

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS

CAMPUS ITUMBIARA

COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO



DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR *OPEN-SOURCE* PARA ESTUDOS DINÂMICOS DE DISPOSITIVOS DE COLHEITA DE ENERGIA

MICHELLY SANTOS QUEIROZ

ITUMBIARA
2024

**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: Michelly Santos Queiroz

Matrícula: 20161040100208

Título do Trabalho: Desenvolvimento de um simulador open-source para estudos dinâmicos de dispositivos de colheita de energia.

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ 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 incluídos 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, 27/09/2024.

Local Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

MICHELLY SANTOS QUEIROZ

**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR
OPEN-SOURCE PARA ESTUDOS DINÂMICOS DE
DISPOSITIVOS DE 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 Vicente

Área de conhecimento: Materiais Dielétricos, Piezoelétricos e Ferroelétricos

Linha de pesquisa: Fontes renováveis de energia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Q3d Queiroz, Michelly Santos
Desenvolvimento de um simulador open-source para estudos dinâmicos de dispositivos de colheita de energia. / Michelly Santos Queiroz. -- Itumbiara, 2024.
37p p. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de controle e automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2024.

Orientador: Prof. Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente.

1. Energia - Consumo. 2. Aproveitamento energético. 3. Colaboração acadêmico-industrial. I. Título. II. Queiroz, Michelly Santos. IV. Vicente, Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini V. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

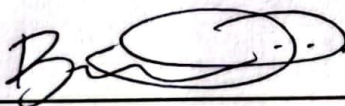
CDD 629.8

MICHELLY SANTOS QUEIROZ

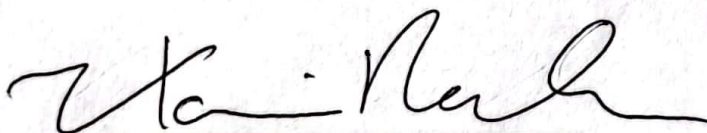
**DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR *OPEN SOURCE* PARA
ESTUDOS DINÂMICOS DE DISPOSITIVOS DE COLHEITA DE
ENERGIA**

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.

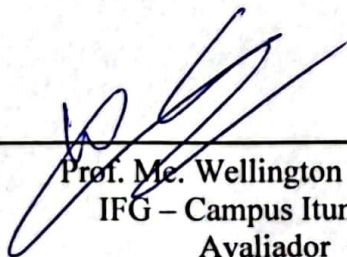
Aprovado em 27 de setembro de 2024.



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



Prof. Dr. Hugo Xavier Rocha
IFG – Campus Itumbiara
Avaliador



Prof. Me. Wellington do Prado
IFG – Campus Itumbiara
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me abençoar até aqui e não me deixar desistir, agradeço a minha família que mesmo sem muito estudo sempre apoiou o meu sonho, aos meus colegas de classe que com o passar do tempo se tornaram meus amigos e que serão para a vida toda e a toda a grade de professores que contribuíram um pouco cada com o conhecimento que tenho hoje.

Agradeço também ao professor Thales Lima Oliveira que iniciamos esse projeto juntos, mas devido a sua transferência para outra cidade não foi possível finalizar e ao professor Bruno Gabriel Gustavo Leonardo Zambolini Vicente, que me acolheu após a saída do Thales e teve muita paciência e carinho em todas as suas orientações.

RESUMO

Foi construído um simulador, aplicando técnicas de solução e modelagem no “estado da arte”, que tem condições para empregar, investigar, planejar e otimizar a utilização de colhedores de energia em regime dinâmico. Tal abordagem se caracteriza por ser uma técnica utilizada principalmente em microssistemas autoalimentados, como, por exemplo, sistemas de sensoria-mento industrial que dispensam a necessidade de fontes externas, utilizando somente o colhedor de energia como sua fonte. Uma vez que a flexibilidade e capacidade de prototipagem fácil são geralmente mais importantes do que a eficiência computacional, o simulador foi elaborado livre e de código aberto *open-source*, facilitando assim a possibilidade de outros colaboradores e estudantes da área possa aprender, utilizar e expandir o projeto.

Palavras-chaves: piezoelétrico, simulador, *open-source*.

ABSTRACT

Therefore, a simulator was built, applying “state of the art” solution and modeling techniques, which is capable of employing, investigating, planning and optimizing the use of energy harvesters in a dynamic regime. This approach is characterized by being a technique used mainly in self-powered microsystems, such as, for example, industrial sensing systems that eliminate the need for external sources, using only the energy harvester as its source. Since flexibility and easy prototyping capabilities are generally more important than computational efficiency, the simulator was designed free and open-source, thus facilitating the possibility for other collaborators and students in the area to learn, use and expand the project.

Keywords: piezoelectric, simulator, open-source.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Gráfico com a média dos preços dos sensores de IoT.	11
Figura 02 - Novo paradigma da instrumentação: sistemas sem baterias e conectados.	13
Figura 03 -Comportamento do efeito piezoelétrico: (a) Efeito direto; (b) Efeito inverso.....	14
Figura 04 - Estrutura cristalina: (a) centrossimétrica; (b) não centrossimétrica.....	15
Figura 05 - (a) Diagrama do gerador piezoelétrico; (b) Circuito equivalente.	16
Figura 06 - Simulador.....	20
Figura 07 - Simulador com os dados do teste 01.....	23
Figura 08 - Curva da corrente teste 01.	24
Figura 09 - Curva da tensão teste 01.	24
Figura 10 - Curva do erro da corrente teste 01.	25
Figura 11 - Curva do erro da tensão teste 01.	26
Figura 12 - Envelope de corrente do simulador teste 01.	27
Figura 13 - Envelope de tensão do simulador teste 01.	27
Figura 14 - Envelope de energia acumulada teste 01.	28
Figura 15 - Simulador com os dados do teste 02.....	29
Figura 16 – Curva da corrente teste 02.....	30
Figura 17 – Curva da tensão teste 02.....	30
Figura 18 - Curva de erro da tensão teste 02.	31
Figura 19 - Curva de erro da corrente teste 02.	31
Figura 20 -Envelope de corrente do simulador teste 02.	32
Figura 21 - Envelope de tensão do simulador teste 02.	33
Figura 22 - Energia acumulada teste 02.	33
Figura 23 - Corrente amostra 01 - teste 01.	41
Figura 24 - Tensão amostra 01 – teste 01.....	41
Figura 25 - Corrente amostra 02 - teste 01.	41
Figura 26 - Tensão amostra 02 - teste 01.....	41
Figura 27 - Corrente amostra 03 - teste 01.	41
Figura 28 - Tensão amostra 03 - teste 01.....	41
Figura 29 - Corrente amostra 04 - teste 01.	41
Figura 30 - Tensão amostra 04 - teste 01.....	41
Figura 31 - Corrente amostra 05 - teste 01.	42
Figura 32 - Tensão amostra 05 - teste 01.....	42
Figura 33 - Corrente amostra 06 - teste 01.	42
Figura 34 - Tensão amostra 06 - teste 01.....	42
Figura 35 - Corrente amostra 07 - teste 01.	42
Figura 36 - Tensão amostra 07 - teste 01.....	42
Figura 37 - Corrente amostra 08 - teste 01.	42
Figura 38 - Tensão amostra 08 - teste 01.....	42
Figura 39 - Corrente amostra 09 - teste 01.	43
Figura 40 - Tensão amostra 09 - teste 01.....	43
Figura 41 - Corrente amostra 10 - teste 01.	43
Figura 42 - Tensão amostra 10 - teste 01.....	43
Figura 43 - Corrente amostra 11 - teste 01.	43
Figura 44 - Tensão amostra 11 - teste 01.....	43
Figura 45 - Corrente amostra 12 - teste 01.	43
Figura 46 - Tensão amostra 12 - teste 01.....	43
Figura 47 - Corrente amostra 13 - teste 01.	44
Figura 48 - Tensão amostra 13 - teste 01.....	44

Figura 49 - Corrente amostra 14 - teste 01.	44
Figura 50 - Tensão amostra 14 - teste 01.....	44
Figura 51 - Corrente amostra 15 - teste 01.	44
Figura 52 - Tensão amostra 15 - teste 01.....	44
Figura 53 - Corrente amostra 16 - teste 01.	44
Figura 54 - Tensão amostra 16 - teste 01.....	44
Figura 55 - Corrente amostra 17 - teste 01.	45
Figura 56 - Tensão amostra 17 - teste 01.....	45
Figura 57 - Corrente amostra 18 - teste 01.	45
Figura 58 - Tensão amostra 18 - teste 01.....	45
Figura 59 - Corrente amostra 19 - teste 01.	45
Figura 60 - Tensão amostra 19 - teste 01.....	45
Figura 61 - Corrente amostra 20 - teste 01.	45
Figura 62 - Tensão amostra 20 - teste 01.....	45
Figura 63 - Corrente amostra 01 - teste 02.	46
Figura 64 - Tensão amostra 01 - teste 02.....	46
Figura 65 - Corrente amostra 02 - teste 02.	46
Figura 66 - Tensão amostra 02 - teste 02.....	46
Figura 67 - Corrente amostra 03 - teste 02.	46
Figura 68 - Tensão amostra 03 - teste 02.....	46
Figura 69 - Corrente amostra 04 - teste 02.	46
Figura 70 - Tensão amostra 04 - teste 02.....	46
Figura 71 - Corrente amostra 05 - teste 02.	47
Figura 72 - Tensão amostra 05 - teste 02.....	47
Figura 73 - Corrente amostra 06 - teste 02.	47
Figura 74 - Tensão amostra 06 - teste 02.....	47
Figura 75 - Corrente amostra 07 - teste 02.	47
Figura 76 - Tensão amostra 07 - teste 02.....	47
Figura 77 - Corrente amostra 08 - teste 02.	47
Figura 78 - Tensão amostra 08 - teste 02.....	47
Figura 79 - Corrente amostra 09 - teste 02.	48
Figura 80 - Tensão amostra 09 - teste 02.....	48
Figura 81 - Corrente amostra 10 - teste 02.	48
Figura 82 - Tensão amostra 10 - teste 02.....	48
Figura 83 - Corrente amostra 11 - teste 02.	48
Figura 84 - Tensão amostra 11 - teste 02.....	48
Figura 85 - Corrente amostra 12 - teste 02.	48
Figura 86 - Tensão amostra 12 - teste 02.....	48
Figura 87 - Corrente amostra 13 - teste 02.	49
Figura 88 - Tensão amostra 13 - teste 02.....	49
Figura 89 - Corrente amostra 14 - teste 02.	49
Figura 90 - Tensão amostra 14 - teste 02.....	49
Figura 91 - Corrente amostra 15 - teste 02.	49
Figura 92 - Tensão amostra 15 - teste 02.....	49
Figura 93 - Corrente amostra 16 - teste 02.	49
Figura 94 - Tensão amostra 16 - teste 02.....	49
Figura 95 - Corrente amostra 17 - teste 02.	50
Figura 96 - Tensão amostra 17 - teste 02.....	50
Figura 97 - Corrente amostra 18 - teste 02.	50
Figura 98 - Tensão amostra 18 - teste 02.....	50

Figura 99 - Corrente amostra 19 - teste 02.	50
Figura 100 - Tensão amostra 19 - teste 02.....	50
Figura 101 - Corrente amostra 20 - teste 02.	50
Figura 102 - Tensão amostra 20 - teste 02.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Dados 01 do simulador.....	21
Tabela 02 - Dados 02 do simulador.....	21

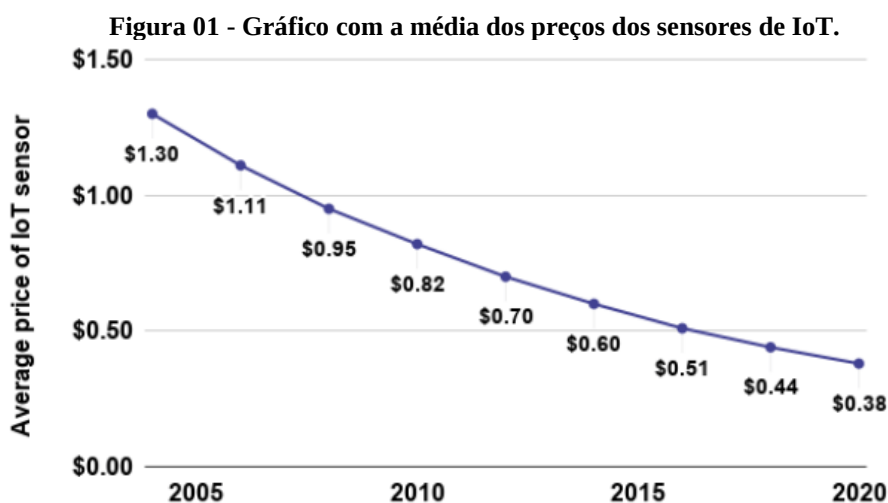
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	Colheita de Energia.....	13
2.2	Piezoelasticidade	14
2.3	Modelagem do sistema	15
3	METODOLOGIA COMPUTACIONAL.....	19
3.1	Visual Studio.....	19
3.2	Simulador.....	19
4	ROTEIRO EXPERIMENTAL	21
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES	23
5.1	Teste 01.....	23
5.2	Teste 02.....	29
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	34
	REFERÊNCIAS	35
	Apêndices	38

1 INTRODUÇÃO

O surgimento da Indústria 4.0 representa um aumento na qualidade dos produtos ou serviços prestados, reduzindo os custos de produção e aumentando os lucros, ao readequar o que já existe de forma a utilizar recursos, mão de obra e índices de defeitos de forma eficiente. Essa nova fase da industrialização tem promovido uma expansão abundante no número de sensores na indústria que são dispositivos fundamentais para a automação industrial, pois realizam a leitura de grandezas como temperatura, pressão, vazão, entre outras, o que possibilita acompanhar e controlar o processo em diversos aspectos. (TELES, 2017)

Com a maior demanda do uso de sensores, houve significativo avanço em relação às suas capacidades tecnológicas, entre eles a queda no consumo de energia bem como a redução no preço dos sensores, como é mostrado na Figura 1, incorrendo no aumento acelerado na utilização dos sensores, especialmente no contexto de Internet das Coisas (ou IoT – *Internet of Things*), conforme explicitado em Pinto (2016).



Fonte: Adaptado de Pinto (2016).

Os sensores são dispositivos que necessitam de energia para sua funcionalidade, no entanto o consumo tem diminuído bastante, permitindo o aproveitamento de fontes de energia de baixa potência, o que tornam viáveis trabalhos e pesquisas que são focados em extrair energia do ambiente em pequenas quantidades (SANCHES, 2015). Nessa linha, Narita & Fox (2017) relatam trabalhos que estudam energia solar, eólica, térmica, radiofrequência, magnética e vibrações mecânicas, entre outros, e, nesse último, de maior ocorrência em ambientes industriais (PERLIGEIRO et al, 2016), gerando grande interesse em aproveitar a energia acarretada por essas vibrações.

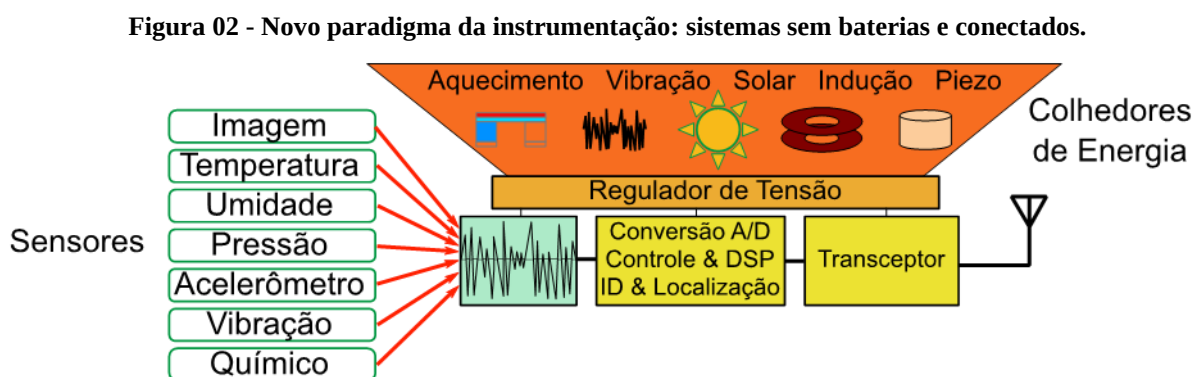
Ao utilizar a energia produzida pelo ambiente, abre-se a possibilidade de aplicação em sensores sem fio, reduzindo a necessidade o tamanho e a vida útil de baterias, também reduz o cabeamento, facilita a manutenção, pois evita-se a parada para troca de baterias e, ainda, os sensores passam a ser alimentados individualmente, evitando uma queda geral em caso de falhas (MORGADO, 2021).

Porém existem dificuldades no desenvolvimento do *hardware*, devido a custos, e por ser uma interface multifísica que envolve sistemas eletromecânicos, ou seja, conceitos e aparatos elétricos e mecânicos simultaneamente. Frente a isso, esse trabalho dedica-se ao desenvolvimento de um *software* para a simulação da dinâmica de uma topologia inicial de dispositivo de colheita de energia, com a possibilidade futura de se modificar qualquer elemento da estrutura e ensaiar até o resultado desejado, facilitando assim o desenvolvimento do *hardware* o mais próximo possível da necessidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Colheita de Energia

A colheita de energia é, sem dúvida, uma técnica muito atraente para uma ampla variedade de microssistemas autoalimentados. Exemplos de tais sistemas são sensores sem fio, implantes biomédicos, dispositivos de monitoramento militar, instrumentação integrada à estrutura, estação meteorológica remota, calculadoras, relógios, fones de ouvido Bluetooth (HARB, 2011). Tendências atuais apontam que a miniaturização e a diminuição no consumo de energia dão origem à popularidade de novos paradigmas da eletrônica, como sensores e nós de rede sem fio (KHALIGH et al, 2009). Tekin et al (2018) afirmam que esse fator leva à possibilidade do aproveitamento de pequenas fontes ambientais de energia na instrumentação industrial por meio de sensores de grandezas elementares, tais como temperatura, pressão, umidade etc., como apresentado na Figura 02.



Fonte: Adaptado de Masuhara (2016).

Diante do exposto, observa-se a necessidade de explorar os aspectos relativos à combinação dos distintos meios de colheita de energia por meio simulações computacionais. Os pacotes de *software* utilizados para análise de sistemas colhedores de energia podem ser divididos em dois tipos: programas comerciais e aqueles voltados para a área de pesquisa e educação. Embora os programas comerciais estejam bem estabelecidos no setor e sejam computacionalmente eficientes, eles têm suas deficiências quando se trata de fins educacionais e de pesquisa acadêmica. Isso se deve às enormes dificuldades na alteração do código fonte (quando possível) ou na inserção de novos algoritmos. A flexibilidade e capacidade de prototipagem fácil são geralmente mais importantes do que a eficiência computacional (MILANO, 2005).

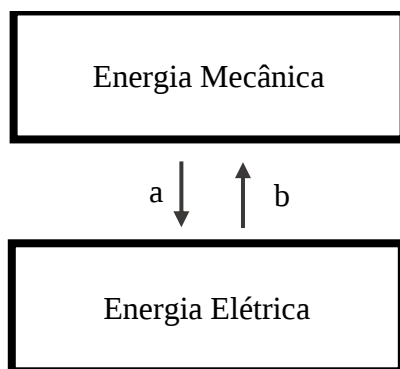
É nessa perspectiva que o presente trabalho encontra sustentação: a criação de um *software* simulador de colhedores de energia é de suma importância para a exploração do trabalho concomitante entre as fontes de colheita de energia e sua integração. Além disso, a flexibilidade proporcionada pelo *software open-source* aplicada na criação do simulador, além de permitir a contribuição por outros programadores em um mesmo projeto, assim como evitar sua obsolescência pelo seu contínuo desenvolvimento, firmando o compromisso com a inovação tecnológica do trabalho.

Como uma implementação de fonte de energia para o simulador, será utilizado um elemento com a geometria mais comum para coletar energia de vibrações: o gerador piezoelétrico baseado em vibração de estrutura em consola, também nominado como viga em balanço (KHALIGH et al, 2009).

2.2 Piezoeletricidade

Em 1880, os irmãos Curie, Pierre e Jacques, realizaram pesquisas pioneiras sobre o fenômeno piezoelétrico. O termo "piezoelétrico" tem origem nas palavras gregas "piezo" (pressionar ou apertar) e "elektron" (âmbar, um material que pode adquirir uma carga elétrica quando esfregado). A conexão entre a pressão mecânica e a geração de eletricidade foi notada ao observar que determinados cristais, como o quartzo, produziam uma pequena carga elétrica quando eram pressionados ou deformados, efeito direto, esses materiais também podem sofrer uma deformação mecânica quando uma carga elétrica é aplicada a eles, efeito inverso. Essa propriedade é conhecida como efeito piezoelétrico, visto esquematizado na Figura 03 (CALLISTER, 2006).

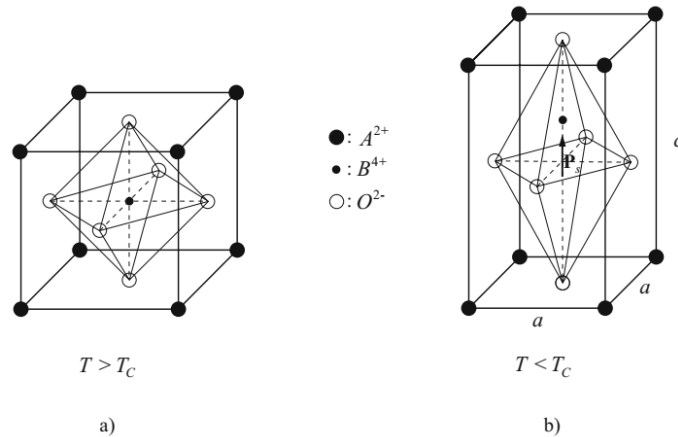
Figura 03 -Comportamento do efeito piezoelétrico: (a) Efeito direto; (b) Efeito inverso



FONTE: Autor.

O efeito piezoelétrico é resultado da resposta dos átomos ou moléculas presentes no material piezoelétrico a uma mudança em sua estrutura cristalina quando submetidos a uma tensão mecânica, na figura 04 é demonstrada quando a estrutura cristalina se torna não centrosimétrica. Essa mudança gera um desequilíbrio nas cargas elétricas, resultando em uma separação de cargas e no surgimento de um campo elétrico.

Figura 04 - Estrutura cristalina: (a) centrossimétrica; (b) não centrossimétrica.



Fonte: Adaptado de Ballas (2007).

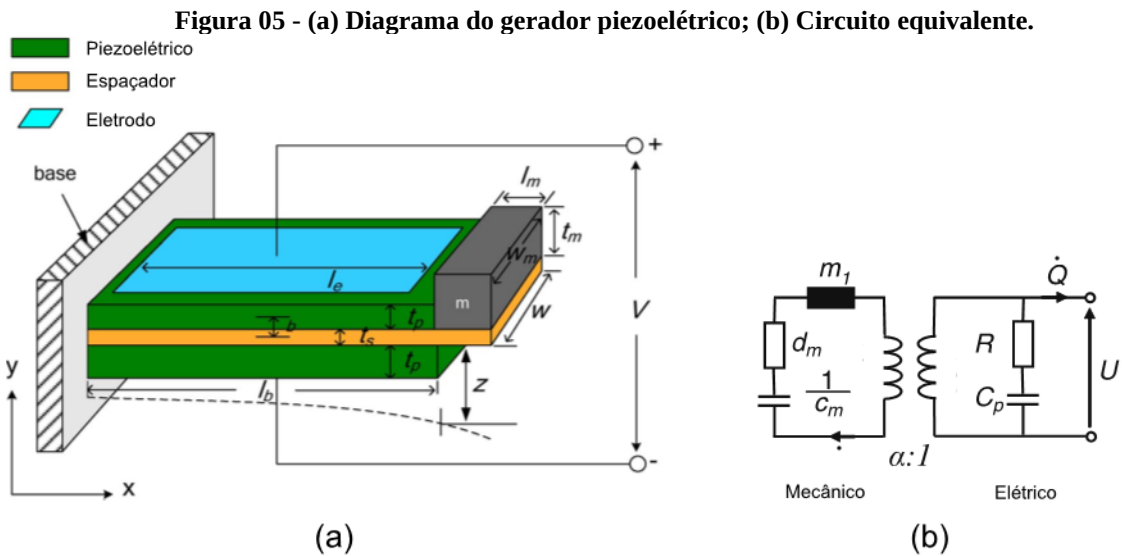
Essa carga elétrica gerada pelo efeito piezoelétrico pode ser coletada e utilizada para diversos fins, durante décadas, os cientistas continuaram a estudar materiais piezoelétricos e a explorar suas aplicações em vários segmentos, por exemplo, em sensores piezoelétricos, a deformação mecânica resultante de uma força aplicada é convertida em uma carga elétrica, permitindo a medição da força ou pressão. Da mesma forma, em atuadores piezoelétricos, uma carga elétrica aplicada ao material resulta em uma deformação mecânica controlada, permitindo a criação de movimentos precisos. O efeito piezoelétrico se tornou um dos princípios mais importantes na conversão entre energia mecânica e energia elétrica (JÚDICE, 2016).

2.3 Modelagem do sistema

Circuitos eletromecânicos equivalentes podem ser usados para modelar a dinâmica de sistemas colhedores de energia, entre eles os piezoelétricos. A modelagem de geradores piezoelétricos é empregada para colheita de energia por meio de vibração e, para isso, são realizadas analogias entre os sistemas elétricos e mecânicos, obtendo um modelo de circuito equivalente simples do piezoelétrico para um sistema de um grau de liberdade. A vantagem desse modelo

é a utilização de métodos baseados em experimentos para a determinação dos parâmetros do modelo (PRIYA & INMAN, 2009).

Uma viga em consola piezoelétrica é a geometria mais comum para coletar energia de vibrações (KHALIGH et al, 2009). Essa topologia pode ter uma estrutura unimorfa, com uma camada piezoelétrica no topo da viga, ou na forma bimorfa com cada camada piezoelétrica nas superfícies superior e inferior da viga, respectivamente. A estrutura do tipo viga em consola fornece baixas frequências ressonantes, reduzidas ainda mais pela adição de uma massa no final da viga (como apresentado na Figura 04a na cor cinza), em uma estrutura de baixo volume e altos níveis de tensão nas camadas piezoelétricas (BEEBY et al, 2006). A Figura 05a apresenta o diagrama do gerador piezoelétrico e a Figura 05b apresenta o seu circuito equivalente (PRIYA & INMAN, 2009 e KHALIGH et al, 2009) a ser implementado no simulador. O modelo do circuito equivalente de tal gerador piezoelétrico (Figura 05b), apresenta resultado analítico verificado por Roundy et al (2003).



Fonte: Adaptado de Khaligh et al (2009) e Priya & Inman (2009).

Os modelos da Figura 04 podem ser descritos como um quadripólo. Se a velocidade $v = dx/dt$ e a força F , bem como a tensão elétrica V e a corrente $I = dQ/dt$ forem escolhidas como variáveis do quadripólo, o comportamento dinâmico pode ser totalmente caracterizado pela matriz de admitância do sistema, como descrito pela Equação (1) (PRIYA & INMAN, 2009).

$$\begin{bmatrix} \dot{Q} \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ F \end{bmatrix} \quad (1)$$

Nesse arranjo, Y_{11} é a chamada impedância de entrada de curto-circuito do sistema. Ele descreve a razão entre as amplitudes (complexas) da corrente elétrica e a tensão para vibrações harmônicas do sistema na ausência de uma força mecânica F (condição de curto-circuito para a entrada mecânica, $F = 0$). Já Y_{22} é a impedância de saída mecânica de curto-circuito do sistema. Ela descreve a relação entre as amplitudes (complexas) da força mecânica e a vibração para vibrações harmônicas do sistema na ausência de uma tensão elétrica (condição de curto-circuito para a entrada elétrica, $V = 0$). Em sequência, Y_{12} e Y_{21} descrevem a conversão elétrica e mecânica, respectivamente. A impedância eletromecânica Y_{12} é a razão entre as amplitudes (complexas) da corrente elétrica e a força mecânica sob excitação da força e condições de curto-circuito para a entrada elétrica ($V = 0$). Por conseguinte, a impedância Y_{21} é a razão entre as amplitudes (complexas) da velocidade e da tensão sob excitação da tensão e condições de curto-circuito para a porta mecânica ($F = 0$). As admitâncias Y_{12} e Y_{21} são idênticas. As relações entre as admitâncias e o modelo são apresentados nas Equações (2) a (4).

$$Y_{11} = \frac{\alpha^2}{j\omega m_1 + d_m + \frac{c_m}{j\omega}} + \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C_p}} \quad (2)$$

$$Y_{12} = Y_{21} = \frac{\alpha}{j\omega m_1 + d_m + \frac{c_m}{j\omega}} \quad (3)$$

$$Y_{22} = \frac{1}{j\omega m_1 + d_m + \frac{c_m}{j\omega}} \quad (4)$$

Para resolver as equações diferenciais é necessário um método de integração numérica. Tais métodos são classificados em dois grupos: métodos explícitos e métodos implícitos. Os métodos explícitos, devido à sua formulação, calculam diretamente o estado do sistema em um instante de tempo posterior, enquanto métodos implícitos envolvem estados atuais e posteriores em suas equações, exigindo, portanto, um processo iterativo. Métodos de integração numérica explícitos, como por exemplo o Runge-Kutta de quarta ordem, não podem ser A-estáveis (absolutamente estáveis) e, portanto, normalmente possuem comportamento ruim em problemas com equações diferenciais rígidas, que são equações com a solução exata e^{-ct} , com $c \gg 0$ e $t > 0$, onde o termo ‘c’ decai rapidamente para 0, é chamado de termo transiente da solução, a rigidez é definida por duas ou mais escalas distintas para o termo ‘t’ (LESINHOVSKI; NÓS, 2014). Por outro lado, métodos implícitos podem ser A-estáveis (MILANO, 2010). Um método implícito adequado para solução do comportamento dinâmico de circuitos elétricos é o Trapezoidal Implícito, por possuir as seguintes vantagens:

- É numericamente estável (A-estável) (MILANO, 2010 e ARRILLAGA et al, 2001);
- É bastante rápido (DOMMEL et al, 1972);
- Possui boa precisão (dependendo somente do passo de integração utilizado) (ARRILLAGA et al, 2001).

Tal método foi o implementado no programa para solução das equações diferenciais. Sua formulação é dada pela seguinte expressão:

$$y_{n+1} = y_n + 0,5h(\dot{y}_{n+1} + \dot{y}_n) \quad (5)$$

Em que:

- h Passo de integração $h = t_{n+1} - t_n$
- y_n Valor do estado no passo anterior (instante t_n)
- y_{n+1} Valor do estado no passo atual (instante t_{n+1})
- $\dot{y}_n$ Equação diferencial no passo anterior
- $\dot{y}_{n+1}$ Equação diferencial no passo atual

Nota-se na Equação (5), que o método é implícito devido ao termo $n+1$ aparecer em ambos os lados da equação, por isso é necessário um processo iterativo para sua solução.

3 METODOLOGIA COMPUTACIONAL

3.1 Visual Studio

O Visual Studio é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) criado pela Microsoft para auxiliar os desenvolvedores na criação de *software*. Ele oferece uma série de ferramentas e recursos para desenvolvimento, depuração, teste e implantação de aplicativos. O Visual Studio suporta várias linguagens de programação, plataformas e tecnologias, tornando-o uma escolha popular para desenvolvedores de diferentes domínios (MICROSOFT, 2022).

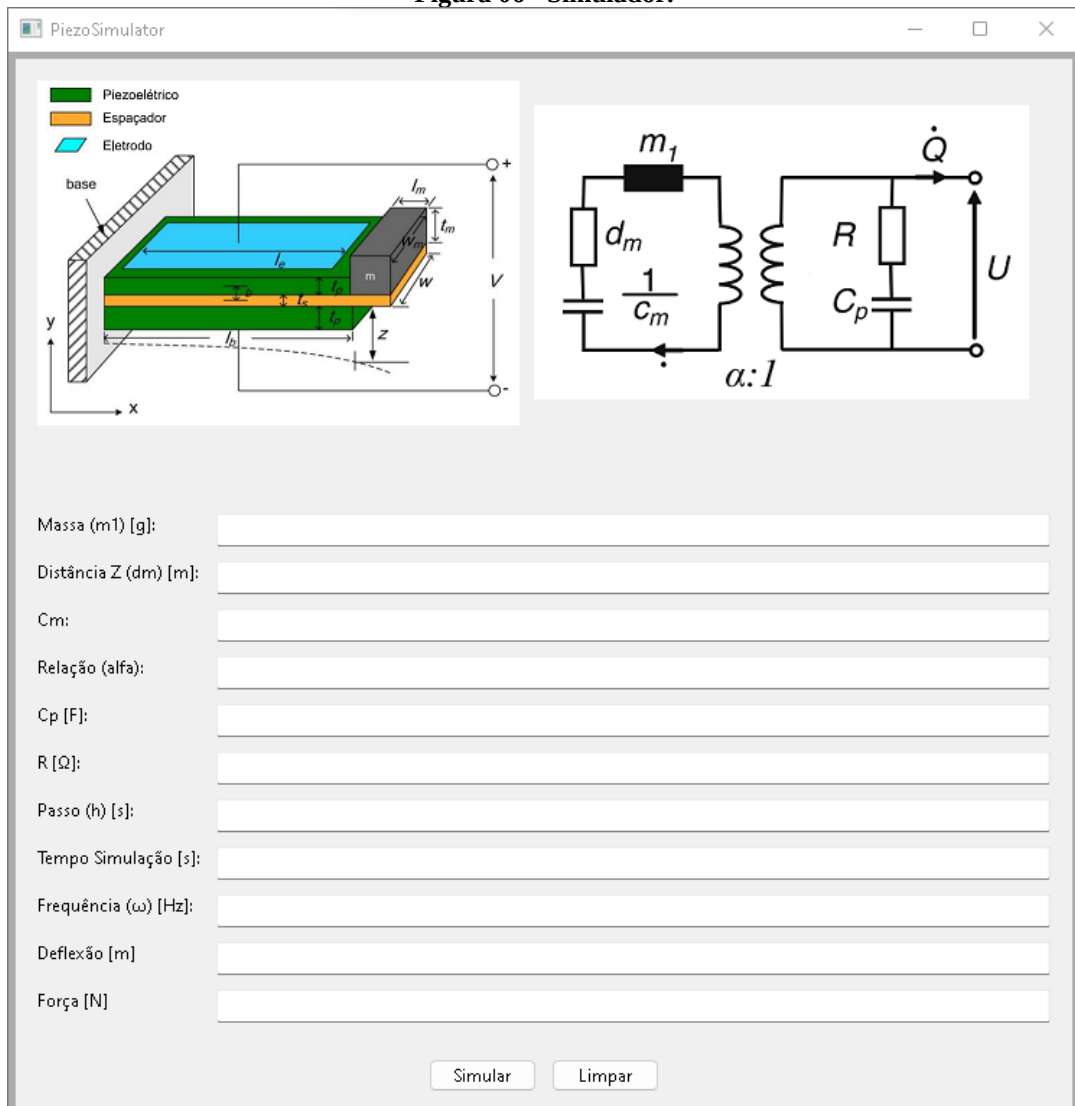
O Visual Studio tem várias edições, incluindo a edição gratuita para projetos de código aberto, estudantes e desenvolvedores individuais, bem como edições pagas com recursos avançados para equipes e empresas. É uma ferramenta fundamental para muitos desenvolvedores e organizações que trabalham em uma variedade de projetos de *software* (MICROSOFT, 2022).

3.2 Simulador

Um simulador é uma ferramenta ou sistema que imita as características e o comportamento de algo real. Simuladores são usados em várias áreas, desde treinamento e educação até pesquisa e entretenimento. Eles permitem que as pessoas interajam com cenários virtuais ou representações de sistemas reais para aprender, praticar ou explorar, sem as implicações do mundo real, são amplamente usados. Eles desempenham um papel crucial no treinamento, pesquisa, desenvolvimento e entretenimento, permitindo que as pessoas experimentem e aprendam em ambientes controlados e seguros (SCARPELINI & PAZIN FILHO, 2023).

Na Figura 6 abaixo é possível visualizar o simulador criado nesse trabalho, contendo o diagrama do piezoelétrico utilizado no projeto e também seu circuito equivalente. Na sequência estão descritos os parâmetros necessários para plotar o gráfico de tensão e corrente gerada.

Figura 06 - Simulador.



Fonte: Autor.

Onde, tem-se os parâmetros:

m_1 : Massa modal do elemento piezoelétrico [g];

d_m : Amortecimento modal do elemento piezoelétrico [m];

C_m : Rigidez modal do elemento piezoelétrico [ad];

α : Fator de transmissão entre circuito elétrico e mecânico [ad];

C_p : Capacitância desviada [F];

R : Perdas ôhmicas no dielétrico [Ω];

Tempo Simulação: O tempo que irá gerar os resultados da simulação [s];

Deflexão: O quanto irá comprimir o piezoelétrico [m];

Força: A Força necessária para essa compressão [N].

4 ROTEIRO EXPERIMENTAL

A seguir, na Tabela1, são apresentados os parâmetros iniciais que foram utilizados para testar o simulador, sendo o primeiro deles oriundo de um exemplo de Priya & Inman (2009), acerca do desenvolvimento da modelagem e avaliação experimental de um sensor eletromecânico construído para uma aplicação em sistema embarcado naval, aqui denominado de Teste 1. O Teste 2 consiste na parametrização de Lallart et al (2011), uma variante do projeto original de Priya & Inman (2009), mas focada em entregar uma opção mais generalista e com energia entregue em maior nível de tensão, necessidade imposta em seu contexto de aplicação.

Tabela 01 - Dados 01 do simulador.

m1 [g]	dm [m]	Cm [ad]	α [ad]	Força [N]	R[Ω]
0,00045504	0,0158930337	1124,059278	0,003759982	2,0000	1000
Passo [s]	ω [Hz]	Deflexão [m]	Tempo [s]	Cp[F]	
1E-2	120	0,005	0,85	7,63882E-8	

Fonte: Adaptado de Pryia (2009).

Tabela 02 - Dados 02 do simulador.

m1 [g]	dm [m]	Cm [ad]	α [ad]	Força [N]	R[Ω]
2,000000	0,001	100E-9	1,000000	5,0000	100
Passo [s]	ω [Hz]	Deflexão [m]	Tempo [s]	Cp[F]	
1E-3	220	0,00005	0,5	100E-9	

Fonte: Adaptado de Lallart et al (2011).

A partir desses dois cenários construiu-se um planejamento experimental contendo 20 repetições para cada teste, os quais calculou-se os envelopes de tensão, corrente e de energia acumulada (VICENTE, 2019), com a finalidade de se avaliar o desempenho do simulador. Além disso, assumindo X uma das variáveis de interesse (Tensão, Corrente ou Energia Acumulada), para o computo dos envelopes calculou-se, ponto-a-ponto no tempo, as médias e desvio-padrão nas Equações (6 e 7) construindo-se posteriormente as curvas superior e inferior na Equação (8), conforme abaixo:

$$X_{Med} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} (X_i) \quad (6)$$

$$\sigma_{pad} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{20} (X_i - X_{med})^2}{20 - 1}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} X_{sup} = X_{med} + \sigma_{pad} \\ X_{inf} = X_{med} - \sigma_{pad} \end{cases} \quad (8)$$

Além disso, o cálculo da energia acumulada é dado pela equação (9), assumindo, nesse trabalho, a título de comparação, resistência $R=1\Omega$ e sendo Δt o intervalo de tempo entre cada valor obtido nas simulações:

$$E_{acum} = \sum_{i=2}^{20} \Delta t \left(\frac{V_i^2}{R} - \frac{V_{i-1}^2}{R} \right) \quad (9)$$

Em complemento, construiu-se e analisou-se o erro quadrático médio (FILHO, M. 2023) ponto-a-ponto tanto das correntes quanto das tensões, com seu cálculo dado pela Equação (10):

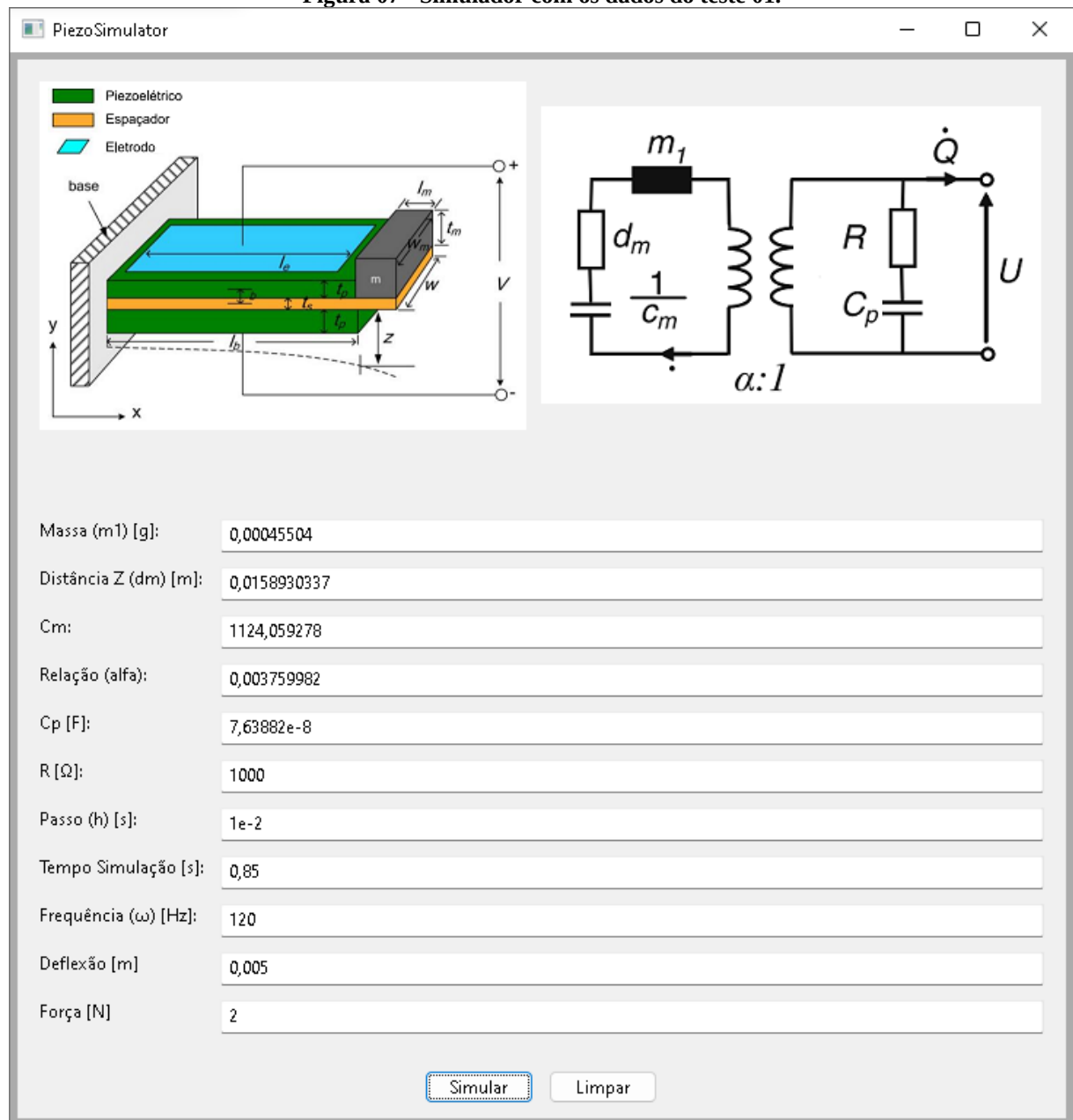
$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{20} (X_i - X_{med})^2}{20}} \quad (10)$$

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISES

5.1 Teste 01

Na imagem da Figura 07, apresenta-se o simulador com os dados do Teste 01:

Figura 07 - Simulador com os dados do teste 01.

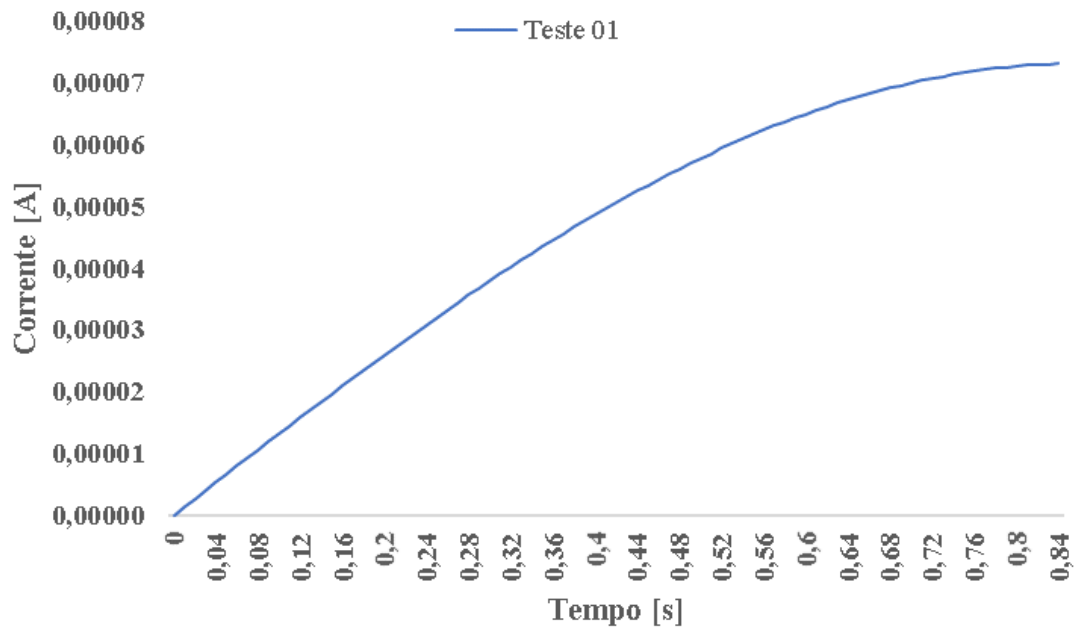


Fonte: Autor.

Nas Figuras 08 e 09 abaixo estão a reprodução dos dados originais do modelo de Priya & Inman (2009) com os valores de corrente e tensão, conforme o descrito na Tabela 1, e, além

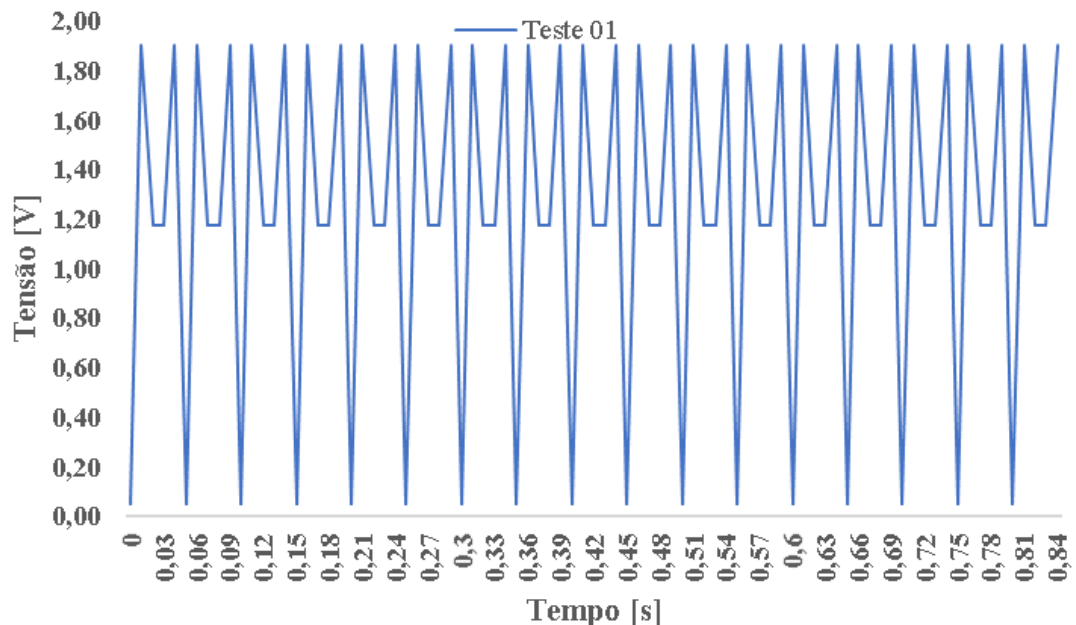
disso, aplicou-se tempo de observação de 0,84s, que corresponde a 42 ciclos de senóide de 50Hz, frequência de operação das micro fontes no padrão europeu, alvo do estudo:

Figura 08 - Curva da corrente teste 01.



Fonte: Adaptado de Priya & Inman (2009).

Figura 09 - Curva da tensão teste 01.

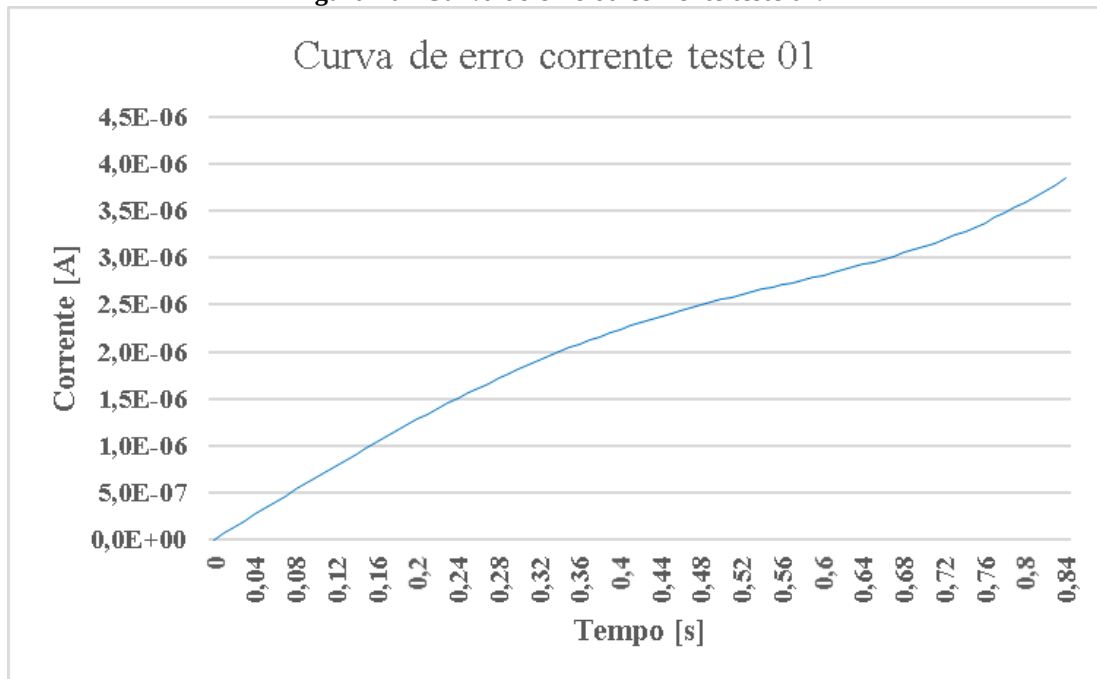


Fonte: Adaptado de Priya & Inman (2009).

Os valores atingidos de corrente e tensão são pequenos e para avaliar a precisão do simulador, no apêndice B, estão expostas as 20 simulações que foram realizadas a partir dos

parâmetros da Tabela 1, possibilitando assim gerar a curva do erro quadrático da corrente, Figura (10), e da tensão, Figura (11).

Figura 10 - Curva do erro da corrente teste 01.

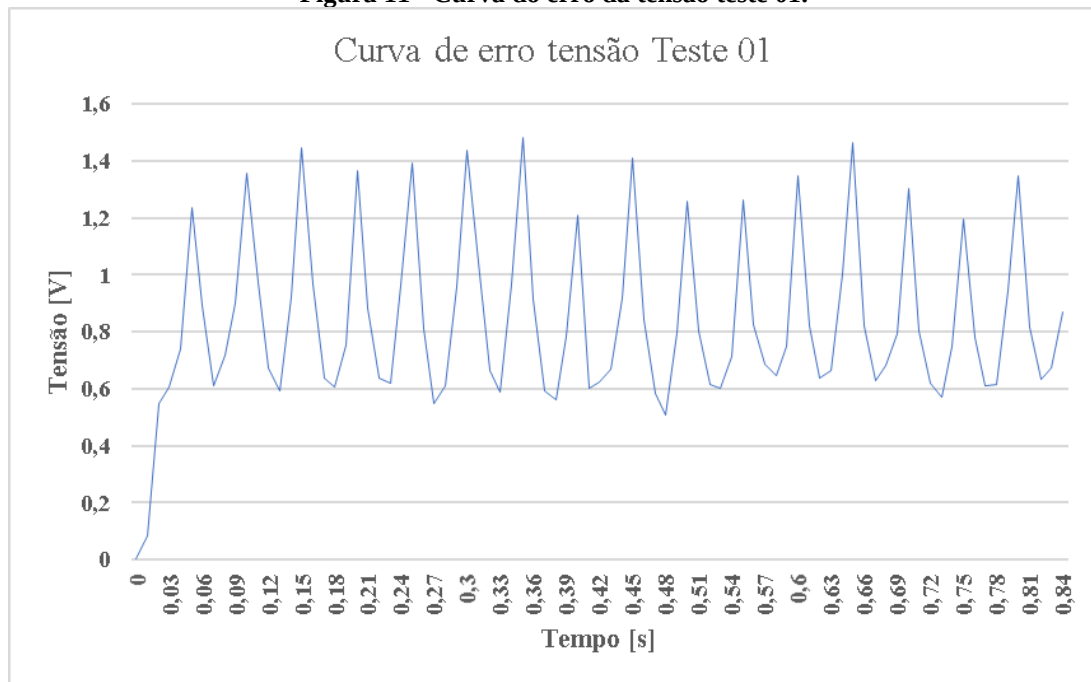


Fonte: Autor.

A curva de erro quadrático médio da corrente, vista na Figura 10, apresenta um bom desempenho na representação da corrente, já que se manteve em nível de 10^{-6} , ou seja, erro em uma parte por milhão no desvio quadrático médio ou um milésimo no desvio médio. Deve-se destacar, no entanto, que o simulador tende a acumular o erro, efeito esse apontado em Kim (2015) e que tem sua origem de natureza numérica, por conta das aproximações envolvendo derivadas trigonométricas, podendo ser mitigada através do cálculo e monitoramento da saturação de uma série de potência para o erro residual, conforme desenvolvido em Siddique et al (2015) e que não foi implementado nesse trabalho por questão complexidade das modificações.

Na curva de erro quadrático médio de tensão, disposta na Figura 11, nota-se um nível bastante elevado de erro, da ordem da própria tensão gerada. Essa situação deriva do mesmo problema endereçado por Siddique et al. (2015), mas, neste caso, reflete em um acúmulo de defasagem na tensão, no qual solução implementada foi uma estratégia de ponderação com meta-heurística de uma série de potências, impraticável no presente trabalho.

Figura 11 - Curva do erro da tensão teste 01.



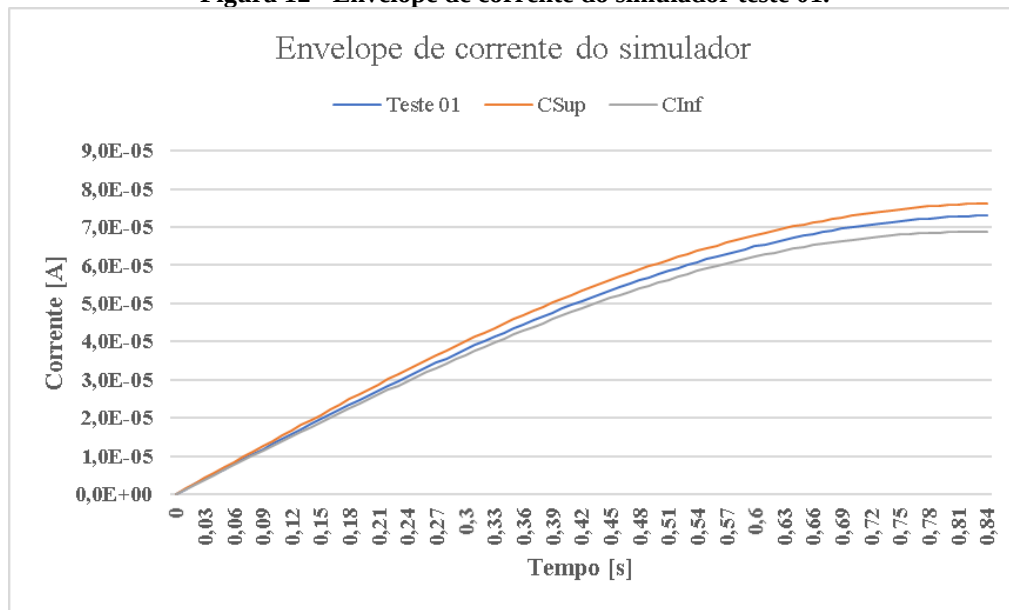
Fonte: Autor.

Ainda que as curvas de erro quadrático médio apresentem divergências de ordem numérica, conforme descreve Lallart et al (2011), um dos principais parâmetros para avaliação da modelagem consiste na construção e análise de curvas de envelope, especialmente as de energia acumulada. O argumento central é que, para sistemas microgeradores de energia via deformação de piezelétricos, é mais importante para modelos computacionais conseguir representar o comportamento físico da energia entregue, já que, por via de regra, a tensão e corrente são normalmente não-lineares e acondicionadas em sistemas retificadores.

Isso posto, as curvas envelopes estão presentes nas Figuras 12, 13 e 14, sendo a primeira de um envelope de corrente, que consegue conter integralmente a grandeza na amplitude, desde o começo da janela simulação. Já na Figura 13, nota-se que o modelo consegue comportar na integralidade os máximos positivos, mas tem restrições nos picos negativos mais agudos, que remetem novamente ao problema relatado e abordado em Kim (2015) e Siddique et al (2015).

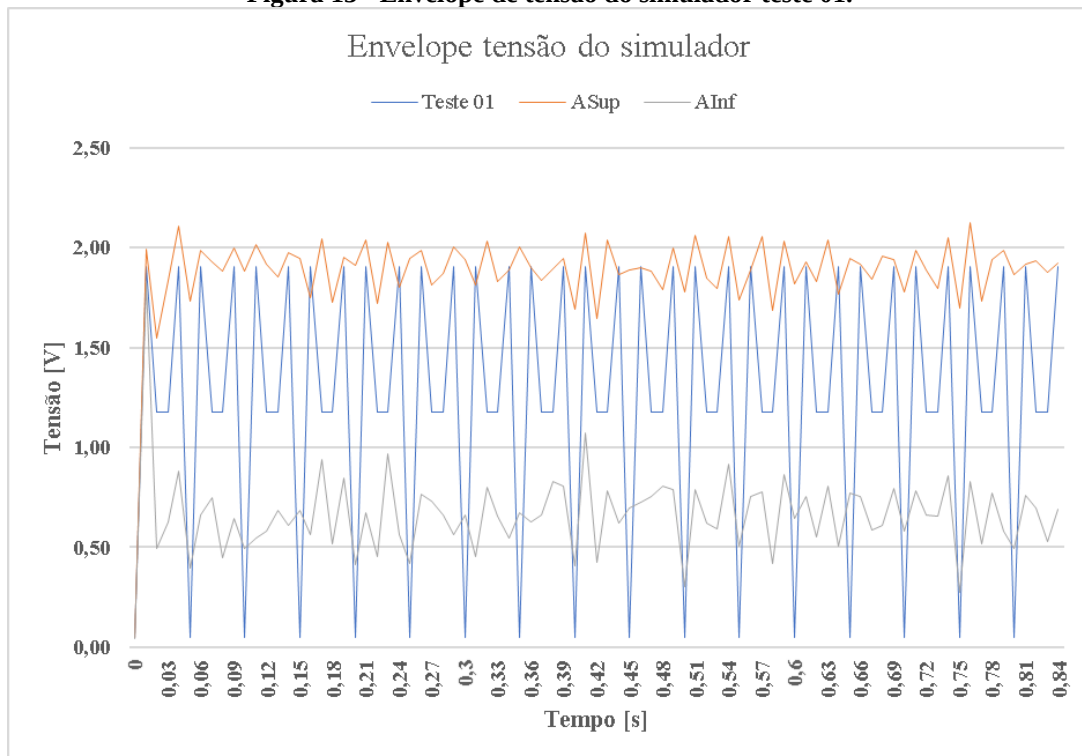
A Figura 14 apresenta o envelope de energia acumulada, segundo o cálculo disposto na Equação 9. Pode-se notar completa cobertura em excursão do simulador, com o valor real (Teste 01) mais próximo da curva superior e curva inferior mais rebaixada. Nesse ponto, fazendo a opção pela média das curvas EEASup e EEAInf tem-se a curva média EEAMed mais conservadora, que se mantém próximo mais abaixo do valor real geral, podendo, assim, ser usada com segurança para o dimensionamento de sistemas de aproveitamento de micro fontes.

Figura 12 - Envelope de corrente do simulador teste 01.



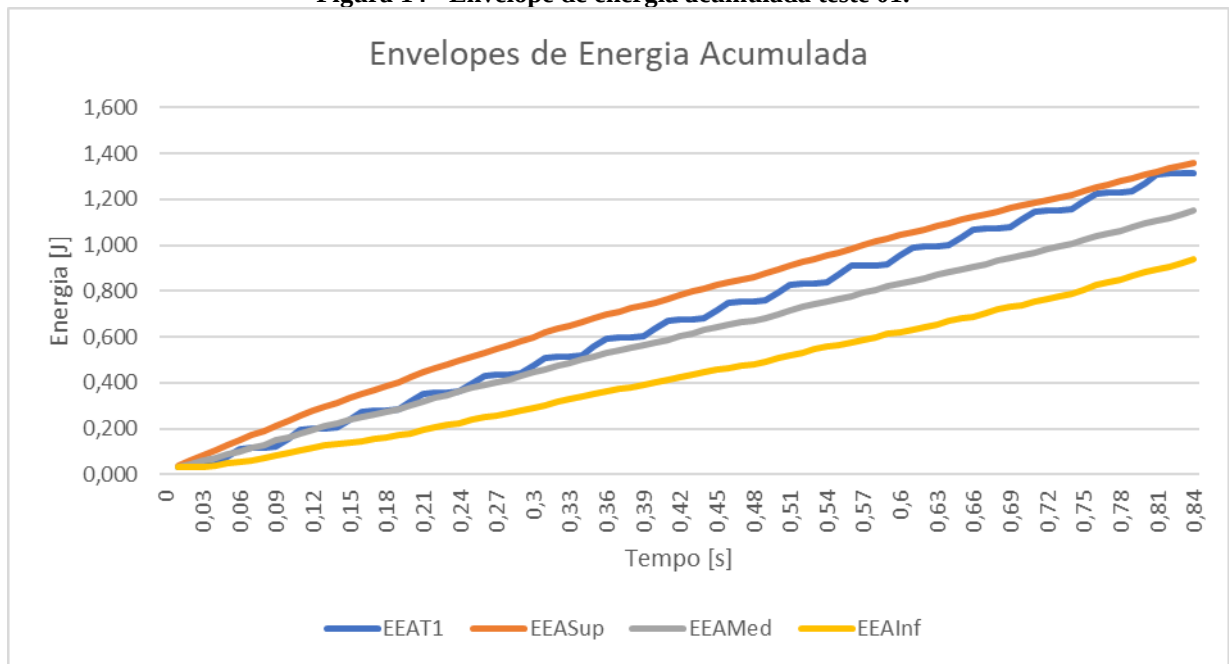
Fonte: Autor.

Figura 13 - Envelope de tensão do simulador teste 01.



Fonte: Autor.

Figura 14 - Envelope de energia acumulada teste 01.



Fonte: Autor.

Além do argumentado, deve-se posicionar que a energia acumulada representa a capacidade de armazenamento do piezelétrico, oriunda de sua capacitância dinâmica interna, conforme do modelo, estabelecendo informações que norteiam o dimensionamento de sistemas que podem funcionar intermitentemente, armazenando e usando a energia de forma ciclada (VICENTE, 2018).

5.2 Teste 02

Na Figura 15 a seguir estão os dados da Tabela 02 na interface de inserção de dados:

Figura 15 - Simulador com os dados do teste 02.

The PiezoSimulator interface displays a 3D model of a piezoelectric actuator on the left, with a legend indicating: Piezoelétrico (green), Espaçador (orange), and Eletrodo (blue). The model shows a base, a piezoelectric layer, a spacer, and an electrode. Dimensions like l_m , t_m , l_e , l_s , l_b , w , and m are labeled. To the right is an equivalent circuit diagram featuring a mass m_1 , a damper d_m , a capacitor $1/C_m$, and a transformer with turns ratio $\alpha:1$. The secondary side includes a resistor R , a capacitor C_p , and an output voltage U with current $\dot{Q}$.

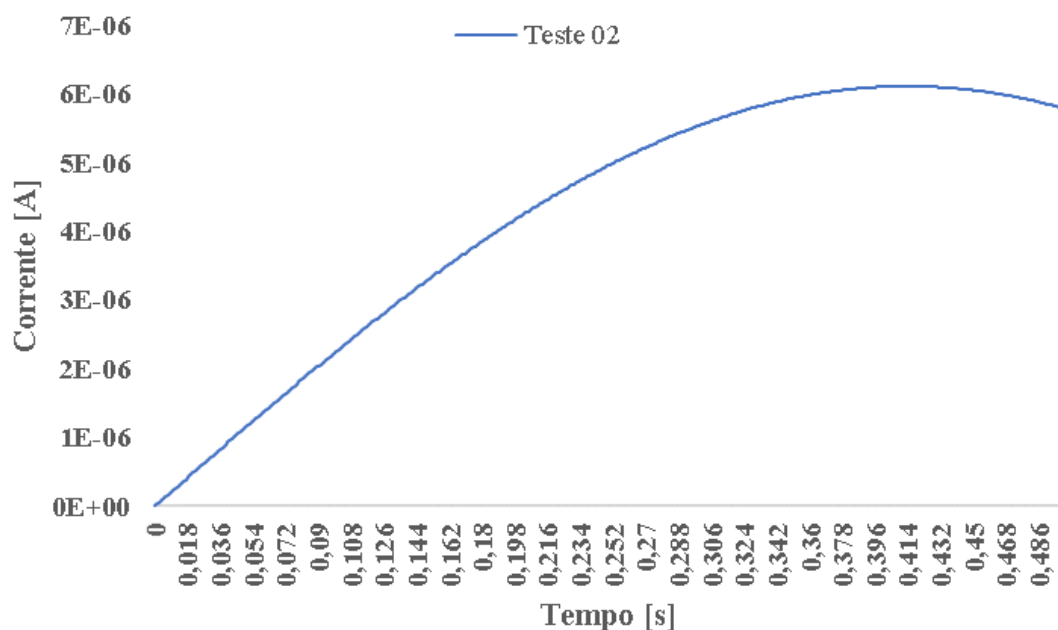
Massa (m_1) [g]:	2
Distância Z (dm) [m]:	0,001
C_m :	100e-9
Relação (alfa):	1
C_p [F]:	5
R [Ω]:	100
Passo (h) [s]:	1e-3
Tempo Simulação [s]:	0,5
Frequência (ω) [Hz]:	220
Deflexão [m]	0,00005
Força [N]	5,0000

Buttons: Simular, Limpar

Fonte: Autor.

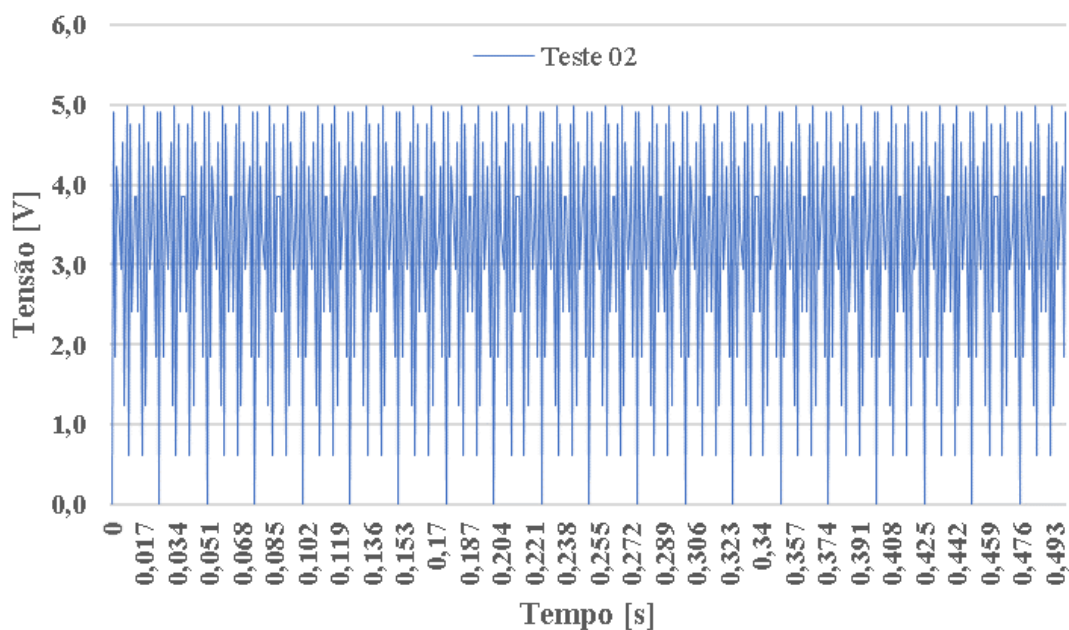
Nas Figuras 16 e 17 abaixo estão a reprodução dos dados originais do modelo de Lallart et al (2011) com os valores de corrente e tensão, conforme o descrito na Tabela 2, e, além disso, aplicou-se passo de simulação reduzido, gerando um tempo de simulação menor, no intuito de reproduzir o trabalho mencionado.

Figura 16 – Curva da corrente teste 02.



Fonte: Adaptado de Lallart (2011).

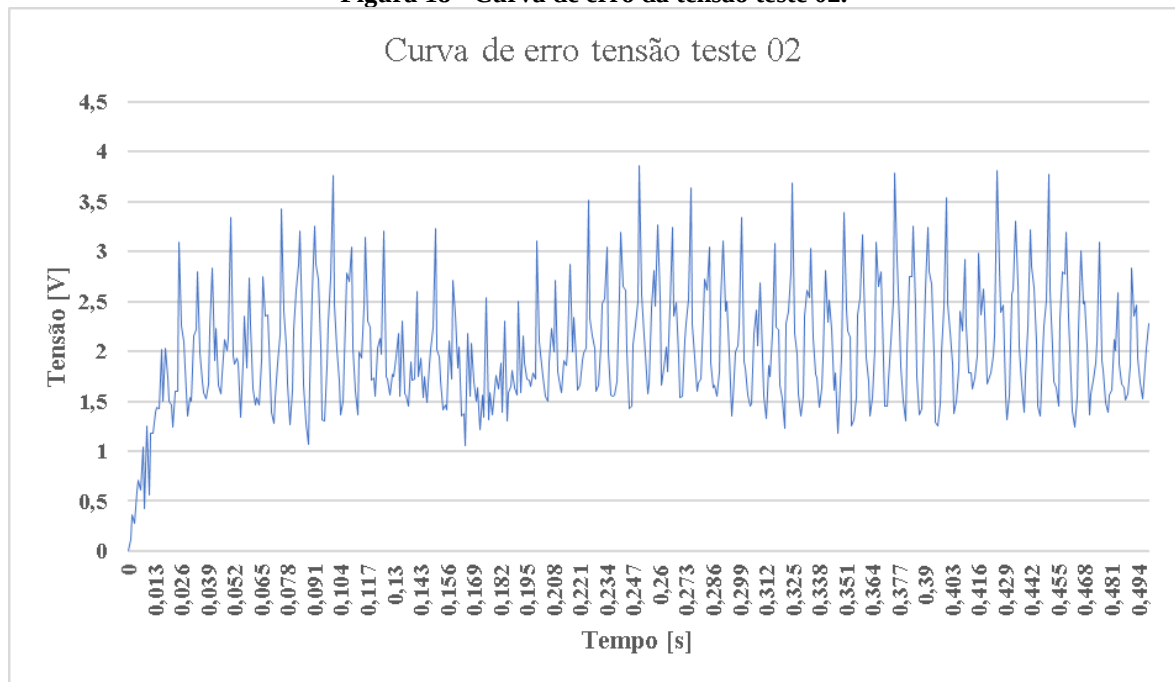
Figura 17 – Curva da tensão teste 02.



Fonte: Adaptado de Lallart (2011).

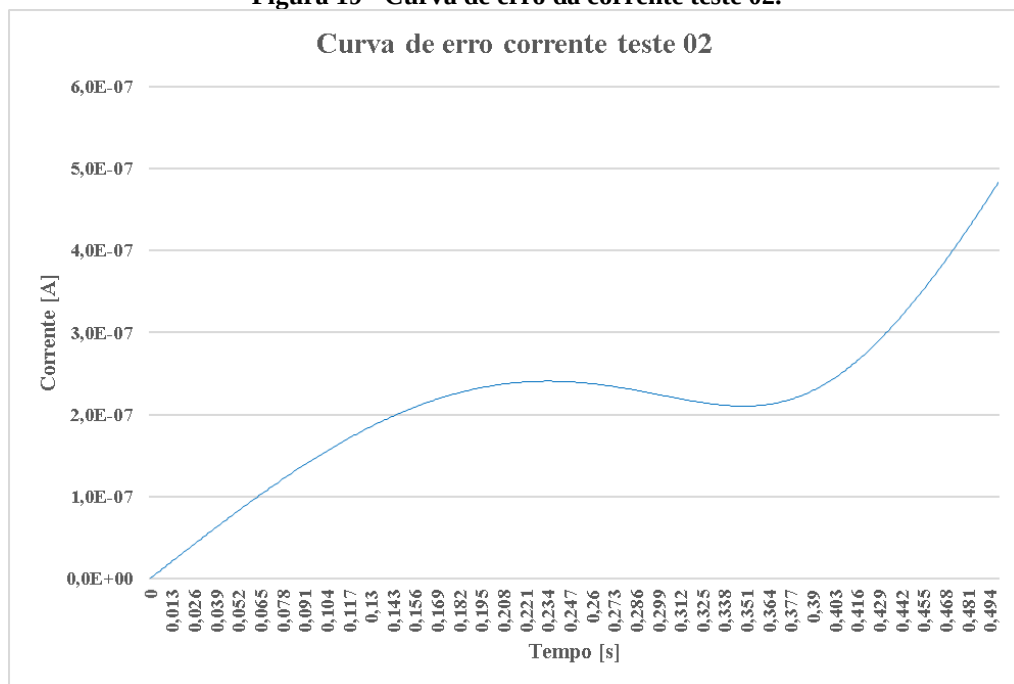
Assim como no Teste 01, no Apêndice B também se encontram as 20 repetições do Teste 02, que possibilitaram o cálculo das curvas do erro quadrático abaixo, nas Figuras 18 e 19.

Figura 18 - Curva de erro da tensão teste 02.



Fonte:

Figura 19 - Curva de erro da corrente teste 02.



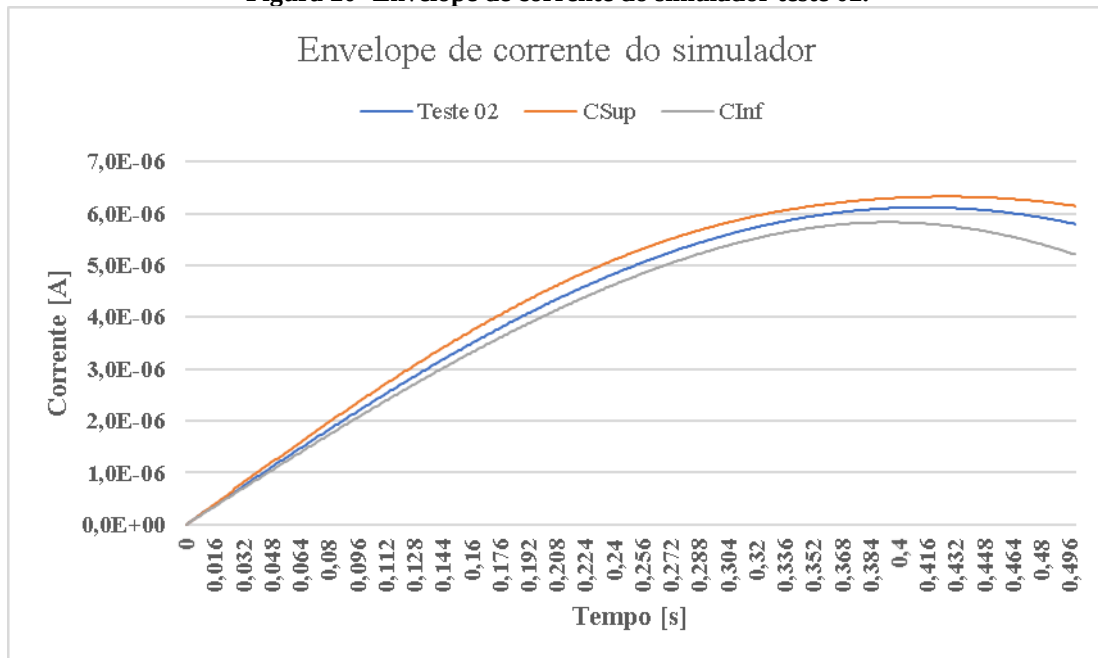
Fonte: Autor.

Observando as curvas de erro quadrático, tem-se novamente o mesmo comportamento exibido no Teste 01, que se origina do mesmo problema numérico já comentado. Todavia, deve-se notar que há mudança importante no comportamento da escala de tensão e corrente, havendo

ainda mais distanciamento na tensão e ainda menos erro quadrático na escala de erro da corrente, agora da ordem 10^{-7} , o que significa desvio médio de aproximadamente de 1/3 milésimo. Esses novos resultados deve-se mostram-se um ponto positivo para o simulador, já que a modelagem de Lallart et al (2011) foi projetada para entregar energia no mesmo total, mas com maior nível de tensão do que corrente em relação a Priya & Inman (2009), fim de se favorecer esquemas eletrônicos específicos relatados pelo autor.

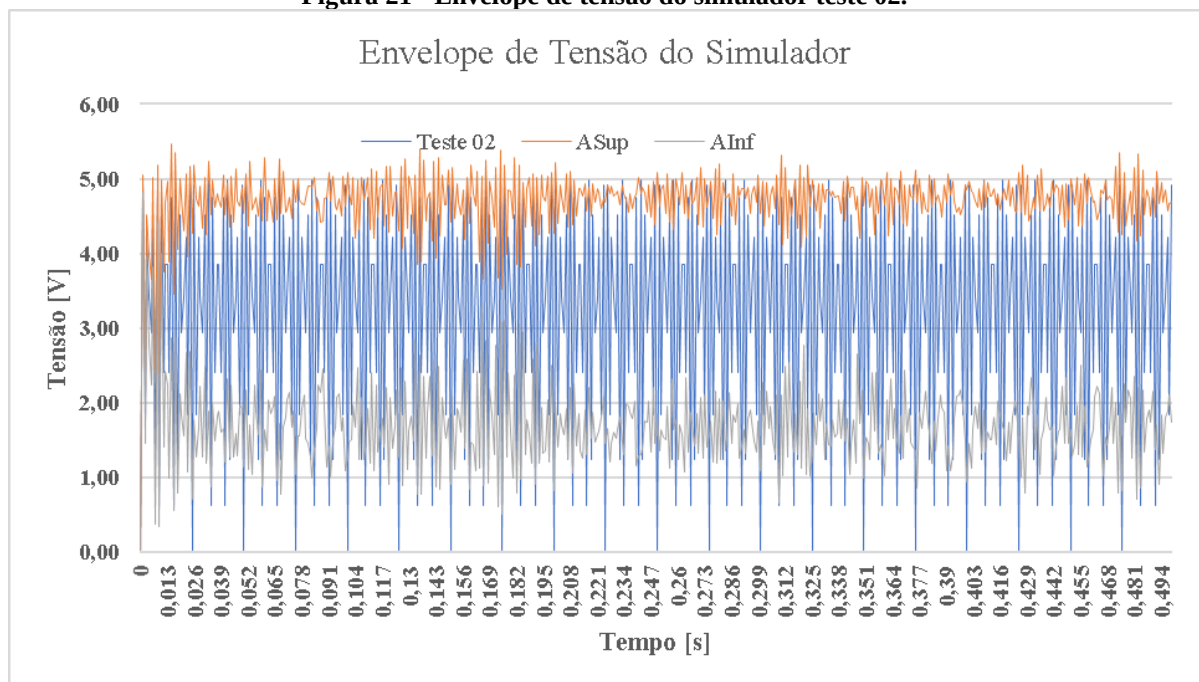
Pode ser observado nas próximas imagens, Figuras 20 e 21, que os máximos e mínimos apresentaram resposta semelhantes ao caso anterior, a diferença é a quantidade de dados em cada curva, devido ao passo como explicado anteriormente. Em específico, observa-se que o envelopamento da corrente na Figura 20 apresenta grande estreitamento em quase todo tempo de simulação, com abertura mais acentuada na parte final, o que pode ser resultado de mudança muito grande na defasagem, esbarrando, portanto, na condição limitada do computo numérico, conforme investigado anteriormente. Já o envelopamento de tensão segue o verificado no Teste 01, com melhor enquadramento do valor superior em relação ao inferior, mas agora em nível de tensão superior.

Figura 20 -Envelope de corrente do simulador teste 02.



Fonte: Autor.

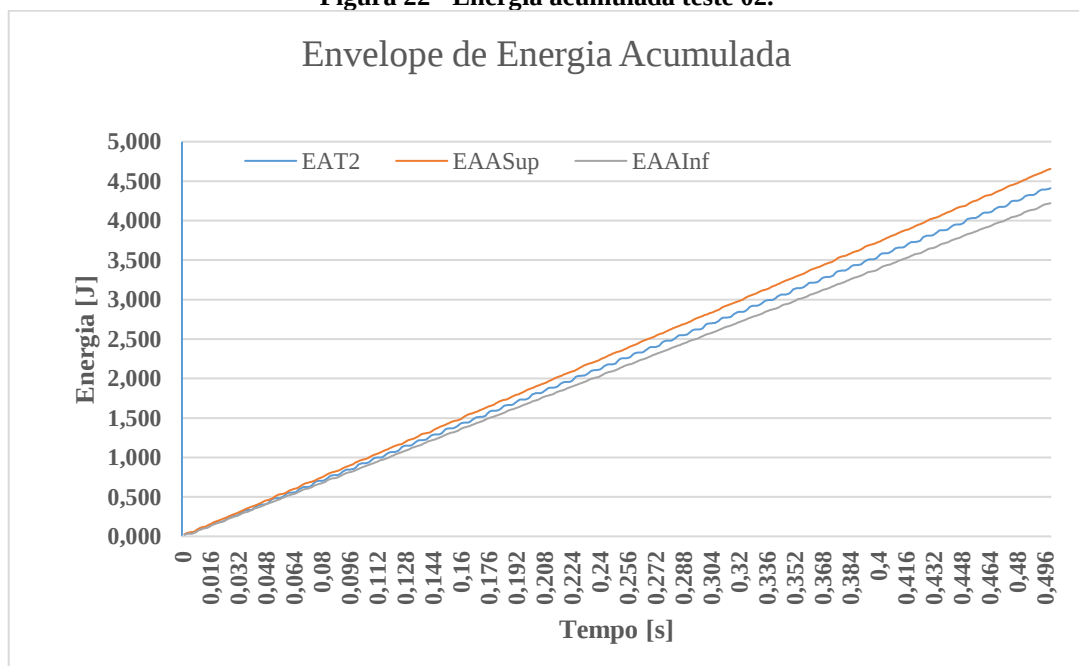
Figura 21 - Envelope de tensão do simulador teste 02.



Fonte: Autor.

No que se refere à energia acumulada, apresentada na Figura 22, observa-se enovelamento muito bem ajustado da energia acumulada original, demonstrando, assim, importante capacidade do simulador em representar bem a energia extraída. Uma vez que o ajuste de Lallart et al (2011) é mais generalista pode-se, ainda, inferir que o modelo favorece esse tipo de projeto.

Figura 22 - Energia acumulada teste 02.



Fonte: Autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

É primordial para o meio ambiente encontrar novas fontes renováveis de energia e estudar os efeitos gerados nessas novas fontes é extremamente importante, sendo assim no simulador construído, tem-se a possibilidade de analisar os resultados dos colhedores de energia, conhecimentos esses cruciais aos sistemas que irão ser montados, facilitando assim o estudo e a otimização do tema em questão.

O *software* foi construído de uma maneira intuitiva e com isso facilitará o uso de estudantes que estão iniciando o aprendizado. Além disso, o fato de o simulador ser *open-source* permite o prosseguimento nessa linha de pesquisa por outros pesquisadores da área.

Por ser um simulador de um problema multifísico, o sistema é passível a erros numérico-computacionais, porém, como pode ser visto no decorrer do trabalho, alguns erros até são mapeados e mitigáveis, ainda que exijam esforço acadêmico de ordem pós-graduação. Apesar desse ponto, o simulador foi capaz de reproduzir aspectos importantes de trabalhos de referência da área, o que o posiciona como bom candidato a ferramenta inicial para projeto de sistemas de microgeração. Em específico, a natureza não-linear das energias vibracionais envolvidas, tipicamente intermitentes e diversas fontes possíveis, tais como em máquinas elétricas rotativas e lineares, equipamentos de pressurização e fluidodinâmica apresenta grandes desafios, e, nesse projeto, significou a dificuldade para se encontrar mais de um trabalho para testes.

Sobre os resultados analisados, considera-se uma conclusão importante a capacidade do simulador em estabelecer um bom envelope de energia acumulada, que também foi verificado no âmbito da corrente, ainda que as respostas obtidas para as tensões não foram tão ajustadas, como demonstraram as curvas de erro quadrático médio.

A partir da contribuição dada, sugere-se para trabalhos futuros:

- Estruturar trabalhos subsequentes que se dediquem ao esforço de aplicar, em parte ou integralmente, as correções propostas por Siddique et al (2015);
- Aplicar o simulador a novos contextos de aplicação, o que exige renovação na busca acadêmica por referências bibliográficas;
- Adaptar o simulador para bancadas de maior escala e estruturar testes experimentais compatíveis, a fim de buscar maior refinamento do sistema;
- Investigar, do ponto de vista de modelagem, formas para melhor adaptar o simulador para acoplamento de modelos de circuitos eletroeletrônicos para o aproveitamento da energia extraída.

REFERÊNCIAS

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Computer Modelling of Electrical Power Systems**. Wiley & Sons, New York, 2001;

BEEBY, S. P.; TUDOR, M. J.; WHITE, N. M. **Energy harvesting vibration sources for microsystems applications**. *Measurement science and technology*, v. 17, n. 12, p. R175, 2006;

BALLAS, R. G. **Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators: Static and Dynamic Behavior and Aspects of Sensor Integration**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007;

CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. John Wiley & Sons, E.U.A, 5ed., 2006;

DOMMEL, H. W.; SATO, N. **Fast Transient Stability Solutions**. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-91, n. 4, jul 1972, p. 1643-1650.

HARB, Adnan. **Energy harvesting: State-of-the-art**. *Renewable Energy*, v. 36, n. 10, p. 2641-2654, 2011.

FILHO, Mario. **RMSE (Raiz Do Erro Quadrático Médio) Em Machine Learning**. Mario Filho, 2023. Disponível em: < <https://mariofilho.com/rmse-raiz-do-erro-quadratico-medio-em-machine-learning/> > Acesso em: 21 de setembro de 2024.

JUDICE, Hortencia. **Efeito Piezoelétrico**. DDPIZO, 2016. Disponível em: <<https://ddpizo.wordpress.com/2016/04/25/efeito-piezoelétrico/>> Acesso em: 14 de agosto de 2023.

KHALIGH, Alireza; ZENG, Peng; ZHENG, Cong. **Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies—state of the art**. *IEEE transactions on industrial electronics*, v. 57, n. 3, p. 850-860, 2009.

KIM, J. E. et al. **An energy conversion model for cantilevered piezoelectric vibration energy harvesters using only measurable parameters**. *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, v. 2, n. 1, pp. 51–57, 2015.

LALLART, M.; RICHARD, C.; GARBUIO, L.; PETIT, L. & GUYOMAR, D. (2011). **High efficiency, wide load bandwidth piezoelectric energy scavenging by a hybrid nonlinear approach**. *Sensors and Actuators A-physical*, 165, 294-302.

LESINHOVSKI, W; NÓS, R. **Solução Numérica de Equações Diferenciais Rígidas**. *Proceeding Series*, vol. 2 n. 1, 2014. Disponível em: <https://proceedings.sbmec.org.br/sbmec/article/view/323#:~:text=Uma%20equa%C3%A7%C3%A3o%20diferencial%20%C3%A9%20dita,a%20parte%20transiente%20da%20solu%C3%A7%C3%A3o.> > Acesso em: 15 de novembro de 2022.

MASUHARA, T. **Chapter 2: The Future of Low-Power Electronics**. In: *New Vistas in Nanoelectronics*, pg 22-50, 2016. Ed. Springer, ISBN:978-3-319-22092-5.

MICROSOFT. **O que é o Visual Studio?** Microsoft, 2023. Disponível em: < <https://learn.microsoft.com/pt-br/visualstudio/get-started/visual-studio-ide?view=vs-2022> > Acesso em: 24 de setembro de 2023.

MILANO, F. **Power System Modelling and Scripting**. London: Springer, 2010

MILANO, Federico. **An open source power system analysis toolbox**. IEEE Transactions on Power systems, v. 20, n. 3, p. 1199-1206, 2005.

MORGADO, Jorge Manuel Aragão da Silva. **Captação de energia de vibrações**. Universidade de Coimbra, 2021. Disponível em: < <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/98065> > Acesso em: 21 de setembro de 2022.

NARITA, F.; FOX, M. **A review on piezoelectric, magnetostrictive, and magnetoelectric materials and device technologies for energy harvesting applications**. Advanced Engineering Materials, 1700743. DOI: 10.1002/adem.201700743, 2017.

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

PINTO, Gustavo. **Indústria 4.0: dados atualizados sobre o cenário brasileiro**. V2com, 2016. Disponível em: <https://v2com.com/2021/03/10/industria-4-0/> > Acesso em: 21 de maio de 2022.

PRIYA, Shashank; INMAN, Daniel J. (Ed.). **Energy harvesting technologies**. New York: Springer, 2009.

ROUNDY, Shad; WRIGHT, Paul Kenneth; RABAEY, Jan M. **Energy scavenging for wireless sensor networks**. In: Norwell. 2003. p. 45-47.

SANCHES, F. M. **Sistema de geração e armazenamento de energia elétrica utilizando transdutor piezoelétrico na forma pulsada**. 77 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2015.

SCARPELINI, Sandro; PAZIN FILHO, Antonio. **SIMULAÇÃO: DEFINIÇÃO**. Revistas USP, 2007. Disponível em: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj_8bP6-YaDAxVSppUCHXY9BloQFnoECDIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.revistas.usp.br%2Fmrp%2Farticle%2Fdownload%2F312%2F313%2F618&usg=AOvVaw1n4zm2cJQxmLcoykpyPsFe&opi=89978449> Acesso em: 25 de maio de 2023.

SIDDIQUE, A. R. M.; MAHMUD, S.; HEYST, B. V. **A comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms**. School of Engineering, University of Guelph, Ontario, Canada, v. 106, pp. 728–747, 2015.

SOUZA, A. C. et al. **Performance Analysis of the Computational Implementation of a Simplified PV Model and MPPT Algorithm**. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 14, NO. 2, FEB. 2016. p. 792-798.

TEKIN, Nazli; ERDEM, H. Emre; GUNGOR, V. Cagri. **Analyzing lifetime of energy harvesting wireless multimedia sensor nodes in industrial environments**. Computer Standards & Interfaces, v. 58, p. 109-117, 2018.

TELES, Jhonata. **Tudo que você precisa saber sobre a Quarta Revolução Industrial**. Engeteles, 2017. Disponível em: <<https://engeteles.com.br/industria-4-0/>> Acesso em: 21 de maio de 2022.

VICENTE, F. G. **Avaliação experimental de sistema de colheita de energia através de transdutores piezelétricos**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2019.

Apêndices

APÊNDICE A - CÓDIGO DO SIMULADOR

```
#include "MainFrame.h"
#include <wx/msgdlg.h>
#include<complex>
#include<stdio.h>
#include<math.h>
#include <wx/app.h>
#include <wx/event.h>
#include "ChartView.h"
#include "ElementPlotData.h"
#include <wx/image.h>
#include <vector>
```

```
MainFrame::MainFrame(wxWindow* parent)
: MainFrameBase(parent)
{
}
```

```
MainFrame::~MainFrame()
{
}
```

```
void MainFrame::OnbtnSimularClick(wxCommandEvent& event)
{
    double massa = 0, dm = 0, cm = 0, cp = 0, alfa = 0, passo = 0, r = 0, deflexao = 0, freq = 0,
    F = 0, tempsimu = 0;

    m_controlMassa->GetValue().ToDouble(&massa);
    m_controlDm->GetValue().ToDouble(&dm);
    m_controlCm->GetValue().ToDouble(&cm);
    m_controlCp->GetValue().ToDouble(&cp);
    m_controlAlfa->GetValue().ToDouble(&alfa);
    m_controlR->GetValue().ToDouble(&r);
    m_controlPasse->GetValue().ToDouble(&passo);
    m_controlDeflexao->GetValue().ToDouble(&deflexao);
    m_controlFrequencia->GetValue().ToDouble(&freq);
    m_controlF->GetValue().ToDouble(&F);
    m_controlTempSimu->GetValue().ToDouble(&tempsimu);

    if (massa == 0 && dm == 0 && cm == 0 && cp == 0 && alfa == 0 && passo == 0 && r
    == 0 && deflexao == 0 && freq == 0 && F == 0 && tempsimu==0)
    {
        wxMessageBox(wxString::Format("Digite valores diferente de 0 para realizar os cálcu-
        los"));
        m_controlMassa->Clear();
        m_controlDm->Clear();
    }
}
```

```

    m_controlCm->Clear();
    m_controlCp->Clear();
    m_controlAlfa->Clear();
    m_controlR->Clear();
    m_controlPasso->Clear();
    m_controlDeflexao->Clear();
    m_controlFrequencia->Clear();
    m_controlF->Clear();
    m_controlTempSimu->Clear();
}

std::complex<double> j = { 0 , 1 };

// wxMessageBox(wxString::Format("Massa = %.2f \nDm = %.2f \nCm = %.2f \nAlfa =
%.2f \nCp = %.2f \nR = %.2f \nPasso = %.2f \nDeflexão = %.2f ", massa, dm, cm, alfa, cp, r,
passo, deflexao));
std::complex<double> Y11 = ((alfa*alfa) / (j * freq * massa + dm + (cm / j *
freq)))+(1.0/(r+1.0/(j*freq*cp)));
std::complex<double> Y12 = (alfa/(j*freq*massa+dm+ (cm / j * freq)));
std::complex<double> Y22 = (1.0 / (j * freq * massa + dm + (cm / j * freq)));
std::complex<double> Y21 = Y12;
wxMessageBox(wxString::Format("Admitâncias \n\nY11= %.4f + %.4fi\n Y12=Y21=%.4f
+ %.4fi\n Y22= %.4f + %.4fi", std::real(Y11), std::imag(Y11), std::real(Y12),
std::imag(Y12), std::real(Y22), std::imag(Y22)));

std::complex<double> dt(std::complex<double>, double, double, double, std::com-
plex<double>, std::complex<double>, std::complex<double>, std::complex<double>);
double t0 = 0;
std::vector<double> tempo;
std::vector<std::complex<double>> tensaoComplexo;
std::vector<std::complex<double>> t;
std::vector<double> tensaoAbs;
std::vector<double> correnteAbs;
t.push_back(t0);
double sTempo = 0;
int numpassos = static_cast<int>(tempsimu / passo);
for (int i = 0; (i < numpassos); ++i) {
    tempo.emplace_back(sTempo);
    tensaoComplexo.emplace_back((deflexao - F * sin(sTempo * 2* M_PI *freq) * Y22) /
Y21);
    sTempo += passo;

    if (i < numpassos - 1) {
        t.push_back(t[i] + passo * (dt(t[i], deflexao, F, freq, Y11, Y21, Y12, Y22)));
    }
}

for (auto tensao : tensaoComplexo) {
    tensaoAbs.emplace_back(std::abs(tensao));
}

```

```

    for (auto corrente : t) {
        correnteAbs.emplace_back(std::abs(corrente));
    }

    std::vector<ElementPlotData> plotDataList;

    ElementPlotData plotData;
    plotData.SetName(wxT("Piezo"));
    plotData.SetCurveType(ElementPlotData::CurveType::CT_SIMULAR);
    plotData.AddData(tensaoAbs, wxT("Tensao"));
    plotData.AddData(correnteAbs, wxT("Corrente"));
    plotDataList.push_back(plotData);

    ChartView* cView = new ChartView(nullptr, plotDataList, tempo);
    cView->Show();
}

void MainFrame::OnbtnLimparClick(wxCommandEvent& event)
{
    m_controlMassa->Clear();
    m_controlDm->Clear();
    m_controlCm->Clear();
    m_controlCp->Clear();
    m_controlAlfa->Clear();
    m_controlR->Clear();
    m_controlPasso->Clear();
    m_controlDeflexao->Clear();
    m_controlFrequencia->Clear();
    m_controlF->Clear();
    m_controlTempSimu->Clear();
}

std::complex<double> dt(std::complex<double> t, double deflexao, double F, double freq,
std::complex<double> Y11, std::complex<double> Y21, std::complex<double> Y12,
std::complex<double> Y22)

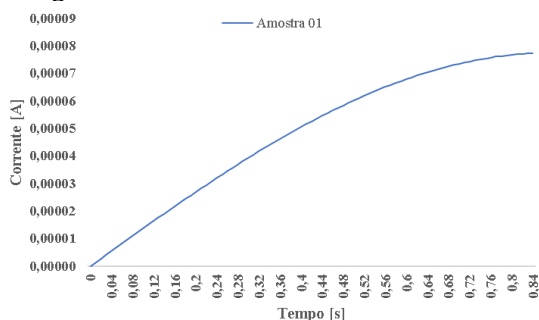
{

    return(((Y11/Y21)*(deflexao-F*sin(2* M_PI *freq*t)*Y22))+(Y12*F*sin(2 * M_PI
*freq*t)));
}

```

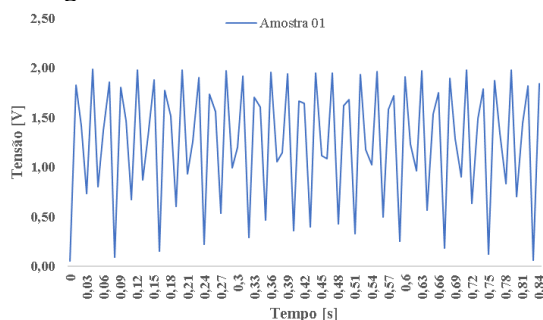
APÊNDICE B - RESPOSTAS OBTIDAS DO SIMULADOR

Figura 23 - Corrente amostra 01 - teste 01.



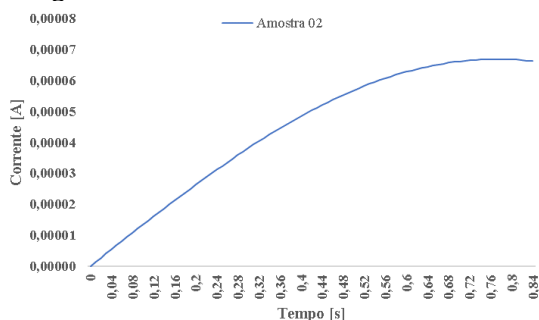
Fonte: Autor.

Figura 24 - Tensão amostra 01 – teste 01.



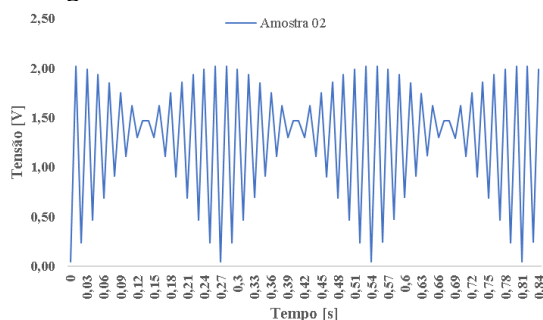
Fonte: Autor.

Figura 25 - Corrente amostra 02 - teste 01.



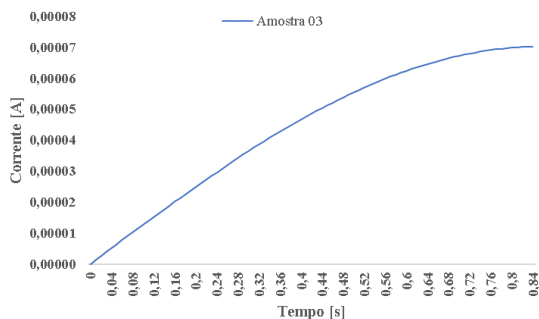
Fonte: Autor.

Figura 26 - Tensão amostra 02 - teste 01.



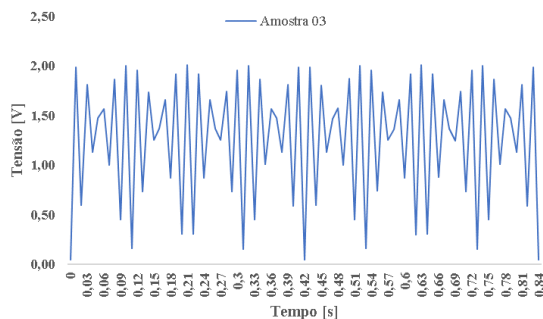
Fonte: Autor.

Figura 27 - Corrente amostra 03 - teste 01.



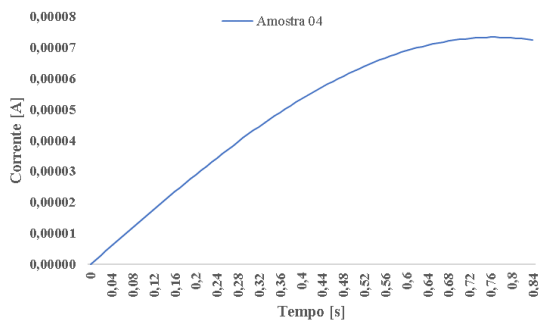
Fonte: Autor.

Figura 28 - Tensão amostra 03 - teste 01.



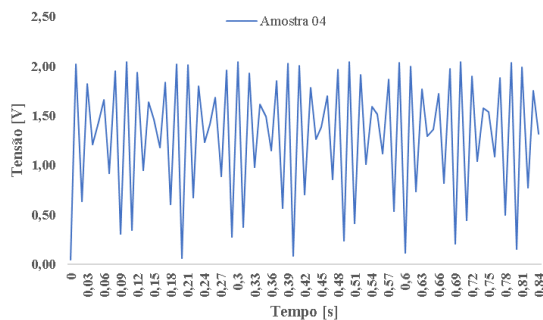
Fonte: Autor.

Figura 29 - Corrente amostra 04 - teste 01.



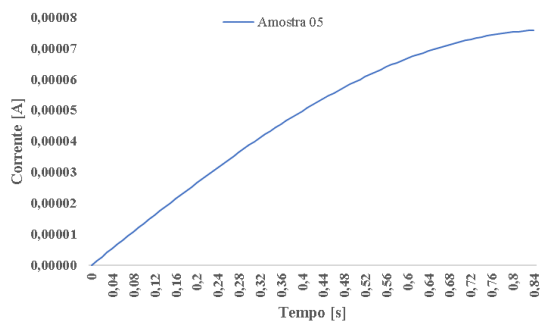
Fonte: Autor.

Figura 30 - Tensão amostra 04 - teste 01.



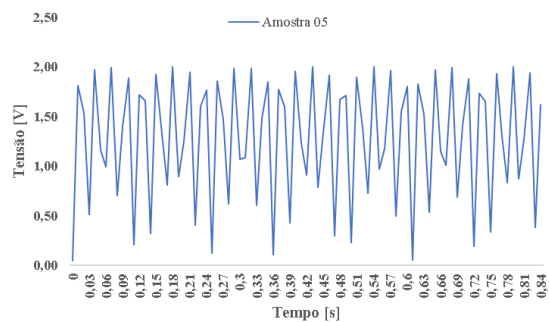
Fonte: Autor.

Figura 31 - Corrente amostra 05 - teste 01.



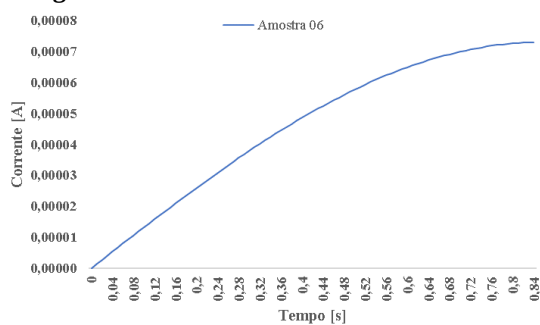
Fonte: Autor.

Figura 32 - Tensão amostra 05 - teste 01.



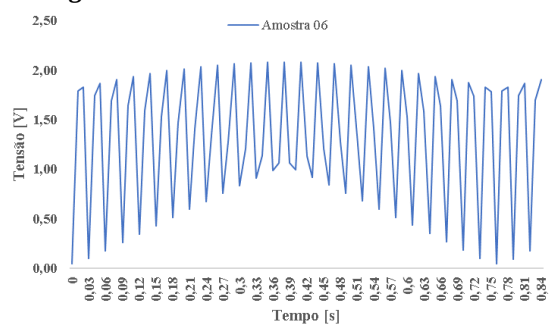
Fonte: Autor.

Figura 33 - Corrente amostra 06 - teste 01.



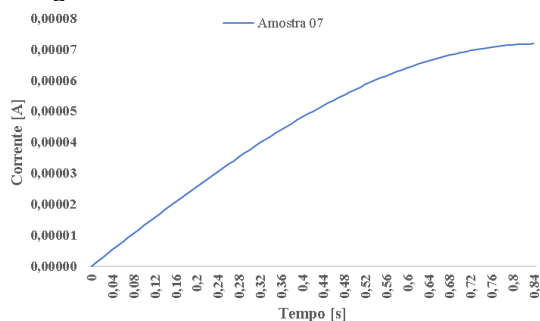
Fonte: Autor.

Figura 34 - Tensão amostra 06 - teste 01.



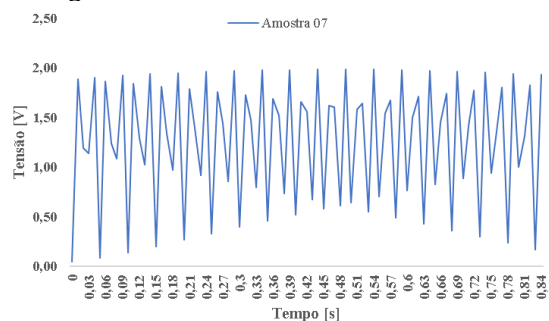
Fonte: Autor.

Figura 35 - Corrente amostra 07 - teste 01.



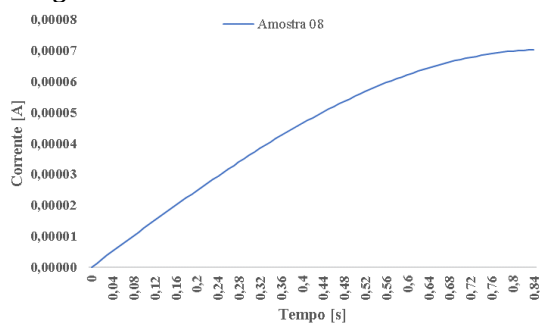
Fonte: Autor.

Figura 36 - Tensão amostra 07 - teste 01.



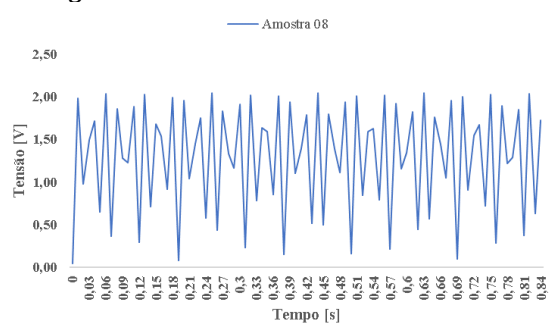
Fonte: Autor.

Figura 37 - Corrente amostra 08 - teste 01.



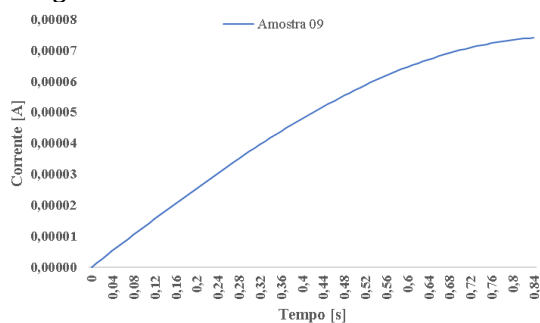
Fonte: Autor.

Figura 38 - Tensão amostra 08 - teste 01.



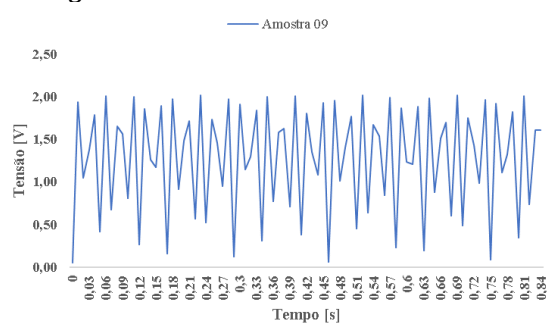
Fonte: Autor.

Figura 39 - Corrente amostra 09 - teste 01.



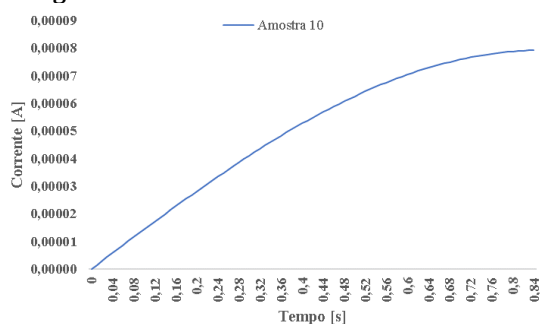
Fonte: Autor.

Figura 40 - Tensão amostra 09 - teste 01.



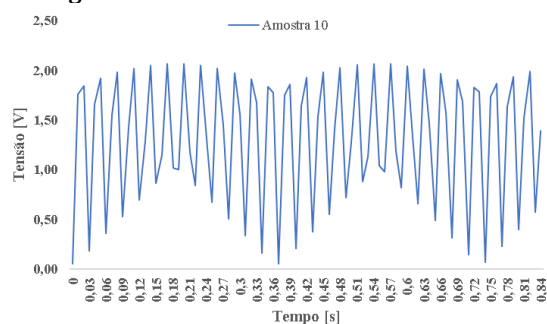
Fonte: Autor.

Figura 41 - Corrente amostra 10 - teste 01.



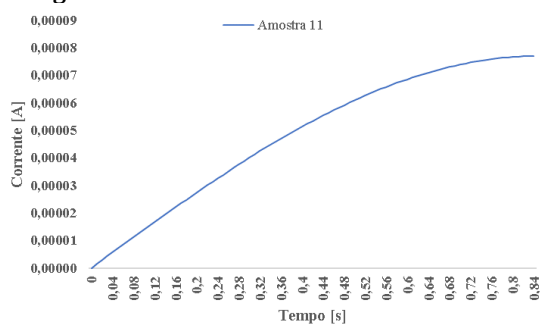
Fonte: Autor.

Figura 42 - Tensão amostra 10 - teste 01.



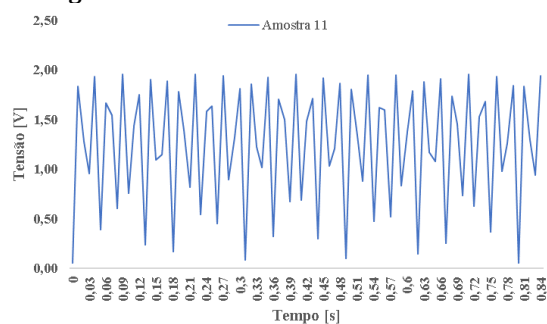
Fonte: Autor.

Figura 43 - Corrente amostra 11 - teste 01.



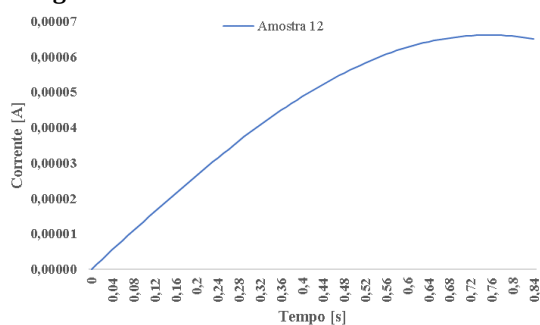
Fonte: Autor.

Figura 44 - Tensão amostra 11 - teste 01.



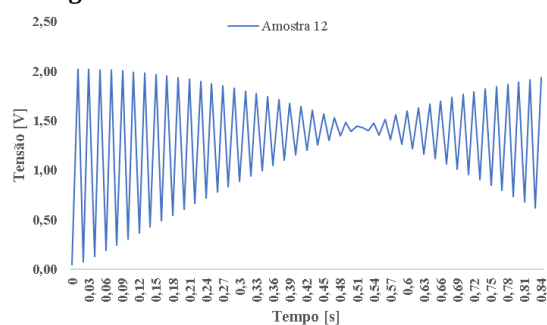
Fonte: Autor.

Figura 45 - Corrente amostra 12 - teste 01.



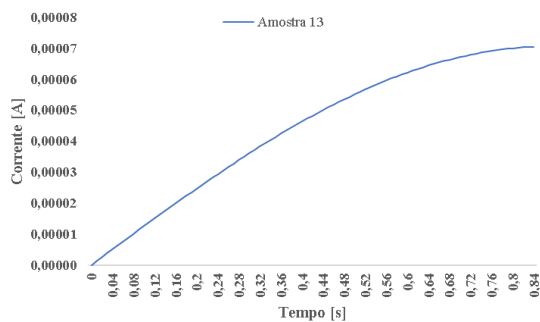
Fonte: Autor.

Figura 46 - Tensão amostra 12 - teste 01.



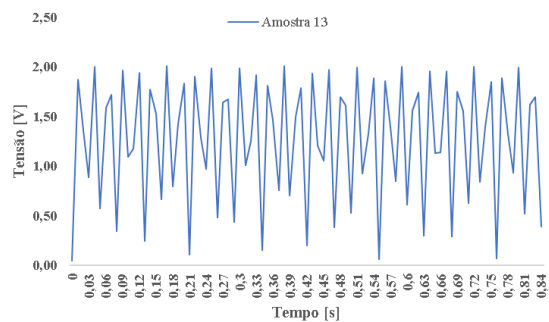
Fonte: Autor.

Figura 47 - Corrente amostra 13 - teste 01.



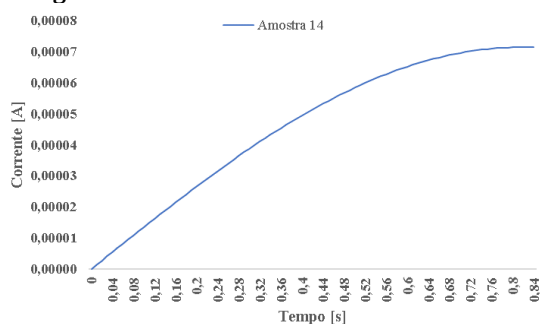
Fonte: Autor.

Figura 48 - Tensão amostra 13 - teste 01.



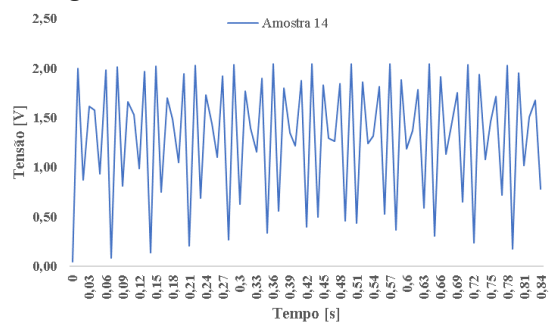
Fonte: Autor.

Figura 49 - Corrente amostra 14 - teste 01.



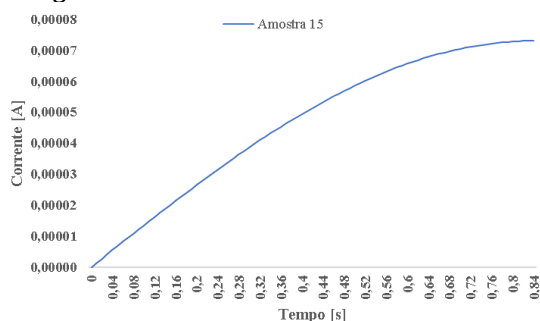
Fonte: Autor.

Figura 50 - Tensão amostra 14 - teste 01.



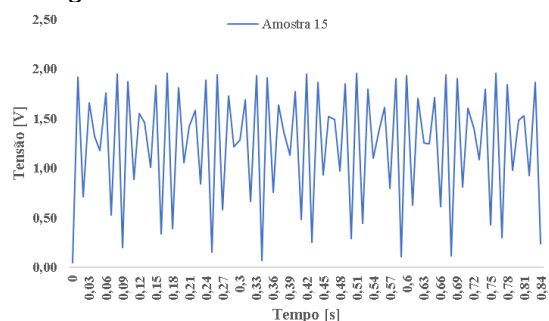
Fonte: Autor.

Figura 51 - Corrente amostra 15 - teste 01.



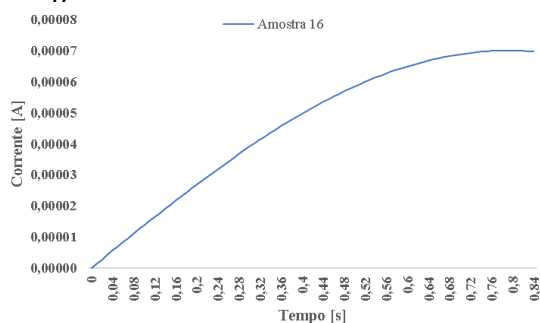
Fonte: Autor.

Figura 52 - Tensão amostra 15 - teste 01.



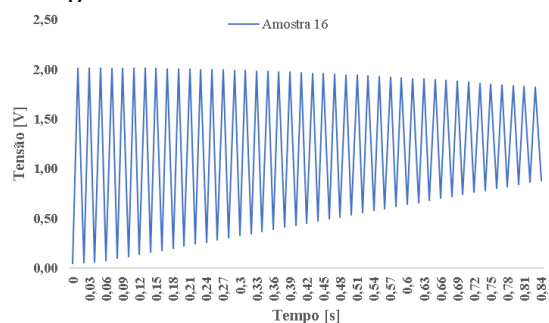
Fonte: Autor.

Figura 53 - Corrente amostra 16 - teste 01.



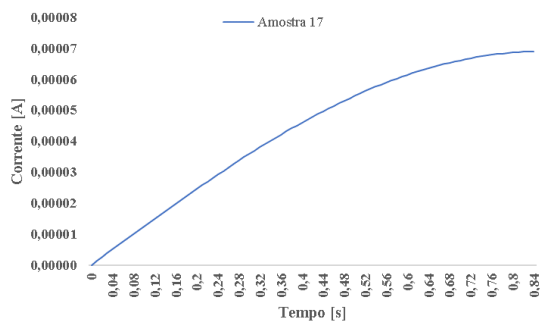
Fonte: Autor.

Figura 54 - Tensão amostra 16 - teste 01.



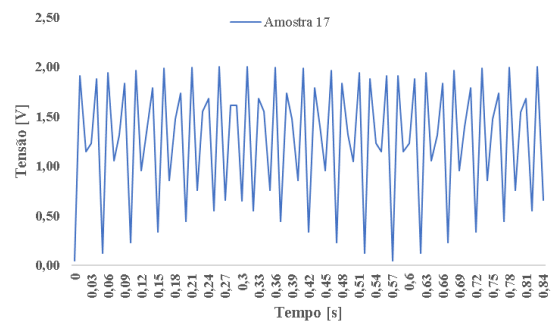
Fonte: Autor.

Figura 55 - Corrente amostra 17 - teste 01.



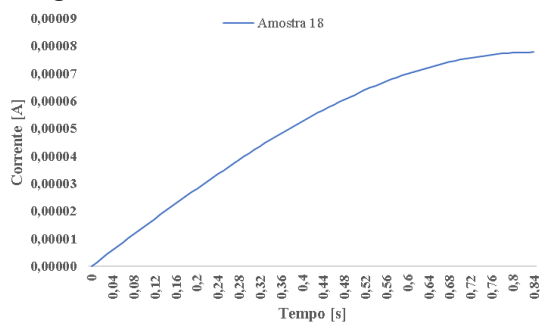
Fonte: Autor.

Figura 56 - Tensão amostra 17 - teste 01.



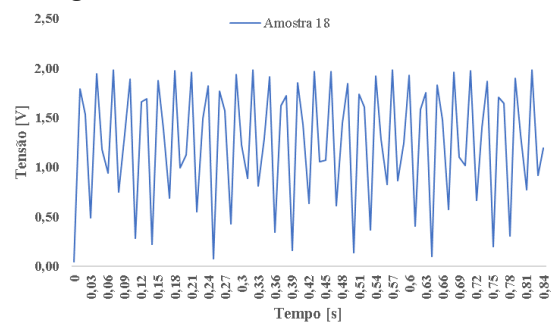
Fonte: Autor.

Figura 57 - Corrente amostra 18 - teste 01.



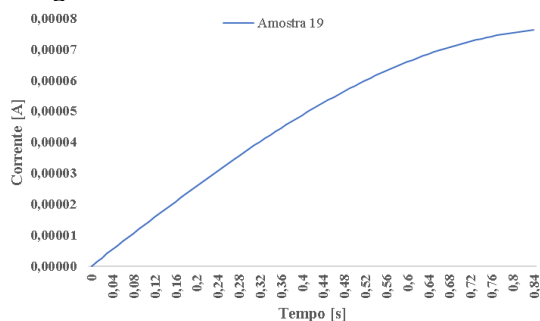
Fonte: Autor.

Figura 58 - Tensão amostra 18 - teste 01.



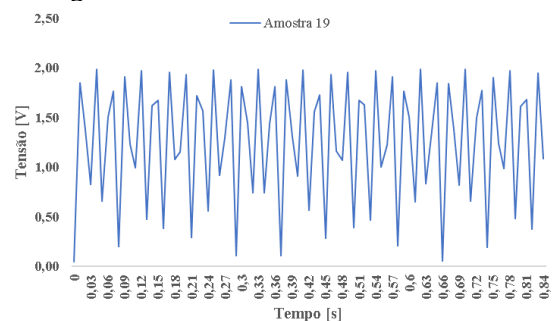
Fonte: Autor.

Figura 59 - Corrente amostra 19 - teste 01.



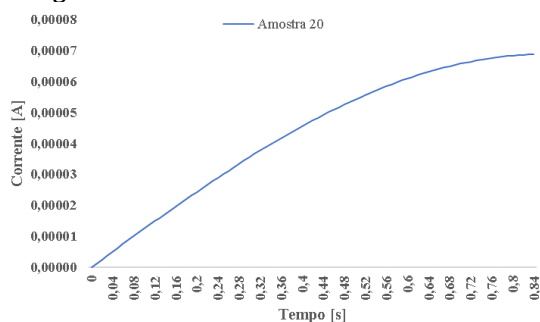
Fonte: Autor.

Figura 60 - Tensão amostra 19 - teste 01.



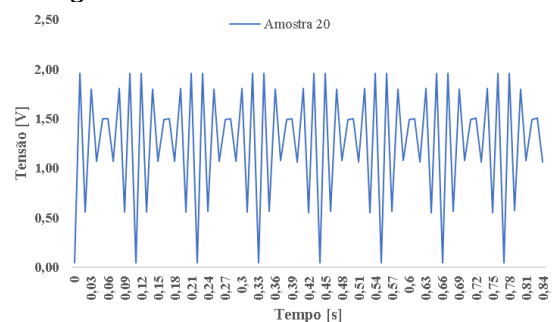
Fonte: Autor.

Figura 61 - Corrente amostra 20 - teste 01.



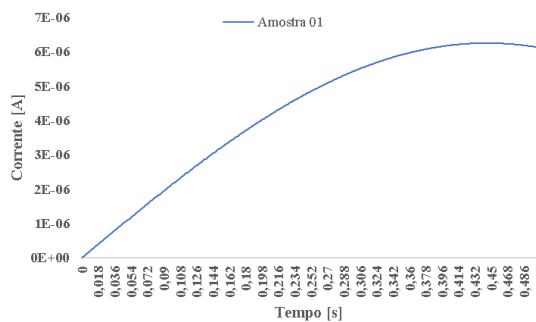
Fonte: Autor.

Figura 62 - Tensão amostra 20 - teste 01.



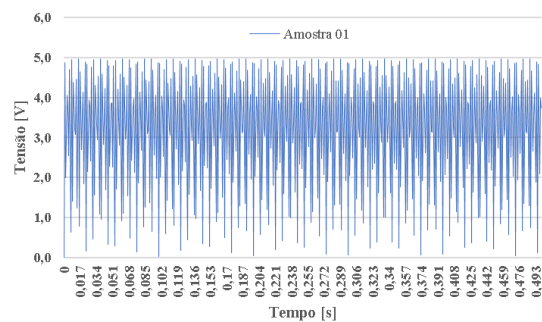
Fonte: Autor.

Figura 63 - Corrente amostra 01 - teste 02.



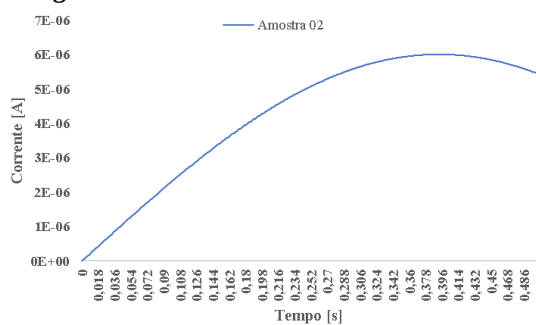
Fonte: Autor.

Figura 64 - Tensão amostra 01 - teste 02.



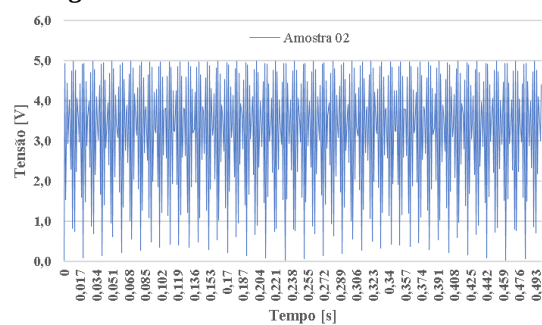
Fonte: Autor.

Figura 65 - Corrente amostra 02 - teste 02.



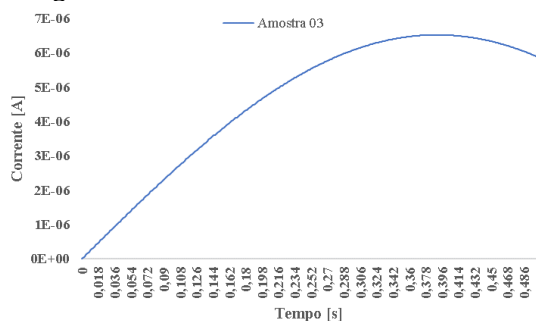
Fonte: Autor.

Figura 66 - Tensão amostra 02 - teste 02.



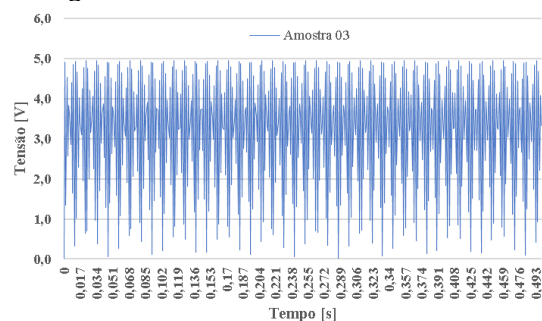
Fonte: Autor.

Figura 67 - Corrente amostra 03 - teste 02.



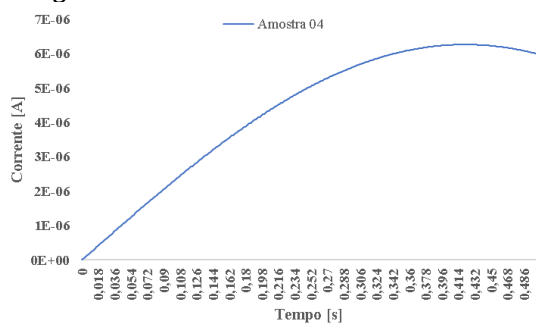
Fonte: Autor.

Figura 68 - Tensão amostra 03 - teste 02.



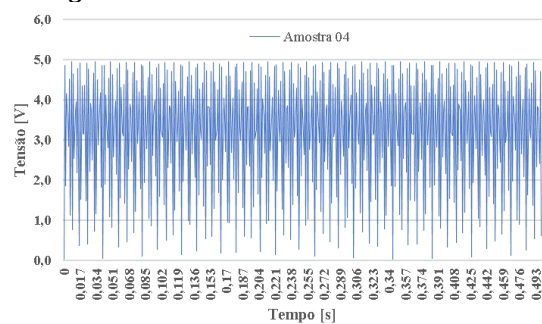
Fonte: Autor.

Figura 69 - Corrente amostra 04 - teste 02.



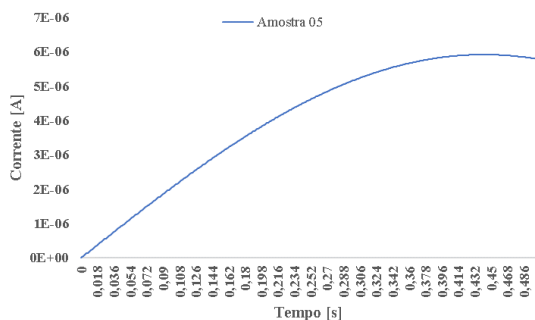
Fonte: Autor.

Figura 70 - Tensão amostra 04 - teste 02.



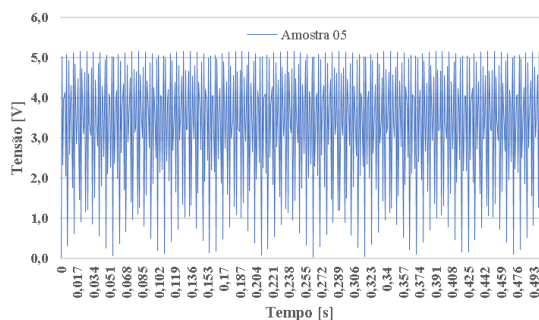
Fonte: Autor.

Figura 71 - Corrente amostra 05 - teste 02.



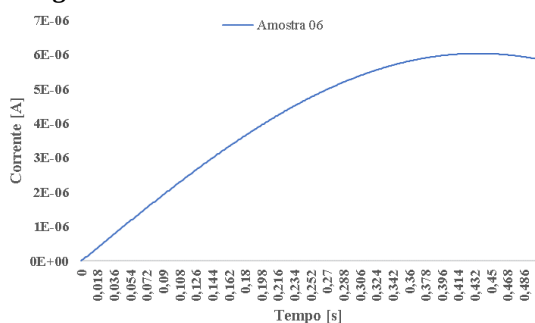
Fonte: Autor.

Figura 72 - Tensão amostra 05 - teste 02.



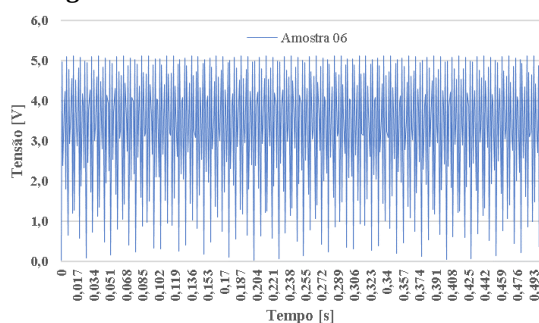
Fonte: Autor.

Figura 73 - Corrente amostra 06 - teste 02.



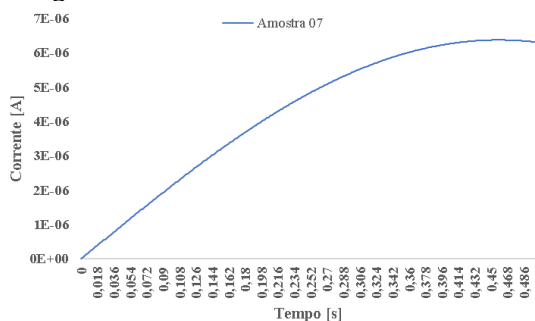
Fonte: Autor.

Figura 74 - Tensão amostra 06 - teste 02.



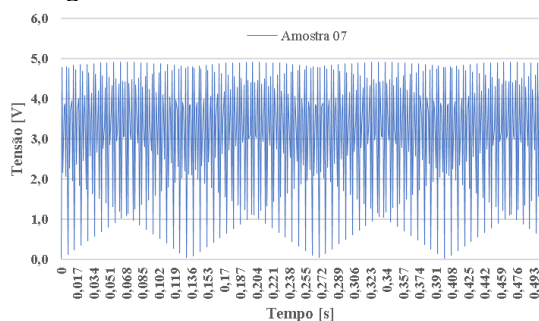
Fonte: Autor.

Figura 75 - Corrente amostra 07 - teste 02.



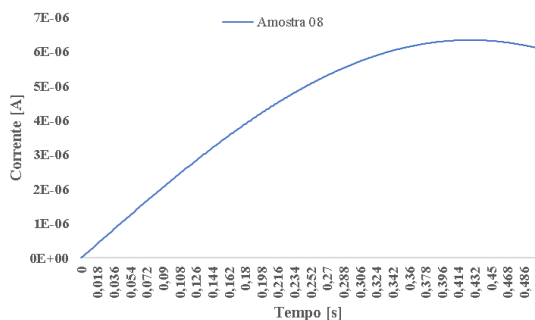
Fonte: Autor.

Figura 76 - Tensão amostra 07 - teste 02.



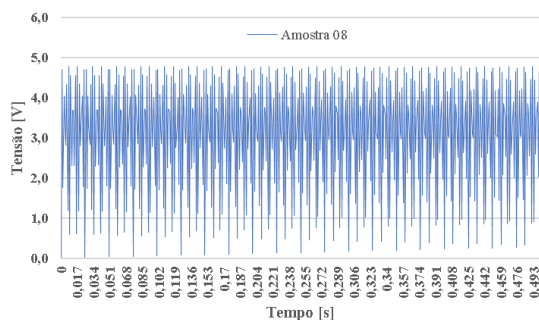
Fonte: Autor.

Figura 77 - Corrente amostra 08 - teste 02.



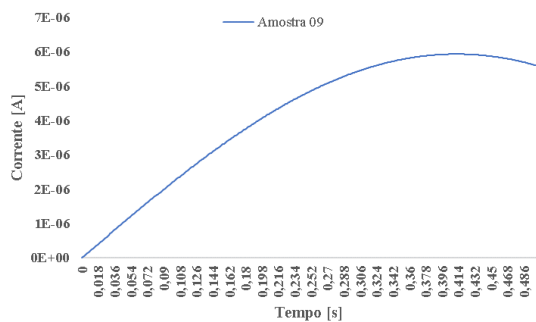
Fonte: Autor.

Figura 78 - Tensão amostra 08 - teste 02.



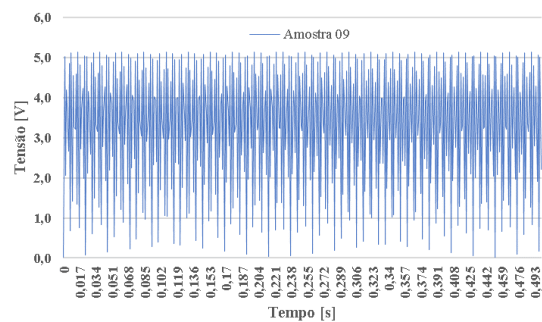
Fonte: Autor.

Figura 79 - Corrente amostra 09 - teste 02.



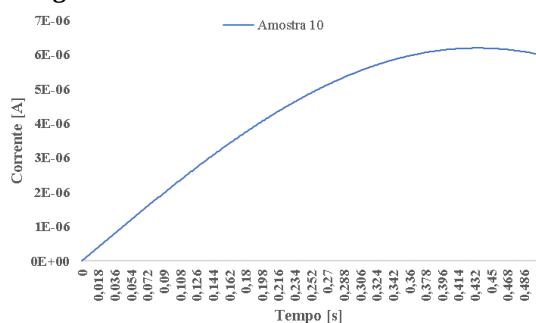
Fonte: Autor.

Figura 80 - Tensão amostra 09 - teste 02.



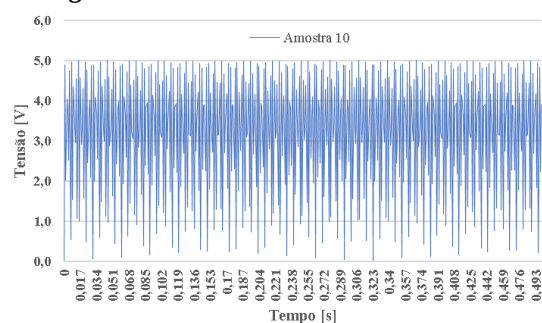
Fonte: Autor.

Figura 81 - Corrente amostra 10 - teste 02.



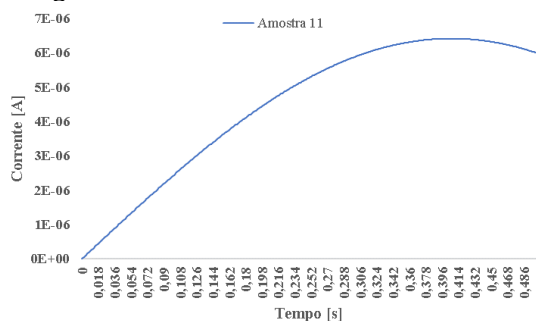
Fonte: Autor.

Figura 82 - Tensão amostra 10 - teste 02.



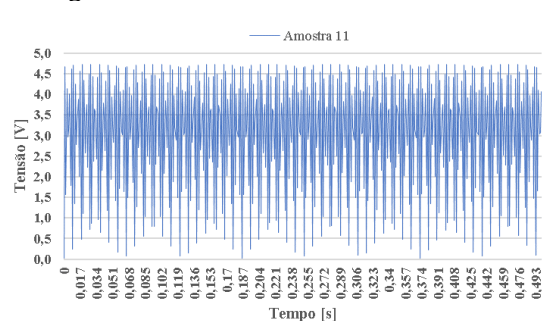
Fonte: Autor.

Figura 83 - Corrente amostra 11 - teste 02.



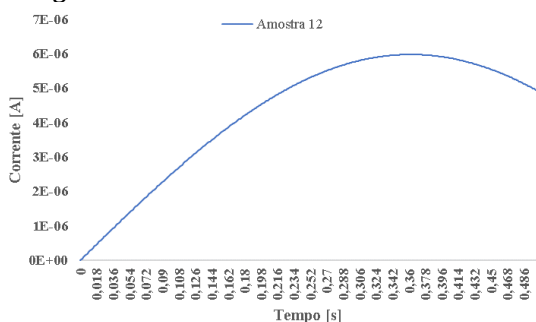
Fonte: Autor.

Figura 84 - Tensão amostra 11 - teste 02.



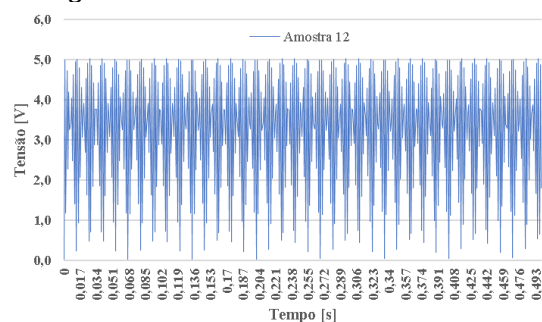
Fonte: Autor.

Figura 85 - Corrente amostra 12 - teste 02.



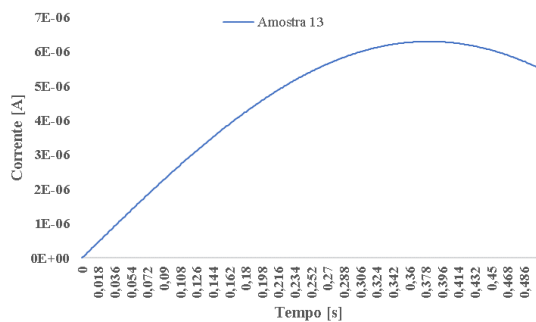
Fonte: Autor.

Figura 86 - Tensão amostra 12 - teste 02.



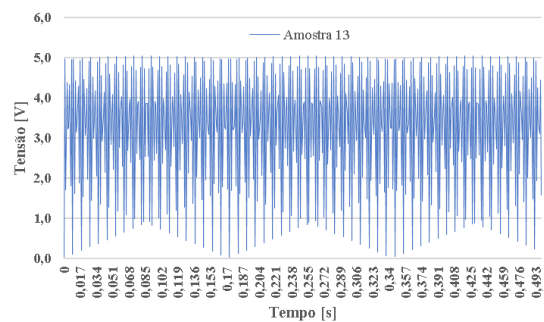
Fonte: Autor.

Figura 87 - Corrente amostra 13 - teste 02.



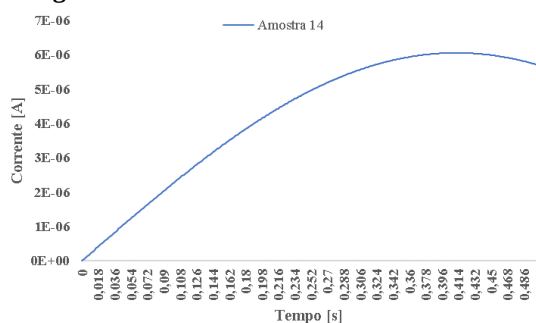
Fonte: Autor.

Figura 88 - Tensão amostra 13 - teste 02.



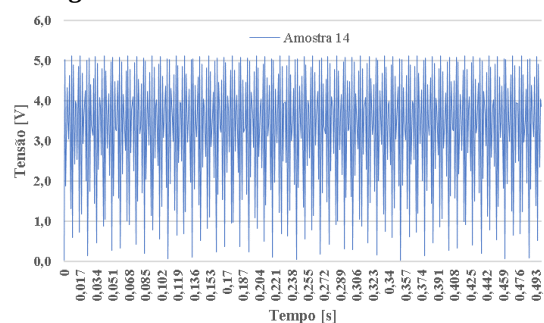
Fonte: Autor.

Figura 89 - Corrente amostra 14 - teste 02.



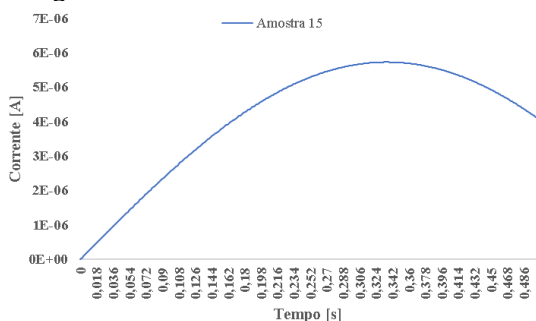
Fonte: Autor.

Figura 90 - Tensão amostra 14 - teste 02.



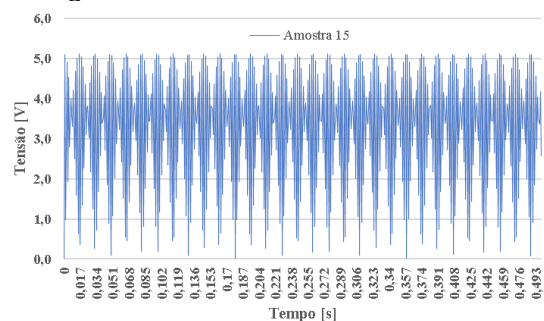
Fonte: Autor.

Figura 91 - Corrente amostra 15 - teste 02.



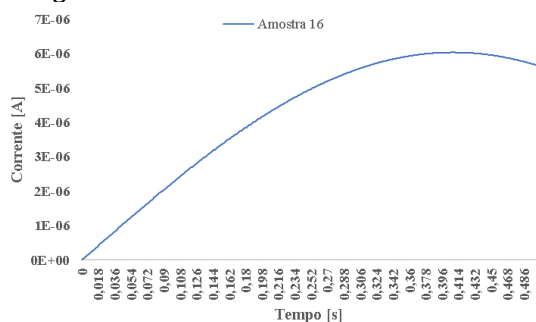
Fonte: Autor.

Figura 92 - Tensão amostra 15 - teste 02.



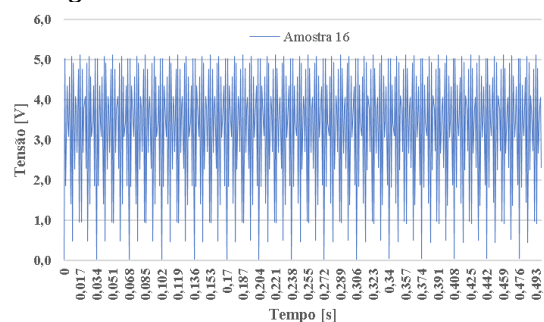
Fonte: Autor.

Figura 93 - Corrente amostra 16 - teste 02.



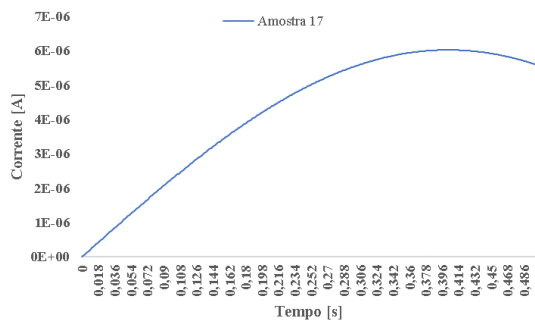
Fonte: Autor.

Figura 94 - Tensão amostra 16 - teste 02.



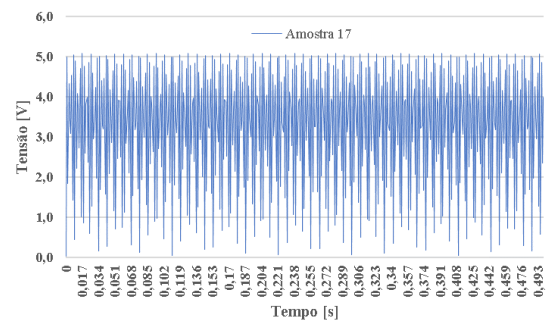
Fonte: Autor.

Figura 95 - Corrente amostra 17 - teste 02.



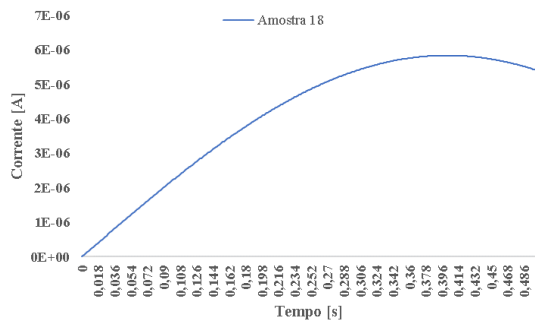
Fonte: Autor.

Figura 96 - Tensão amostra 17 - teste 02.



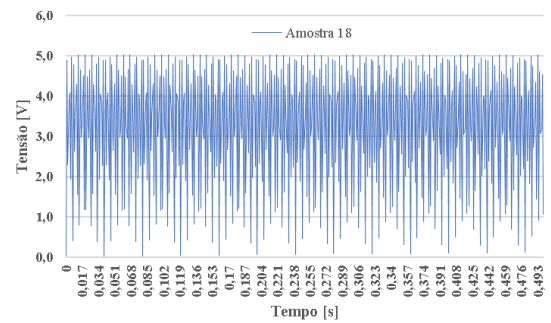
Fonte: Autor.

Figura 97 - Corrente amostra 18 - teste 02.



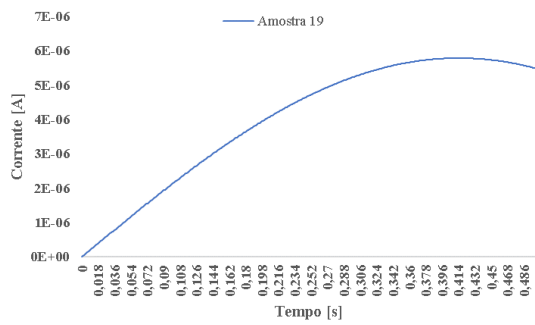
Fonte: Autor.

Figura 98 - Tensão amostra 18 - teste 02.



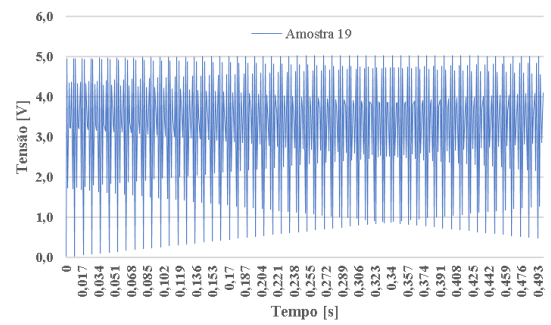
Fonte: Autor.

Figura 99 - Corrente amostra 19 - teste 02.



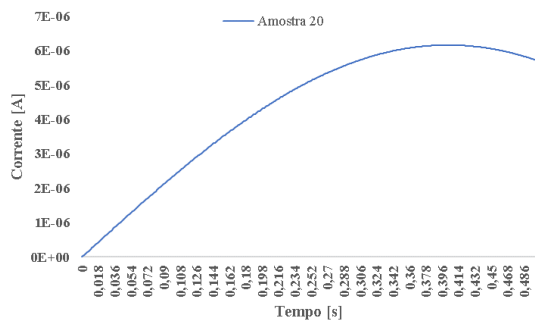
Fonte: Autor.

Figura 100 - Tensão amostra 19 - teste 02.



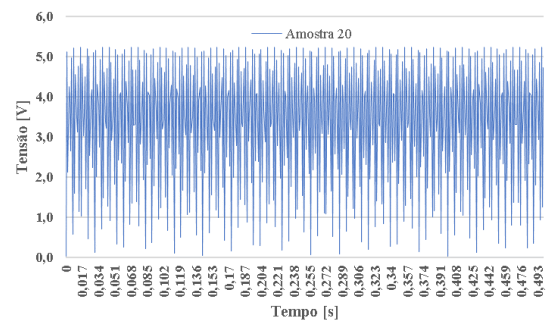
Fonte: Autor.

Figura 101 - Corrente amostra 20 - teste 02.



Fonte: Autor.

Figura 102 - Tensão amostra 20 - teste 02.



Fonte: Autor.