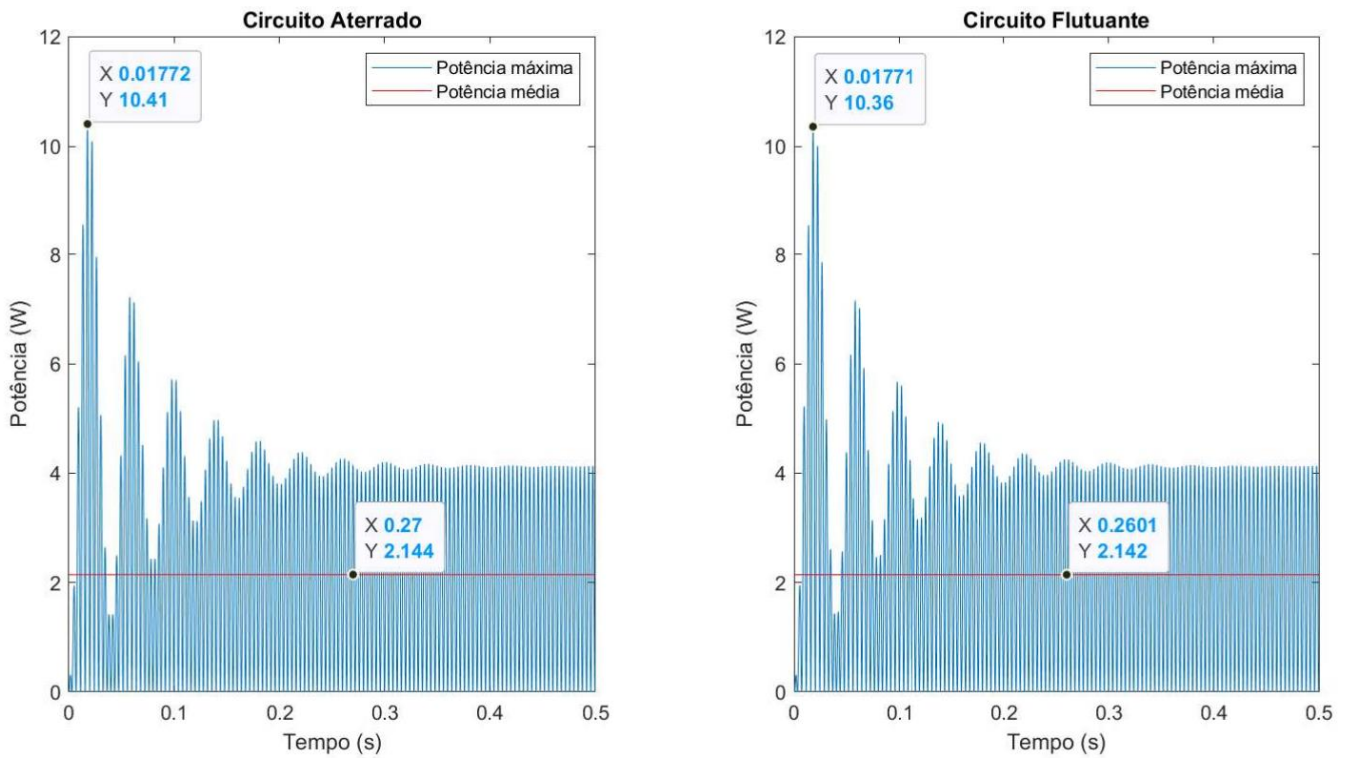


Fonte: Autor.

6.4.2 RESULTADOS PARA O 7º CASO

No sétimo caso, aplicou-se um sinal senoidal com frequência de 125Hz e, assim como nos casos anteriores, analisaram-se os sinais de potência máxima, média e energia acumulada para as duas configurações dos circuitos de colheita de energia. As potências obtidas são apresentadas na Figura 47, para o circuito com indutor aterrado, a potência máxima entregue pelo circuito foi de 10,41W, enquanto a potência média foi de 2,144W, já para o circuito com indutor flutuante a potência máxima entregue foi de 10,36W, e a potência média de 2,142W.

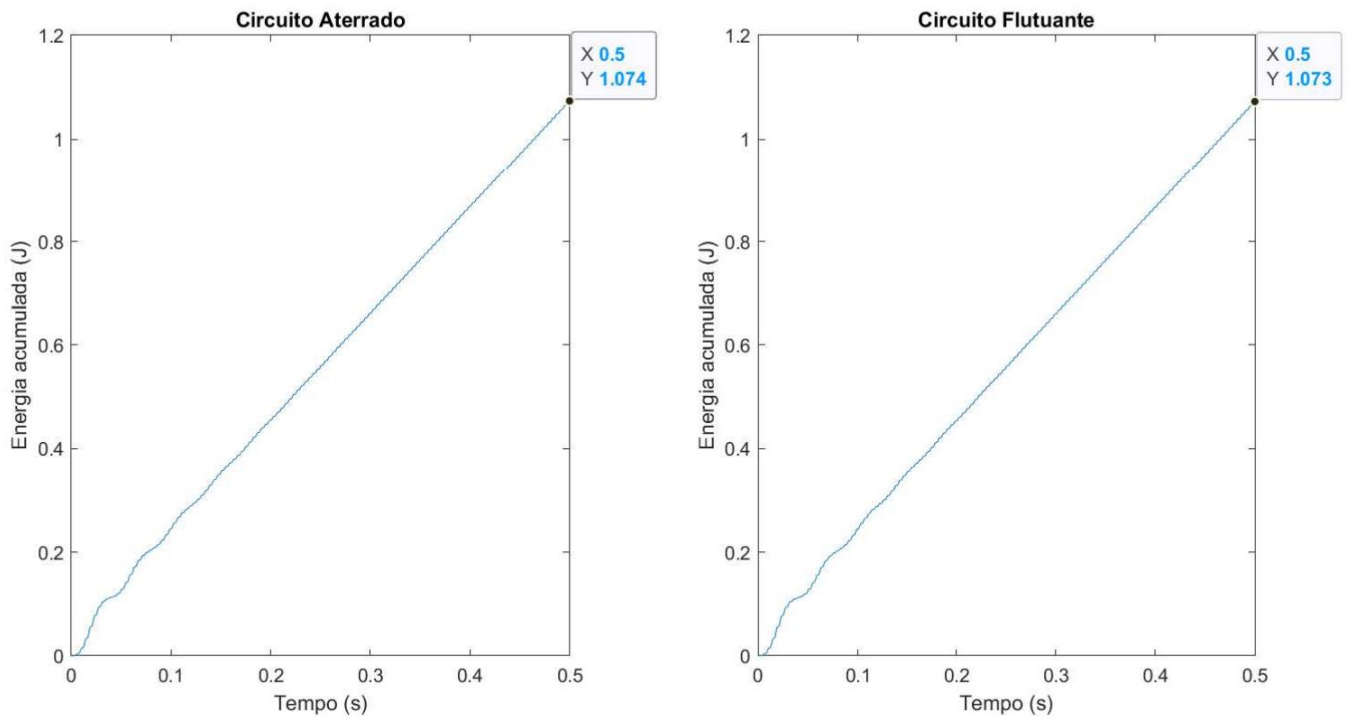
Figura 47 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (7º caso).



Fonte: Autor.

A Figura 48 apresenta a energia acumulada para as duas configurações dos circuitos de colheita. Para o circuito de colheita com indutor sintético aterrado a energia acumulada foi de 1,074J, enquanto para o circuito com indutor flutuante a energia acumulada foi de 1,073J.

Figura 48 - Energia acumulada versus tempo (7º caso).



Fonte: Autor.

6.4.3 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A partir dos gráficos obtidos por esta etapa, foi construída a Tabela 4 com os dados de potência máxima, média e energia acumulada do circuito de colheita com indutor sintético aterrado e flutuante.

Tabela 4 - Valores de potência máxima e média, energia acumulada (3º Etapa).

	Indutor Aterrado		Indutor Flutuante	
	Senoide 75Hz	Senoide 125Hz	Senoide 75Hz	Senoide 125Hz
$P_{m\acute{a}x}$	3,484W	10,41W	3,493W	10,36W
$P_{m\acute{e}d}$	488,2mW	2,144W	492,6mW	2,142W
E_{acum}	244,5mJ	1,074J	246,7mJ	1,073J

Fonte: Autor.

Através dos dados apresentados na Tabela 4, conclui-se que para sinais de entrada com frequências acima da frequência de sintonização (100Hz para este trabalho), os níveis de energia obtidos pelo circuito de colheita decaem, logo sinais com frequência acima e abaixo da frequência de sintonização apresentam menores resultados. E comparando-se os dados obtidos entre as duas frequências simuladas nesta etapa, têm-se que o sinal senoidal com frequência de 125Hz apresenta maiores resultados, mas é importante observar que os resultados obtidos do sinal senoidal com frequência de 125Hz apresenta apenas 2,2% da energia acumulada do sinal senoidal com frequência de 100Hz.

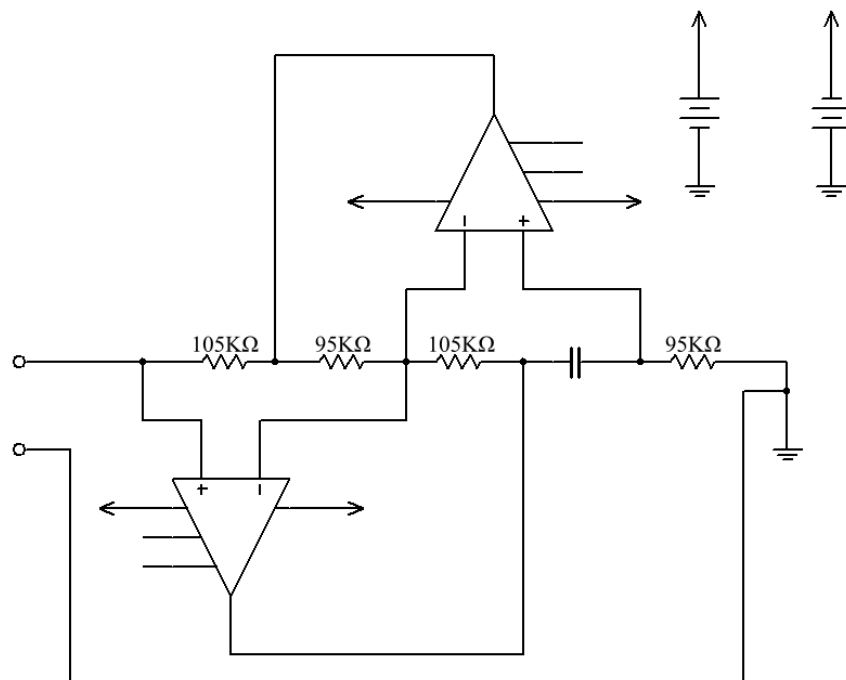
Para o 6º caso (senoide de 75Hz) o circuito com indutor sintético flutuante apresenta potência máxima, média e energia acumulada maiores em relação ao circuito com indutor sintético aterrado, já para o 7º caso isto se inverte, e o circuito sintético aterrado apresenta os maiores resultados.

6.5 RESULTADOS DA 4ª ETAPA DE SIMULAÇÕES

6.5.1 RESULTADOS PARA O 8º CASO

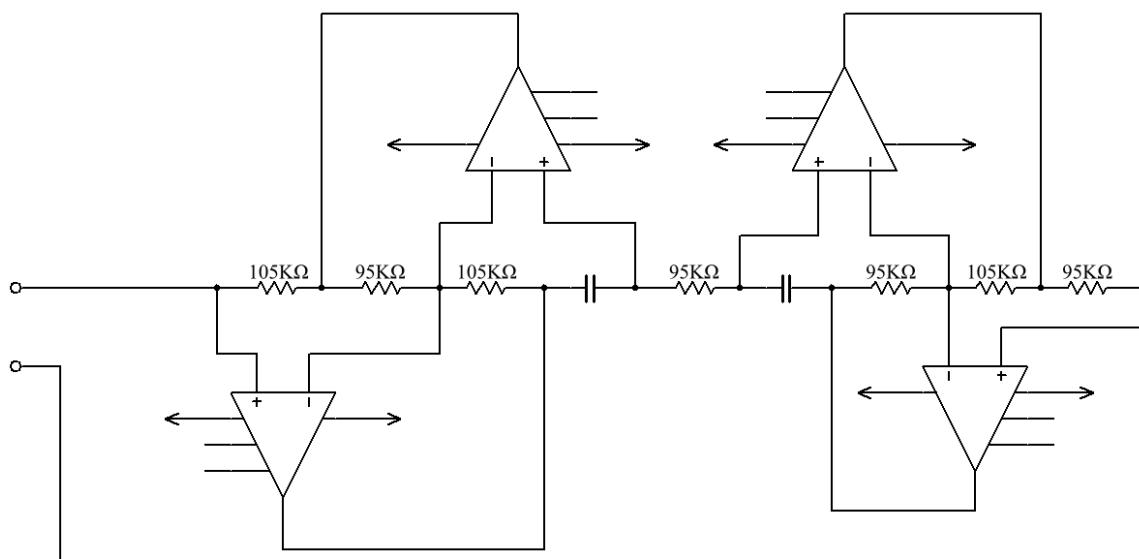
Para o 8º caso foram alterados os valores das resistências nos circuitos dos indutores sintéticos, simulando os valores extremos de tolerância que resistências reais possuem, assim foram escolhidas as ordens dos valores de forma sequencial, e as figuras 49 e 50 demonstram os circuitos de indutores sintéticos utilizados nesta etapa de testes.

Figura 49 - Indutor sintético aterrado com valores extremos de tolerância para as resistências.



Fonte: Autor.

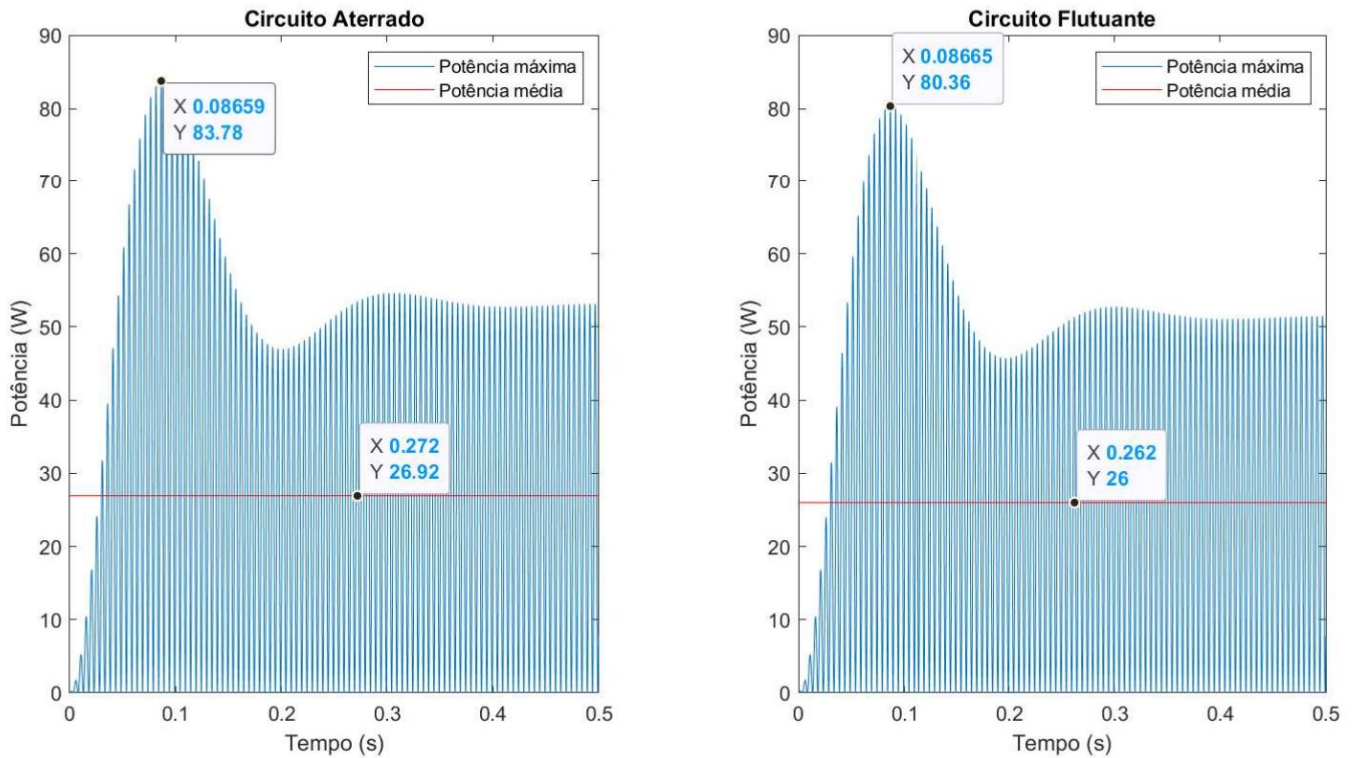
Figura 50 - Indutor sintético flutuante com valores extremos de tolerância para as resistências.



Fonte: Autor.

Para se comparar com os valores encontrados no 5º caso, aplicou-se um sinal senoidal com frequência de 100Hz e, assim como nos casos anteriores, analisaram-se os sinais de potência máxima, média e energia acumulada para as duas configurações utilizando os indutores sintéticos demonstrados nas figuras anteriores. A Figura 51 apresenta as potências obtidas.

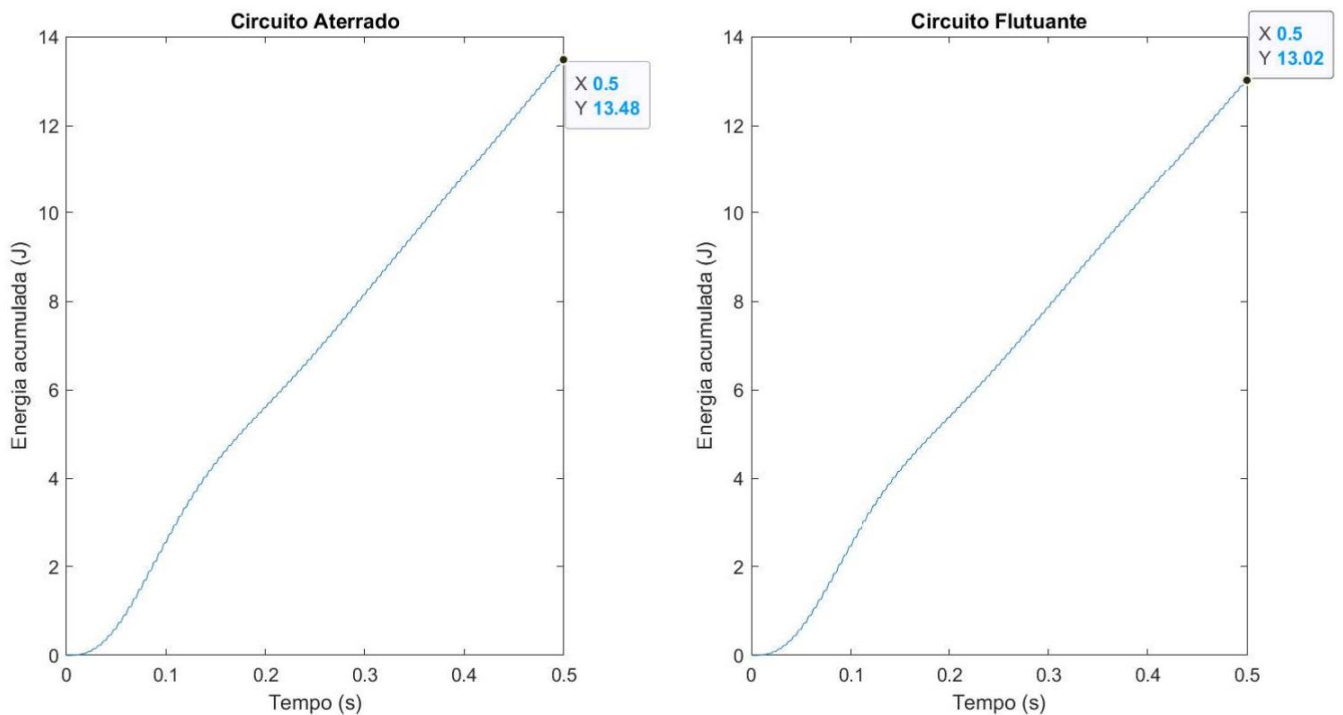
Figura 51 - Curva azul: Potência máxima; Curva vermelha: Potência média (8º caso).



Fonte: Autor.

Para o circuito aterrado a potência máxima entregue foi de 83,78W, enquanto a potência média foi de 26,92W. Já para o circuito flutuante foi obtido 80,36W de potência máxima e 26W de potência média. Na Figura 52 é apresentado os valores de energia acumulada.

Figura 52 - Energia acumulada versus tempo (8º caso).



Fonte: Autor.

A energia acumulada para o circuito com indutor aterrado, em 500ms de simulação foi de 13,48J, enquanto para o circuito com indutor flutuante, a energia acumulada foi de 13,02J.

6.5.2 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

A partir dos resultados obtidos por esta etapa e os do 5º caso, foi construída a Tabela 5 com os dados de potência máxima, média e energia acumulada do circuito de colheita com indutor sintético aterrado e flutuante.

Tabela 5 - Valores de potência máxima e média, energia acumulada (4º Etapa).

	Indutor Aterrado		Indutor Flutuante	
	5ºCaso	8ºCaso	5ºCaso	8ºCaso
$P_{m\acute{a}x}$	244,2W	83,78W	232,2W	80,36W
$P_{m\acute{e}d}$	97,22W	26,92W	93,08W	26W
E_{acum}	48,68J	13,48J	46,61J	13,02J

Fonte: Autor.

A partir dos dados apresentados pela Tabela 5, conclui-se que os valores reais utilizados nas resistências causam um grande impacto no resultado final, sendo visto uma grande diferença entre os resultados obtidos entre as duas simulações. E comparando os resultados obtidos no 8º caso com os resultados encontrados no 3º caso, temos que a variação dos valores das resistências são mais impactantes que variações nos valores de frequência de entrada.

Para o 8º caso o circuito com indutor aterrado obteve maiores resultados se comparado com os resultados obtidos no circuito flutuante. Outro fato importante a se comentar, é que o circuito com indutor flutuante tende a sofrer mais variações dos valores das resistências, já que o mesmo possui mais componentes em sua topologia.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A princípio este trabalho teria o objetivo de se construir e analisar experimentalmente um protótipo de circuito de amplificadores operacionais para colheita de energia de vibrações, assim dando sequência ao trabalho de Vicente (2019), e proporcionando um comparativo ao trabalho de Delgado (2021). No cenário para baixas frequências necessita-se de indutores com grandes valores, o que ocasionaria um grande volume e peso para indutores baseados em enrolamentos, uma solução viável para esse problema é a utilização de indutores sintéticos, no qual para este trabalho foram analisadas configurações empregando amplificadores operacionais.

Em decorrência ao cenário atual da pandemia vivenciada em nosso tempo atual, este trabalho sofreu algumas limitações e foi adaptado para simulações computacionais. Diante disso foi investigado e analisado computacionalmente o circuito de indutor sintético a base de amplificadores operacionais encontrados na literatura de Antoniou (1969) e explorados em Zambolini-Vicente *et al* (2016), com objetivo de maximizar o aproveitamento de energia de vibrações mecânicas do ambiente.

Inicialmente, investigaram-se as possíveis configurações de circuitos de indutores sintéticos a base de amplificadores operacionais, após a determinação das duas configurações, executou-se testes para comprovação do comportamento indutivo nos mesmos. Posteriormente, aplicou-se o circuito equivalente que modela o transdutor piezoelétrico ao circuito indutor sintético, com objetivo de eliminar o reativo capacitivo do transdutor piezoelétrico, assim realizando o casamento de impedância, e consequentemente melhorando a eficiência na colheita de energia.

A análise computacional deste trabalho avaliou a potência e energia extraída dos circuitos em quatro etapas. Os resultados obtidos nas simulações computacionais mostraram que a energia extraída do material piezoelétrico na frequência de sintonização (100Hz), pode ser aplicada em circuitos que demandem consumo de potência na ordem de dezenas de Watts, como, por exemplo, em lâmpadas, carregadores de celulares entre outros. Também é visto que os circuitos de colheita de energia apresentam o melhor desempenho quando utilizados na frequência de sintonização, ou frequências próximas a ela.

Na quarta etapa de simulações é visto que os valores dos componentes causam um grande impacto nos resultados finais, logo para o melhor desempenho, é necessário garantir que os valores reais estejam os mais próximos possíveis dos valores projetados. Por fim os resultados obtidos nas simulações, indicaram que o circuito de colheita com indutor sintético aterrado é o melhor circuito custo/benefício, já que o mesmo na maioria dos casos apresentou melhores resultados, e possui menos componentes em sua topologia, sendo a sua única limitação o mesmo ser um circuito fim de linha.

Como trabalhos futuros vislumbra-se:

- Explorar outros modelos de indutores sintéticos a base de amplificadores operacionais, bem como o uso de outras topologias de circuitos;
- Aplicar experimentalmente as duas configurações de indutores sintéticos deste trabalho em placa de circuito impresso PCB (*Printed Circuit Board*);
- Investigar a energia requerida pelo circuito do indutor sintético e analisar uma possível autossuficiência na questão de geração/consumo de energia;
- Implementar circuito auxiliar para a carga de bateria, e analisar por períodos contínuos o rendimento do mesmo;
- Aprofundar a modelagem do amplificador operacional, a fim de se incluir os diversos parâmetros que provocam não-linearidades, aperfeiçoando o comportamento do sistema simulado.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

ANTONIOU, A., **Realization of gyrators using operational amplifiers and their use in RC - active network synthesis**. Proc. Inst. Elec. Eng., 116: 838-1850, 1969.

ARMENDANI, Willian Alves; et. al. **Conhecendo a Piezoeletricidade, uma nova forma de geração de energia elétrica**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 1. Vol. 9. pp 314-320, outubro / novembro de 2016. ISSN: 2448-0959.

BERNARDI, Rodrigo. **INVESTIGAÇÃO NÚMERICA DE FLAMBAGEM EM ELEMENTOS ESBELTOS DE PERFIS METÁLICOS**. 2007. 80 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.

COTTONE, F. **Nonlinear Piezoelectric Generators for Vibration Energy Harvesting**. Universita' Degli Studi Di Perugia, Dottorato Di Ricerca In Fisica, XX Ciclo, 2007.

DELGADO, Mateus Pereira. **Simulação de circuito transistorizado para colheita de energia de vibrações**. 2021. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2021.

DOMINGOS, Ciro Beduschi; WEISS, Cristhopher; WOLF, Lucas Schwarz. **TRANSDUÇÃO DA ENERGIA SONORA PARA SINAIS ELÉTRICOS UTILIZANDO MATERIAL PIEZOELÉTRICO**. 2013. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DROESCHER, Roberta Elisabeth. **Obtenção e Caracterização Microestrutural e Elétrica de Cerâmicas PZT-PMN**. 2009. 60 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

FRANKLIN, Renato. **Caracterização de uma Célula Tubular Piezoelétrica para Geração de Energia Elétrica**. 2014. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

GASPAROTTO, Gisele. **Síntese e caracterização da cerâmica PZT dopada com estrôncio e com nióbio e estrôncio**. 2002. xiii, 103 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, 2002.

GOULARTE, R. M. **Módulo de elasticidade de materiais lamelares determinados com a técnica de indentação instrumentada**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Graduação em Engenharia Automotiva, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.

HAERTLING, G. H. **Ferroelectric Ceramics: History and Technology**. Journal of the American Ceramic Society, 82: 797-818, 1999.

IKEDA, Takuro. **Fundamentals of piezoelectricity**. Oxford: Oxford ; New York ; Tokyo : Oxford University Press, 1996.

ILIUK, Itamar. **Fenômenos não-lineares, incluindo-se os não-ideias, em captura de energia utilizando-se dispositivos piezoelétricos**. 2012. 124 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2012.

KHALIGH A.; ZENG P.; ZHENG C. **Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies State of the Art**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 3, march 2010.

LEITE, A, C. G. M. **A sustentabilidade empresarial, social e as fontes de energia**. 2013. 39 f. Graduação em Administração. Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2013.

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

LU, F.; LEE, H. P.; LIM, S. P. **Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications**. Smart Materials and Structures, v. 13, pp. 57-63, 2004.

MALOBERTI, F. **Entendendo microeletrônica: uma abordagem top-down**. LTC, 2015 588p. ISBN:978-85-216-2718-0.

MATTHAEI, G. L.; YOUNG, L. and JONES, E. M. T. **Microwave Filters, Impedance - Matching Networks, and Coupling Structures**, pp. 434-440, McGraw-Hill 1964 (1980 ed: ISBN 0-89006-099-1).

OLIVEIRA, Sergio de Almeida; SAVI, Marcelo A. **Os Materiais Inteligentes e suas Aplicações**. Revista Marítima Brasileira, Rio de Janeiro, p. 39-56, dezembro 2013.

PERLINGEIRO, A. R.; PIMENTA, G. M.; SILVA, S. E. da. **Geração de energia através de materiais piezoelétricos**. 61 f. Trabalho de conclusão de curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, Rio de Janeiro, 2016.

PREUMONT, André. **Mechatronics: dynamics of electromechanical and piezoelectric systems**. Brussels, Belgium: Springer, 2006.

PRIYA, S.; INMAN, D.J. **Energy Harvesting Technologies**. Springer Science Business Media, LLC, 2009.

RIORDAN, R. H. S. **Simulated inductors using differential amplifiers**. Electron. Lett., vol. 3, no. 2, pp. 50–51, 1967.

ROCHA, R. T. **Colheita de energia usando dispositivos baseados em materiais piezoelétricos**. 94 f. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado e licenciatura - Física) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2012.

RODRIGUES, Tatiane Lucio. **GERADOR DE ENERGIA PIEZOLÉTRICO**. 2017. 63 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade de Brasília, Gama, 2017.

SANTOS, Vinícius Santana dos. **Análise da colheita de energia em geradores piezoelétricos não lineares**. 2016. 65 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SCHULZ, Sérgio Luiz. **Metodologia para alocação ótima discreta de sensores e atuadores piezoelétricos na simulação do controle de vibrações em estruturas de materiais compósitos laminados**. 2012. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 6ª Edição / Editora: Oxford, ISBN13: 9780195323030, ISBN10: 0195323033, 2009.

SHENCK N; PARADISO J. **Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics**. IEEE Micro 21(3): 30–42, 2001.

SODANO, H. A.; INMAN, D. J.; PARK, G. **Generation and storage of electricity from power harvesting devices**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 16, pp. 67–75, 2005.

STARNER T; PARADISO J. **Human generated power for mobile electronics**. In: Low Power Electronics Design, C. Piguet, ed., CRC Press, vol. 45, 2004.

TELLEGEN, B. D. H. **The gyrator, a new electric network element**. Philips Research Reports, 3, 81-101, April, 1948.

VICENTE, Felipe Gomes. **Avaliação Experimental de Sistema de Colheita de Energia Através de Transdutores Piezelétricos**. 2019. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2019.

WILLIAMS, C. B.; YATES, R. B. **Analysis of a micro-electric generator for Microsystems**. Journal of Sensors and Actuators, v. 52, pp. 8–11, 1996.

ZAMBOLINI-VICENTE, B. G. G. L. **Projeto robusto de Circuitos Shunt para o controle passivo de vibrações de estruturas compostas**. 97f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2014.

ZAMBOLINI-VICENTE, B. G. G. L.; SILVA, L. A., LIMA, A. M. G. **Experimental Evaluation Of Synthetic Inductors Applied In Passive Shunt Circuits To Vibration Mitigation**. Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia. v.2, p.131 - 141, 2016.

ZAMBOLINI-VICENTE, B. G. G. L. **Projeto de um protótipo atenuador de vibrações multimodal self-powered, empregando material piezelétrico e circuito eletrônico**. 109f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.