

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CAMPUS CACHOEIRA DO SUL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Éverton Gomes Campos

**SISTEMA MECÂNICO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA  
ELÉTRICA (FLYWHEEL)**

Cachoeira do Sul, RS  
2023

**Éverton Gomes Campos**

**SISTEMA MECÂNICO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA  
(FLYWHEEL)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria, campus Cachoeira do Sul (UFSM-CS, RS), como requisito parcial para obtenção de grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo César Vargas Luz

Cachoeira do Sul, RS  
2023

**Éverton Gomes Campos**

**SISTEMA MECÂNICO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA  
(FLYWHEEL)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria, campus Cachoeira do Sul (UFSM-CS, RS), como requisito parcial para obtenção de grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

**Aprovado em 17 de julho de 2023:**

---

**Paulo César Vargas Luz, Dr. (UFSM)**

---

**Antônio Manuel Santos Spencer Andrade, Dr. (UFSM)**

---

**Diogo Pauletti, Dr. (UFSM)**

Cachoeira do Sul, RS  
2023

NUP: 23081.094988/2023-15

Prioridade: Normal

**Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação**

125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

**COMPONENTE**

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
1	Ata de defesa de trabalho de conclusão de curso (TCC) (125.322)	Éverton_Gomes_Campos-3.pdf

**Assinaturas**

**27/07/2023 19:16:04**

PAULO CÉSAR VARGAS LUZ (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR (Ativo))  
31.06.00.00.0.0 - COORDENAÇÃO ACADÊMICA - UFSM-CS - C\_ACA\_UFSM/CS

**31/07/2023 21:57:57**

ANTÓNIO MANUEL SANTOS SPENCER ANDRADE (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR (Ativo))  
31.06.00.00.0.0 - COORDENAÇÃO ACADÊMICA - UFSM-CS - C\_ACA\_UFSM/CS

**01/08/2023 09:38:55**

DIOGO PAULETTI (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR (Ativo))  
31.06.00.00.0.0 - COORDENAÇÃO ACADÊMICA - UFSM-CS - C\_ACA\_UFSM/CS



Código Verificador: 3041231

Código CRC: c710a24a

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>



## AGRADECIMENTOS

*Agradeço a Deus por me conceder a oportunidade de realizar este trabalho e por guiar-me ao longo dessa jornada acadêmica. Sei que sem Sua orientação e bênção, essa conquista não teria sido possível.*

*Quero dedicar um momento para expressar profundamente minha gratidão aos meus pais. Que em cada passo da minha jornada de formação como pessoa, vocês estiveram ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e inspiração contínua. Vocês foram meus pilares que me sustentaram nos momentos de dúvida e incerteza, sempre acreditando em mim e nas minhas capacidades. Amo vocês e serei sempre grato por tudo o que fizeram e continuam fazendo por mim.*

*Quero expressar meu profundo agradecimento aos meus irmãos, Wellington e Gustavo. Em todos os momentos difíceis dessa longa jornada, vocês estiveram ao meu lado, enfrentando os desafios de mãos dadas e compartilhando sonhos inabaláveis. Vocês são verdadeiros tesouros em minha vida, e sou grato por cada instante em que juntos trilhamos esse caminho.*

*Com gratidão, quero expressar meus sinceros agradecimentos aos irmãos preciosos que a vida me concedeu, Poleana e Guilherme. Sempre mostraram-se presentes para me inspirar e motivar diariamente. Saibam que vocês estarão eternamente no meu coração, e podem contar comigo em cada passo dessa nova jornada.*

*Ao meu orientador, Paulo César Vargas Luz, gostaria de expressar minha profunda gratidão pela sua inestimável e incansável orientação ao longo da minha jornada do TCC. Sua presença e apoio foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Você esteve ao meu lado, guiando-me com sabedoria, paciência e dedicação, incentivando-me a buscar sempre a excelência. Suas palavras motivadoras impulsionaram-me a superar desafios e a acreditar em minha capacidade. Sou imensamente grato por ter você como meu orientador, e serei eternamente grato pela sua contribuição para o sucesso deste trabalho.*

*Na adversidade, uns desistem, enquanto  
outros batem recordes.*

*(Ayrton Senna)*

## RESUMO

### SISTEMA MECÂNICO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA (FLYWHEEL)

AUTOR: Éverton Gomes Campos  
ORIENTADOR: Paulo César Vargas Luz

Nos últimos anos, há um crescente interesse em encontrar soluções eficientes e sustentáveis para o armazenamento de energia elétrica. O armazenamento de energia desempenha um papel crucial na integração de fontes renováveis intermitentes, como energia solar e eólica, na matriz energética. Neste caso, existem diferentes tipos de tecnologias que variam o peso, os impactos ambientais, custos, eficiência e a vida útil. As baterias mecânicas tornam-se neste caso atrativas tanto por seu preço de mercado quanto por sua alta eficiência, chegando a 95 %. No que trata-se, os sistemas de armazenamento mecânico de energia elétrica por volante de inércia oferecem uma solução alternativa de estocagem com diversas vantagens, incluindo alta densidade de energia, respostas rápidas, vida útil longa, eficiência energética e baixo impacto ambiental. No atual trabalho, foi implementado uma flywheel, constituída de um volante de motor de um trator com massa de 60 kg, juntamente com um motor/gerador de corrente contínua, com 750W e 24V. Tratando inicialmente o estudo comportamental de um volante de inércia, com diferentes dimensões, peso e velocidade de atuação, neste caso, optou-se por um volante de tamanho reduzido, constituído de ferro fundido, para que fosse palpável o manuseio e a implementação do sistema. Por necessidades de funcionamento, foi proposto uma lógica de comando para as duas etapas do sistema, sendo elas, a aceleração e desaceleração, com a utilização de contatores. A lógica consiste em isolar o sistema que alimenta o motor como um fonte externa, da parte de carga, com o acionamento de botões. Por fim, como forma de mensurar as especificidades, a análise dos resultados, como quantidade de energia utilizada em cada um dos processos e eficiência, foram realizados ensaios do sistema, com diferentes configurações para cada uma delas. Inicialmente o volante foi acelerado até uma velocidade estipulada, por exemplo, 500 rpm, e quando a mesma foi atingida, a fonte era desconectada para a ativação da carga, que neste caso, também variava-se de 100 a 400W, dependendo do ensaio. A priori, posteriormente houve um tratamento dos resultados, gerando gráficos e tabelas explicativas.

**Palavras-chave:** Armazenamento de energia. Bateria mecânica. Eficiência. Vida Útil e Flywheel.

## ABSTRACT

### MECHANICAL SYSTEM FOR PROCESSING ELECTRICAL ENERGY (FLYWHEEL)

AUTHOR: Éverton Gomes Campos  
ADVISOR: Paulo César Vargas Luz

In recent years, there has been a growing interest in finding efficient and sustainable solutions for electrical energy storage. Energy processing plays a crucial role in integrating intermittent renewable sources such as solar and wind power into the energy mix. In this case, there are different types of technologies that vary in weight, environmental impacts, costs, efficiency and service life. Mechanical batteries become attractive in this case both for their market price and for their high efficiency, reaching 95 %. In that case, flywheel mechanical electrical energy processing systems offer an alternative storage solution with several advantages, including high energy density, fast responses, long lifetime, energy efficiency and low environmental impact. In the current work, a flywheel was implemented, similar to a flywheel of a tractor with a mass of 60 kg, together with a direct current motor/generator, with 750W and 24V. Dealing initially with the behavioral study of a flywheel, with different dimensions, weight and speed of action, in this case, a reduced size flywheel was chosen, made of cast iron, so that the effort and the implementation of the system could be palpated. . Due to operational needs, a command logic was proposed for the two stages of the system, namely, prescription and deceleration, with the use of contactors. The logic consists of isolating the system that feeds the motor as an external source, from the load part, by pressing buttons. Finally, as a way of measuring the specificities, the analysis of the results, such as the amount of energy used in each of the processes and efficiency, system tests were carried out, with different configurations for each one of them. Initially, the flywheel was accelerated to a stipulated speed, for example, 500 rpm, and when it was reached, the source was disconnected to activate the load, which in this case also varied from 100 to 400W, depending on the test. A priori, the results were later processed, generating graphs and explanatory tables.

**Keywords:** Energy storage. Mechanical battery. Efficiency. Lifetime and Flywheel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos sistemas de armazenamento de energia. ....	14
Figura 2 – Esquema de funcionamento de uma usina reversível. ....	15
Figura 3 – Sistema de armazenamento de energia gravitacional. ....	16
Figura 4 – Descrição de um volante de inércia - módulo elementar de um FESS. ....	17
Figura 5 – Esquema de funcionamento do sistema de armazenamento por ar comprimido. ....	18
Figura 6 – Esquema de uma bateria de íons de Lítio. ....	20
Figura 7 – Esquema de uma bateria de chumbo-ácido ....	21
Figura 8 – Esquema de uma bateria de Níquel Cádmio. ....	21
Figura 9 – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil. ....	24
Figura 10 – Gráfico de geração fotovoltaica versus a demanda de uma unidade padrão. ...	25
Figura 11 – Comparação da tarifa branca com a convencional nos dias úteis a) e finais de semana ou feriados b). ....	26
Figura 12 – Sistema de volante de inércia em uma roda de oleiro. ....	27
Figura 13 – Sistema de armazenando de energia flywheel, para transporte ferroviário. ...	27
Figura 14 – Sistema eletromagnético de lançamento de aviões. ....	28
Figura 15 – Estrutura de funcionamento e equipamentos do sistema. ....	29
Figura 16 – Estrutura e os componentes de um FESS. ....	30
Figura 17 – Volante de inércia industrial. ....	31
Figura 18 – Representação de um motor de indução a), imã permanente b) e relutância variável c). ....	31
Figura 19 – Volante de um cilindro oco. ....	33
Figura 20 – Energia armazenada (E), em função da variação da velocidade de rotação do volante de inércia ( $\omega$ ). ....	39
Figura 21 – Metodologia proposta. ....	40
Figura 22 – Volante do motor de um trator. ....	42
Figura 23 – Medidas do volante de inércia. ....	43
Figura 24 – Medidas do cilindro interno. ....	44
Figura 25 – Cilindros estimados para os momentos de inércia. ....	44
Figura 26 – Projeto da estrutura 3D. ....	46
Figura 27 – Desenvolvimento da estrutura do volante de inércia. ....	47
Figura 28 – Sistema mecânico de armazenamento de energia elétrica. ....	47
Figura 29 – Esquemático de funcionamento do sistema. ....	48
Figura 30 – Lógica de controle e força com botoeira e contatores. ....	49
Figura 31 – Tempo de carregamento e descarregamento do volante de inércia em função da velocidade de rotação. ....	51
Figura 32 – Medidas de aceleração a 500 rpm do volante de inércia. ....	52
Figura 33 – Medidas de aceleração a 1000, 1500 e 2000 rpm. ....	53
Figura 34 – Medidas de desaceleração a 500 rpm para uma carga de 400W. ....	54
Figura 35 – Medidas de desaceleração para 1000, 1500 e 2000 rpm para uma carga de 400W. ....	55
Figura 36 – Características técnicas do motor DC de 750W. ....	63
Figura 37 – Motor de indução de 2CV - WEG. ....	64
Figura 38 – Desenvolvimento do sistema de acoplamento com relação 1:1. ....	65
Figura 39 – Sistema de polias 2:1 para o acoplamento dos motores. ....	66
Figura 40 – Sistema de polias 2:1 para o acoplamento dos motores. ....	66

Figura 41 – Ensaio do gerador com carga de 100W. ....	67
Figura 42 – Comparação das tensões a vazio e com carga no gerador DC. ....	68
Figura 43 – Corrente em função da velocidade de rotação e carga. ....	69
Figura 44 – Ensaio de desaceleração a 1000 rpm, com carga de 100, 200 e 300W. ....	70
Figura 45 – Ensaio de desaceleração a 1500rpm, com carga de 100, 200 e 300W. ....	71
Figura 46 – Ensaio de desaceleração a 2000 rpm, com carga de 100, 200 e 300W. ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre baterias recarregáveis.....	22
Tabela 2 – Propriedades de diferentes sistemas de armazenamento de energia.....	23
Tabela 3 – Vantagens e desvantagens de um sistema de volante de inércia. ....	28
Tabela 4 – Características de diversos materiais comumente utilizados em rotores.....	34
Tabela 5 – Quantidade de energia armazenada (wh) em função da velocidade de rotação da flywheel. ....	45
Tabela 6 – Variação do tempo em função da configuração do volante de inércia. ....	56
Tabela 7 – Dados de energia (W.s) para os ensaios realizados. ....	56
Tabela 8 – Eficiência do sistema para diferentes configurações de carga e velocidade. ...	57
Tabela 9 – Energia teórica e prática armazenada no volante. ....	58
Tabela 10 – Perdas estimadas em potência ativa (W). ....	58
Tabela 11 – Dados de tensão versus velocidade, obtidos no ensaio a vazio do motor DC. .	65
Tabela 12 – Dados de tensão versus velocidade, obtidos no ensaio com carga do motor DC.	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

*ANEEL* Agência Nacional de Energia Elétrica

*BEEES* Breakthrough Electrolytes for Energy Storage

*BT* Baixa Tensão

*CAES* Compressed Air Energy Storage

*ANEEL* Agência Nacional de Energia Elétrica

*FEES* Flywheel Energy Storage Systems

*GD* Geração Distribuída

*PHES* Centrais Hidrelétricas reversíveis

*PV* Painéis Fotovoltaicos

*SEP* Sistema Elétrico de Potência

*SIN* Sistema Interligado Nacional

*INEE* Instituto Nacional de Eficiência Energética

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
2.1	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA .....	13
2.2	SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA MECÂNICO.....	14
<b>2.2.1</b>	<b>Centrais Hidroelétricas com Bombagem (Pumped Hydro Energy Storage – PHS)</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Volantes de Inércia (Flywheel Energy Storage Systems – FESS)</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Sistemas de Armazenamento do Tipo Ar Comprimido (Compressed Air Energy Storage – CAES)</b> .....	<b>18</b>
2.3	SISTEMAS ELETROQUÍMICOS PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA - ARMAZENAMENTO INTERNO.....	19
<b>2.3.1</b>	<b>Sistema de baterias de íons de Lítio (Li-ion)</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Sistemas com baterias Chumbo-Ácido (PbA)</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Baterias de Níquel Cádmio (NiCd)</b> .....	<b>21</b>
2.4	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	24
<b>3</b>	<b>SISTEMA FLYWHEEL</b> .....	<b>27</b>
3.1	EQUACIONAMENTO .....	32
3.2	VOLANTE DE INÉRCIA PARA UMA CARGA DE 1 KWH .....	33
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>40</b>
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	42
4.2	ESTRUTURA .....	45
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>48</b>
5.1	METODOLOGIA DE ENSAIOS E RESULTADOS .....	49
5.2	ESTUDO DE CASO .....	50
<b>5.2.1</b>	<b>Tempo de aceleração e desaceleração do volante de inércia</b> .....	<b>51</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Energia e eficiência</b> .....	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>59</b>
6.1	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	60
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>61</b>
	<b>APÊNDICE A – ENSAIO DO MOTOR DC COMO GERADOR</b> .....	<b>63</b>
A.1	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS .....	63
A.2	ENSAIO A VAZIO.....	65
A.3	ENSAIO COM CARGA.....	67
	<b>APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DA FLYWHEEL COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VELOCIDADE E CARGA</b> .....	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico ao longo da sua história consiste na maneira organizacional de grandes centrais de geração e uma extensa rede de linhas de transmissão e distribuição, conhecida como geração centralizada de energia (SILVA et al., 2018). No entanto, a forma de planejar a expansão da oferta de eletricidade tornou-se de suma importância quando se tratando da introdução no mercado de novas tecnologias para a redução considerável do custo da energia elétrica produzida. Sistemas de geração localizados próximos dos centros de carga, traduz o conceito de geração distribuída (GD) (FILHO; AZEVEDO, 2013).

Os sistemas de geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos (FV), são considerados a opção mais adotada por consumidores atualmente. Neste caso, o sistema conta com geração de energia das 6h às 18h, com pico máximo de geração ao meio dia, o que estabelece uma diferença na curva de geração quando comparada a curva de carga de um consumidor residencial, que possui o pico máximo de consumo próximo das 21h. Todavia, a utilização de um sistema de armazenamento de energia é uma opção para o equilíbrio do sistema, além de que, o consumidor possa usufruir dos benefícios da tarifa horária, sem a necessidade de alterar seus hábitos de consumo.

Em um âmbito global, os sistemas de armazenamento de energia contam com diferentes tipos de tecnologias, bem como, encontram-se em diversos estágios de maturidade (BUENO; BRANDÃO, 2016). No que diz respeito, sistemas de armazenamento de energia convencionais, por meio de baterias eletroquímicas, são os mais utilizados, em que, células eletroquímicas convertem a energia armazenada quimicamente em energia elétrica (FREIRE, 2019).

Outra forma de armazenar energia, é através de baterias mecânicas, no que consiste na utilização da energia potencial (hidráulica e ar comprimido) e energia cinética (flywheel). Centrais hidrelétricas com bombagem, compressão de ar e volantes de inércia são alguns exemplos dessa tecnologia e são muito utilizadas em sistemas remotos por garantirem uma alta eficiência e confiabilidade.

Os volantes de inércia armazenam energia mecânica no momento de inércia de uma massa, que geralmente é do tipo cilíndrica. A energia armazenada é proporcional ao momento de inércia (dependente diretamente da massa e do seu formato) e ao quadrado da velocidade angular. Sistemas de armazenamento de energia por meio da flywheel utilizam o princípio de rotação de uma massa, permitindo que a energia seja armazenada em um volante, convertendo energia elétrica em energia mecânica na forma de rotação. Essa energia elétrica fornecida ao sistema de armazenamento pode ou não ser ligada à rede. O motor/gerador (M/G), é responsável tanto em acelerar o sistema, no processo de aceleração, quanto funcionar como gerador, no momento em que a massa está girando (CHOUDHURY, 2021).

A tecnologia de armazenamento de energia flywheel, torna-se mais atrativa quanto a sua alta eficiência de ciclo, baixo impacto ambiental, grande ciclo de vida, alta densidade de

energia, tempo de resposta rápido além da baixa manutenção requerida. Contudo, os principais problemas envolvendo esse tipo de sistema estão associados a elevada taxa de auto-descarga e problemas com segurança. Para isso, torna-se interessante a utilização de sistemas de rolamentos mais robustos, a fim de diminuir a taxa de auto-descarga e utilização de materiais específicos para sistemas de baixa velocidade (CHOUDHURY, 2021).

Para o projeto de um sistema mecânico de armazenamento de energia elétrica (flywheel), o documento encontra-se dividido em 6 capítulos, dentre estes, o Capítulo 1, de caráter introdutório. O Capítulo 2 compreende o referencial teórico, com o contexto sistemas de armazenamento de energia mecânicos e aplicações em geração distribuída. O Capítulo 3, refere-se ao equacionamento de um volante de inércia, demonstrando estudos de casos para o dimensionamento de sistemas. O Capítulo 4 trata sobre a metodologia utilizada na construção do sistema. O Capítulo 5, refere-se aos resultados experimentais obtidos, desde a construção da estrutura, montagem do sistema elétrico a realização dos ensaios. E por fim, as conclusões do trabalho, elencando os principais temas abordados e os resultados obtidos com o projeto.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um setup de armazenamento de energia elétrica em um volante de inércia, com ênfase no desenvolvimento e análises do sistema para o uso como uma fonte de energia confiável, com uma boa eficiência e grande vida útil.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar um sistema compacto de armazenamento de energia elétrica.
- Definir e avaliar o motor que funcionará também como gerador no sistema.
- Desenvolver uma lógica de comandos para o controle das etapas de funcionamento.
- Avaliar o comportamento e eficiência do sistema em diferentes configurações.
- Propor melhorias estruturais, mecânicas e elétricas do equipamento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os sistemas de armazenamento de energia, também conhecidos como *Electrical Energy Storage* (na literatura anglo-saxónica), são compostos por dispositivos modulares, células ou outros meios físicos que permitem armazenar energia em diferentes formas, como mecânica, elétrica ou química. Essa energia armazenada pode ser utilizada posteriormente em processos considerados úteis. Durante o ciclo de carga e descarga desses sistemas, ocorrem perdas de energia, o que significa que a eficiência de cada ciclo é menor que 100% (MEDINA et al., 2014). Essa consideração é importante para avaliar a viabilidade econômica do armazenamento durante o seu dimensionamento.

Nos sistemas elétricos de energia, os sistemas de armazenamento de energia desempenham um papel importante ao permitir o desenvolvimento e a implementação de funções avançadas do sistema. Essas funções têm como objetivo melhorar a estabilidade do sistema e garantir a qualidade e a continuidade do serviço. Em redes isoladas, em particular, os sistemas de armazenamento podem desempenhar um papel na regulação primária de frequência, contribuindo para manter a estabilidade da frequência (SILVA, 2015a).

Os sistemas de armazenamento também possibilitam o deslocamento temporal da energia, permitindo que a energia seja absorvida durante os períodos de baixa demanda e fornecida durante os períodos de alta demanda. Esses períodos de alta demanda geralmente exigem o acionamento de grupos geradores com custos de produção mais elevados. Com o armazenamento de energia, é possível evitar o acionamento desses grupos geradores caros (SILVA, 2015a).

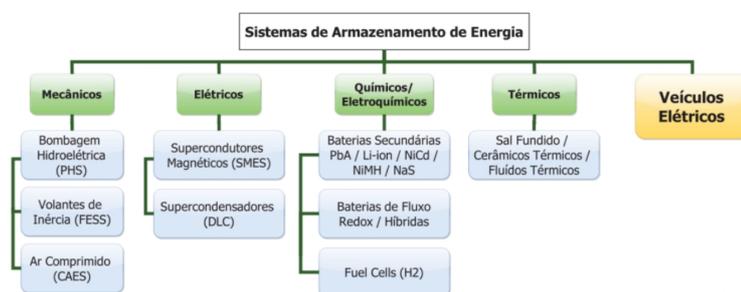
No presente trabalho será efetuado o dimensionamento, implementação e análise de um sistema de armazenamento de energia mecânico, sendo pretendido estimar o funcionamento, bem como eficiência de carga/descarga. Nesse sentido, o conteúdo apresentados nos próximos tópicos visam indicar o contexto dos sistemas de armazenamento mecânicos e suas aplicações.

### 2.1 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Existem diferentes tipos de sistemas de armazenamento de energia, que são classificados de acordo com a forma de energia que utilizam. Essas classificações incluem sistemas de armazenamento de energia mecânica, química/eletroquímica, elétrica e térmica. Além disso, no futuro, é possível considerar os veículos elétricos como sistemas de armazenamento independentes, que podem ser mobilizados pelo operador do sistema para participar dos serviços do sistema.

A Figura 1 permite observar as principais tecnologias de armazenamento de energia atualmente consideradas para aplicação em sistemas elétricos (IEC, 2011).

Figura 1 – Classificação dos sistemas de armazenamento de energia.



Fonte: adaptado de (BHUIYAN; YAZDANI, 2012).

No contexto do presente trabalho, serão abordados prioritariamente os sistemas de armazenamento de energia mecânico e eletroquímicos, como forma de fundamentação deste projeto.

## 2.2 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA MECÂNICO

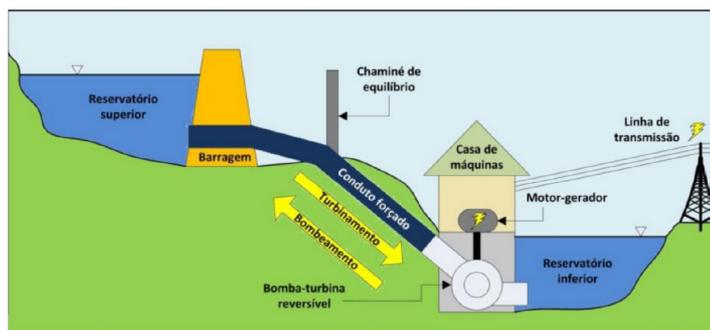
As tecnologias de armazenamento de energia mecânica têm a capacidade de armazenar energia na forma de energia cinética ou potencial. Um exemplo tradicional desses sistemas é encontrado em usinas hidrelétricas reversíveis, que possuem a capacidade de bombear água de um nível inferior para um nível superior, dependendo do período do dia. Além disso, os sistemas de armazenamento de energia mecânica também englobam volantes de inércia e sistemas de armazenamento de ar comprimido (BHUIYAN; YAZDANI, 2012).

### 2.2.1 Centrais Hidroelétricas com Bombagem (Pumped Hydro Energy Storage – PHS)

As centrais de bombeamento são uma das tecnologias de armazenamento de energia mais antigas, o que lhes confere um alto nível de maturidade técnica. Registros de sua utilização remontam à década de 1890, na Itália e na Suíça. Em 1933, surgiram as primeiras centrais equipadas com grupos reversíveis (IEC, 2011). Em 2012, a capacidade instalada global dessas centrais era de aproximadamente 129 GW, sendo que os sistemas de Armazenamento por Bombeamento Hidroelétrico (PHS) representavam mais de 99% da capacidade mundial de armazenamento em larga escala e contribuíam com cerca de 3% da geração global de energia elétrica (LUO et al., 2015). Esses sistemas permitem bombear água de um reservatório em uma determinada altura para um reservatório em uma altura superior, na Figura 2 é possível visualizar um esquemático do sistema. Durante períodos de baixa demanda, os grupos reversíveis nas centrais consomem energia elétrica de baixo custo para bombear água (operação em modo motor) do reservatório inferior para o reservatório superior. Durante períodos de pico, a água armazenada no reservatório superior é liberada para o inferior, acionando os grupos reversíveis

no modo de gerador elétrico. Assim, durante períodos de alta demanda, quando normalmente os preços da eletricidade são mais elevados, a central hidrelétrica fornece energia elétrica a preços mais baixos. A potência instalada nas centrais hidrelétricas de bombeamento depende da pressão e do fluxo de água disponíveis para acionar as turbinas, bem como da potência nominal das unidades de bomba/turbina e motor/gerador dos grupos instalados (LUO et al., 2015).

Figura 2 – Esquema de funcionamento de uma usina reversível.



Fonte: (SERRA et al., 2016).

No momento atual, diversas centrais estão equipadas com grupos reversíveis, cuja potência combinada varia de 1 MW a cerca de 3000 MW. A eficiência da bombagem elétrica varia entre 70% e 85%, proporcionando tempos de descarga que vão de algumas horas a alguns dias. Suas principais vantagens incluem uma vida útil longa e um número praticamente ilimitado de ciclos de operação (carga/descarga). Devido a essas características técnicas, os sistemas de Armazenamento por Bombeamento Hidroelétrico (PHS) são adequados para aplicações de gerenciamento de energia, como o deslocamento temporal de energia, bem como para a regulação de frequência e contribuição para a capacidade de reserva estática em sistemas elétricos (LUO et al., 2015). No entanto, suas principais desvantagens são a dependência das condições topológicas e a área que ocupam, juntamente com os custos de investimento elevados (IEC, 2011).

É possível destacar que atualmente existem diversas tecnologias de armazenamento de eletricidade, entretanto as usinas reversíveis são as mais utilizadas entre os países, com cerca de 99% da capacidade total instalada no mundo. Os países como EUA, Japão e China estão entre os de maior capacidade instalada da tecnologia (ENERGÉTICA, 2018).

No contexto de armazenamento de energia através de sistemas mecânicos, a startup Suíça Energy Vault é considerada a pioneira no estudo de baterias alternativas para armazenamento de energia elétrica provenientes de fontes renováveis. O sistema proposto conta com seis braços mecânicos, móveis, acoplados a um motor elétrico, interligado a uma torre com 110 metros de altura e o seu funcionamento consiste no empilhamento e desempilhamento de blocos em anéis concêntricos. Na Figura 3, é possível identificar o sistema desenvolvido.

O sistema de funcionamento da torre é semelhante a uma PHS, portanto neste caso não necessita de uma geografia específica para ser implantada. Cada bloco que é utilizado no

Figura 3 – Sistema de armazenamento de energia gravitacional.



Fonte: (ENERGY VAULT, 2022).

o sistema tem o peso de 35 toneladas, e são os grandes responsáveis pelo armazenamento de energia na forma gravitacional, ora o sistema realiza o empilhamento dos blocos, neste caso utilizando energia excedente, ora os braços do sistema desmontam os blocos sistematicamente de forma a gerar energia elétrica através da força peso.

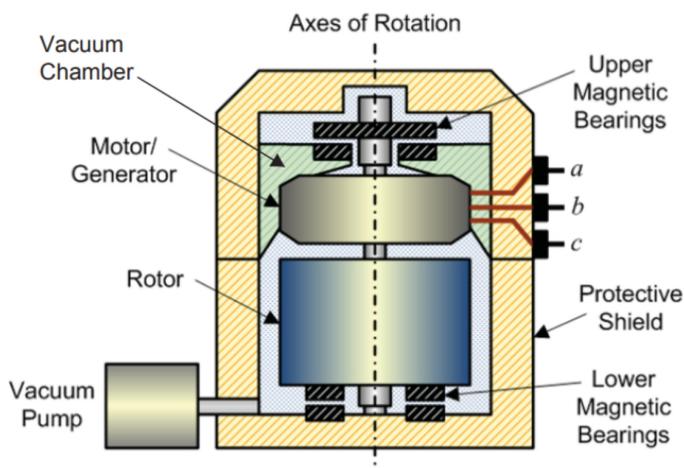
Todavia, o sistema desenvolvido pela startup se torna robusto para o armazenamento de energia em grande escala, promovendo a utilização da energia armazenada por um conjunto de residências. Portanto, sistemas de armazenamento de energia elétrica para consumidores residenciais com geração de energia própria precisam ser mais compactos, economicamente viáveis e contar com uma eficiência alta, deste modo, no capítulo a seguir será desenvolvido um estudo detalhado do funcionamento dos volantes de inércia.

### 2.2.2 Volantes de Inércia (Flywheel Energy Storage Systems – FESS)

Um Sistema de Armazenamento de Energia por Volante de Inércia (FESS, na sigla em inglês) moderno é composto por cinco componentes principais: um volante de inércia, um conjunto de rolamentos, uma unidade motor/gerador reversível, um conversor eletrônico e uma câmara de vácuo (conforme ilustrado na Figura 4) (LUO et al., 2015). O volante de inércia é um dispositivo mecânico que possui um cilindro maciço em rotação (similar ao rotor de uma máquina elétrica convencional), permitindo o armazenamento de energia cinética. No FESS, uma unidade motor/gerador está acoplada ao volante de inércia. Quando opera como motor, consome energia elétrica para acelerar o volante de inércia até atingir uma velocidade limite, correspondente à sua capacidade de armazenamento (IEC, 2011). Quando necessário, a operação é invertida, a unidade reversível passa a operar como gerador, fornecendo energia elétrica de volta ao sistema.

Os Sistemas de Armazenamento de Energia por Volante de Inércia (FESS) modernos

Figura 4 – Descrição de um volante de inércia - módulo elementar de um FESS.



Fonte: (LUO XING E WANG, 2015).

podem ser classificados em dois grupos: (1) de baixa velocidade, que utilizam um volante de inércia feito de aço e operam a velocidades de aproximadamente 6.000 rpm, e (2) de alta velocidade, cujo volante de inércia é composto por materiais compósitos avançados, como fibras de carbono, podendo alcançar velocidades na ordem de 100.000 rpm (LUO et al., 2015). Nos sistemas elétricos, os FESS de baixa velocidade são geralmente empregados em aplicações de média/alta potência que requerem injeção/absorção de energia elétrica por curtos períodos de tempo, como a regulação de frequência. Já os FESS de alta velocidade são adequados para aplicações de alta potência relacionadas à qualidade e continuidade do serviço, apresentando uma alta eficiência a cada ciclo de carga/descarga (de até 95% na potência nominal) (LUO et al., 2015).

Os volantes de inércia são de baixa manutenção, possuem longa vida útil, apresentam alta densidade de potência e são fabricados com materiais ambientalmente sustentáveis (BHUIYAN; YAZDANI, 2012). No entanto, os Sistemas de Armazenamento de Energia por Volante de Inércia (FESS) enfrentam perdas significativas de energia quando não estão em uso. Esse problema resulta em altas taxas de auto-descarga nos FESS, podendo chegar a cerca de 20% da capacidade armazenada por hora (LUO et al., 2015).

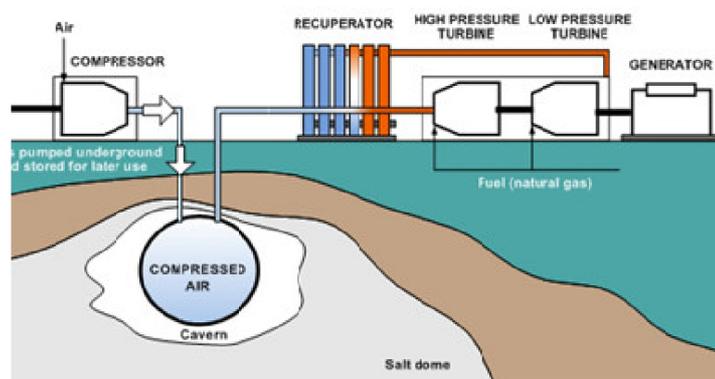
Desde 2006, foram instalados dois sistemas de armazenamento de energia por volante de inércia no arquipélago dos Açores, nas ilhas Flores e Graciosa. Esses sistemas de Armazenamento por Volante de Inércia (FESS) possuem uma potência nominal de aproximadamente 350 kW e têm como principal objetivo o controle de frequência. Eles foram implementados com o intuito de melhorar o desempenho do sistema elétrico, reduzindo desvios de frequência em casos de desequilíbrios de potência. Além disso, esses sistemas contribuem para evitar o desperdício de energia renovável, uma vez que, geralmente, o corte da produção renovável ocorre devido às restrições na gestão dos limites mínimos operacionais das unidades térmicas em redes isoladas (MARTINS, 2011).

### 2.2.3 Sistemas de Armazenamento do Tipo Ar Comprimido (Compressed Air Energy Storage – CAES)

Atualmente, uma parcela significativa da energia elétrica gerada em todo o mundo é destinada à compressão de ar. No caso do Reino Unido, por exemplo, mais de 2,5% de toda a eletricidade produzida é utilizada para esse propósito. O processo de compressão de ar consome energia, no entanto, é possível recuperar essa energia por meio do processo de expansão do ar comprimido (LETCHER, 2016). Nesse contexto, os sistemas de armazenamento de energia por meio de ar comprimido surgem como uma tecnologia que permite armazenar grandes quantidades de energia elétrica na forma de ar comprimido em altas pressões.

Os elementos essenciais de uma instalação convencional de armazenamento de energia por ar comprimido são os seguintes: um conjunto de compressores, um conjunto de expanders, trocadores de calor para resfriamento ou pré-aquecimento do ar e um reservatório para armazenar o ar comprimido, conforme demonstrado na Figura 5 (BUFFA et al., 2013). Os sistemas CAES podem funcionar com um ou mais estágios de compressão e expansão, sendo os sistemas de dois estágios os mais comuns (BARNES; LEVINE, 2011).

Figura 5 – Esquema de funcionamento do sistema de armazenamento por ar comprimido.



Fonte: (RENEWABLE, 2019).

Ao instalar um sistema CAES como uma planta autônoma em uma rede elétrica, um motor elétrico é utilizado para acionar o compressor, enquanto um gerador elétrico é acionado pela turbina. Durante as conversões de energia entre eletricidade e trabalho mecânico, ocorrem perdas mínimas de energia no motor e no gerador. É comum alcançar eficiências de conversão superiores a 98% para máquinas elétricas de grande porte (LETCHER, 2016).

Existem duas usinas de grande escala de armazenamento de energia por ar comprimido (CAES) instaladas no mundo. A primeira é a usina de Huntorf, localizada em Huntorf, Alemanha, e pertencente à E.ON. Kraftwerke. Foi instalada em 1978 e possui uma capacidade de 290 MW. A usina utiliza cavernas de sal subterrâneas como reservatórios e opera com armazenamento em volume constante. A capacidade de armazenamento da usina de Huntorf é de aproximadamente 310.000 m<sup>3</sup>, projetada para operar em pressões entre 48 e 66 bar. A usina

alemã funciona em um ciclo diário de oito horas para o carregamento e pode gerar 290 MW de energia por duas horas durante a descarga (PIMM; GARVEY; JONG, 2014; LETCHER, 2016).

A segunda usina é a usina de McIntosh, localizada em McIntosh, Alabama, Estados Unidos, e pertencente à PowerSouth Energy Cooperative. Foi instalada em 1991 e tem uma capacidade de 110 MW. Assim como a usina de Huntorf, utiliza cavernas de sal subterrâneas como reservatórios e opera com armazenamento em volume constante. A capacidade de armazenamento da usina de McIntosh é superior a 500.000 m<sup>3</sup>, projetada para operar em pressões entre 45 e 74 bar. Essa usina pode operar com geração máxima de potência por até 26 horas (BARNES; LEVINE, 2011; CHEN et al., 2009).

Diversas tecnologias estão sendo propostas e atualmente em fase de investigação para otimizar os sistemas de armazenamento de energia por ar comprimido (CAES). No entanto, a maior dificuldade na implantação desses sistemas está relacionada à necessidade de localizá-los em áreas geograficamente favoráveis, próximas a potenciais reservatórios naturais, e de combiná-los com uma central de turbina a gás (CHEN et al., 2009).

## 2.3 SISTEMAS ELETROQUÍMICOS PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA - ARMAZENAMENTO INTERNO

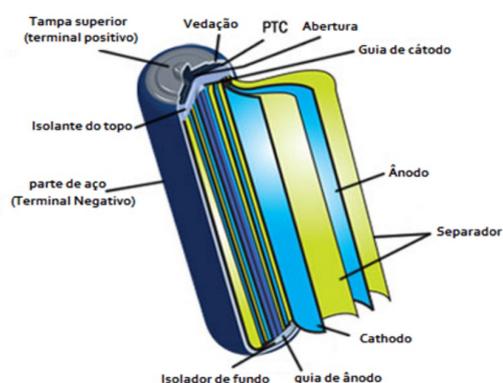
Os sistemas de armazenamento de energia eletroquímica são usados em diferentes aplicações desde os dispositivos eletrônicos portáteis aos sistemas elétricos. Estes sistemas baseiam-se na geração de energia elétrica através das reações químicas ou na facilitação de reações químicas por meio da energia elétrica. Atualmente consideram-se três grandes grupos de sistemas de armazenamento eletroquímicos: as baterias secundárias ou recarregáveis, as baterias de fluxo e as pilhas de combustível (IEC, 2015).

Neste tópico, será abordado um breve estudo sobre as baterias secundárias ou então recarregáveis, considerando dentre elas, as principais: Íons de Lítio (Li-íon), chumbo-ácido (PbA) e níquel cádmio (NiCd).

### 2.3.1 Sistema de baterias de íons de Lítio (Li-ion)

As baterias de íons de lítio detêm uma tecnologia relativamente nova. O Lítio utilizado em sua fabricação, é o metal alcalino de maior potencial eletroquímico da tabela periódica. As baterias de íons de Lítio tem como característica o fornecimento de elevados picos de potência e alta densidade de energia. Usualmente são consideradas viáveis para aplicações em veículos elétricos, em arranjos que alcançam de 20 kWh até 50 kWh (BUENO; BRANDÃO, 2016). A Figura 6 ilustra a constituição de uma bateria de íons de Lítio.

Figura 6 – Esquema de uma bateria de íons de Lítio.



Fonte: (STREMA, 2022).

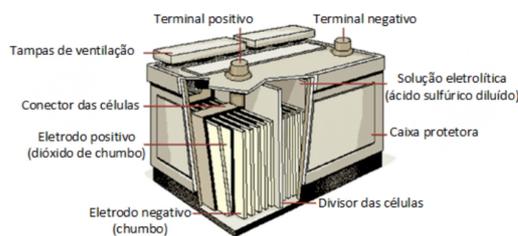
De acordo com a Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia (BUENO; BRANDÃO, 2016), baterias de íons de Lítio armazenam o dobro de energia que uma bateria de hidreto metálico (NiMH) e ainda cerca de três vezes mais que uma bateria de níquel cádmio (NiCd).

Uma bateria de íon-lítio com peso de 1 kg pode armazenar 150 watts-hora de energia elétrica. Já uma bateria de NiMH (hidreto metálico de níquel), consegue armazenar, cerca de, 100 watts-hora por quilograma (comumente varia de 60 a 70 watts-hora). Uma bateria de chumbo-ácido tem a capacidade de armazenar por volta de 25 Wh por quilo (BUENO; BRANDÃO, 2016).

### 2.3.2 Sistemas com baterias Chumbo-Ácido (PbA)

A bateria de ácido-chumbo é o tipo de bateria secundária mais utilizado. O cátodo é feito de dióxido de chumbo e o ânodo é feito de chumbo. As baterias PbA apresentam curtos tempos de resposta, baixa auto-descarga (<0,3%), boa eficiência de ciclo (63-90%) e baixos custos de capital (SILVA, 2015b). Na ilustração da Figura 7, é possível identificar a constituição desse tipo de sistema.

Figura 7 – Esquema de uma bateria de chumbo-ácido



Fonte: (EMBARCADOS, 2022).

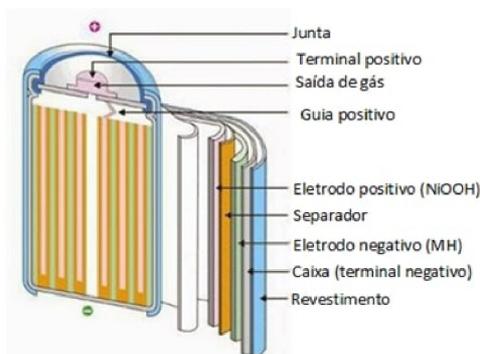
As baterias Chumbo-Ácido são adequadas a sistemas que requeiram tempos de armazenamento curtos ou médios. Os maiores mercados para esta tecnologia são a indústria automotiva e os sistemas de back-up (no-breaks) para telecomunicações. Utilizam em sua composição o chumbo (metal pesado tóxico) e o ácido sulfúrico, corrosivo (BUENO; BRANDÃO, 2016).

Este tipo de sistema é muito utilizado principalmente por ter um baixo custo de instalação, operação e manutenção, além de serem concorrentes diretos das baterias de íons de Lítio, quando o peso e o volume não são características determinantes.

### 2.3.3 Baterias de Níquel Cádmio (NiCd)

As baterias NiCd possuem eletrodos constituídos por hidróxido de níquel e cádmio metálico, possuindo como eletrólito uma solução aquosa alcalina. Tendo como desvantagens, o nível dos materiais utilizados: o cádmio e o níquel são metais pesados tóxicos, que representam um risco para o ambiente, e estas baterias sofrem de efeito memória, sendo que a sua capacidade máxima pode ser diminuída caso a bateria seja frequentemente carregada após descarga parcial. O esquemático deste tipo de sistema é mostrado na Figura 8 (SILVA, 2015b).

Figura 8 – Esquema de uma bateria de Níquel Cádmio.



Fonte: (EMBARCADOS, 2022).

No Alasca, em Golden Valley, existe um BESS baseado em baterias NiCd em operação desde 2003. O sistema em questão foi considerado o maior dos Estados Unidos em 2019, contando com uma capacidade de 45 megawatts e é utilizado ainda como reserva para o sistema elétrico, que é isolado (RENEWABLE, 2019).

As baterias de NiCd são mais adequadas para carga rápida e descarga em pulsos de potência. Não são adequadas a processos em que devem ser mantidas em flutuação, para uso ocasional por breves períodos. Uma descarga completa é tão importante que, se omitida, poderá causar a formação de grandes cristais nas placas das células (é o chamado efeito memória), levando à perda gradual de sua capacidade (ABAQUE, 2017).

De todo modo, é possível identificar diferentes tipos de aplicações para cada um dos tipos de baterias recarregáveis, sendo que, os aspectos como peso, impactos ambientais, custos, vida útil e eficiência para implementação são fatores que variam dependendo da tecnologia de armazenamento empregada. Na Tabela 1, é demonstrado um comparativo entre diferentes aspectos das baterias recarregáveis apresentadas.

Tabela 1 – Comparativo entre baterias recarregáveis.

Tecnologia	Vida útil (anos)	Eficiência (%)	Dens. de Energia (wh/kg)	Dens. de Energia Volumétrica (wh/m <sup>3</sup> )	Custo inicial (R\$/wh)
Ions de Lítio	5 à 15	75 - 90	120	280	~0.67
PbA	5 à 15	75 - 85	35	80	~0.57
NiCd	5 à 20	60 - 83	41	120	~11.4

Fonte: Autor.

Como pode ser observado na Tabela 1, para os três tipos de baterias apresentadas no estudo, existem características distintas desde a vida útil à densidade volumétrica. No que concerne, o avanço tecnológico busca a aplicação das baterias eletroquímicas em carros elétricos, de modo que, a densidade de energia e a densidade de energia volumétrica são propriedades de alta relevância, principalmente por se tratar de peso e o volume ocupado em um veículo. Além do mais, sistemas que possuem esses tipos de características tornam-se muito caros e praticamente inviáveis quando aplicados em armazenamento de energia residencial proveniente da geração distribuída.

Entretanto, as baterias recarregáveis, são consideradas um dos tipo de sistema capaz de armazenar energia, neste caso por meio de reações químicas. Na Tabela 2, pode-se observar outras formas de armazenamento com diferentes tipos de funcionamento e características.

Como pode ser observado na Tabela 2, existem inúmeros tipos de sistema para armazenamento de energia, desde as centrais hidrelétricas reversíveis (PHES), até armazenamento por supercapacitores, ou então ar comprimido que não são comumente utilizados na geração centralizada.

De qualquer forma, informações referentes à eficiência, tempo de vida útil e ao preço são variáveis extremamente importantes, quando ligadas a sistemas de armazenamento de energia elétrica residenciais. Visto que, o tempo de retorno do investimento, é o responsável em fidelizar

o cliente.

Consequentemente, percebe-se que o sistema de armazenamento por baterias, tem um tempo de vida útil que varia de 2 à 10 anos, sendo a tecnologia com menor índice de durabilidade mostrada na Tabela 2. Neste caso, quando comparado ao tempo de vida útil dos módulos fotovoltaicos que em média possuem uma vida útil de 25 anos, podendo variar de acordo com o fabricante (GUIMARÃES, 2018).

Tabela 2 – Propriedades de diferentes sistemas de armazenamento de energia.

Tecnologia	Capacidade	Tempo de descarga	Eficiência	Vida útil
Ar comprimido	25 MW - 2.5 GW	2 - 24 h	40 à 70%	15 - 40 anos
Baterias	1 kW - 50 MW	1 min - 3h	65 à 75%	2 - 10 anos
Flywheel	5 kW - 20 MW	4s à 15 min	90 à 95%	20 anos
Célula de hidrogênio	1 kW - 10 GW	0.01s à dias	20 - 40%	5 - 10 anos
Supercondutor	10 kW - 1 MW	5s à 5 min	95%	~30 anos
Supercapacitor	<150 kW	1s à 1min	85 - 95%	~10 anos

Fonte: Autor.

Outro ponto importante a ser discutido é a eficiência de operação do sistema, ou seja, quanto de energia elétrica será perdida no processo de armazenamento. Logo, busca-se a utilização de sistemas com maior percentual de eficiência, no caso das baterias o valor pode variar de 65% a 75% (Tabela 2), em contrapartida, sistemas como supercapacitores, flywheel's e armazenamento de energia magnética em um supercondutor contam com uma eficiência de até 95%, por consequência, garantem um retorno em um curto período de tempo.

É possível salientar a existência de baterias mecânicas, dentre as demais apresentadas, principalmente por serem consideradas promissoras, quando se tratando de armazenamento de energia proveniente de sistemas residenciais. Essas baterias mecânicas armazenam energia elétrica sob a forma de energia cinética, potencial ou então elástica. Um exemplo, amplamente conhecido, são as hidrelétricas, que por meio da energia potencial gravitacional contida na água represada, é convertida em energia cinética, movimentando as pás da turbina.

Logo, torna-se importante e economicamente interessante a utilização de um sistema de armazenamento para a geração próxima das cargas consumidoras, proveniente de sistemas fotovoltaicos, principalmente. E neste caso, baterias eletroquímicas não compactam diretamente com os sistemas residenciais.

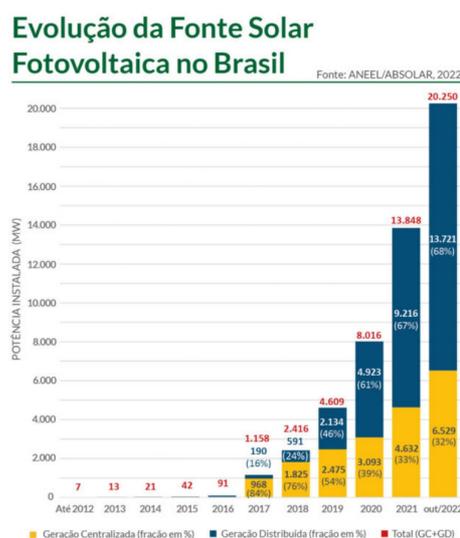
Intrinsecamente ligado a modelos de armazenamento de energia, tem-se as fontes de Geração Distribuída (GD), que constituem um percentual importante de geração de energia para o Sistema elétrico de Potência (SEP). No tópico a seguir será abordado tais sistemas GD.

## 2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

O conceito de Geração Distribuída está atrelada à geração elétrica realizada próxima ou junto aos consumidores independente da potência, tecnologia e da fonte de energia utilizada. De acordo com o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE), as tecnologias de geração buscam incluir potências cada vez menores no sistema (INEE, 2022).

A geração distribuída é formada por diversas fontes geradoras de energia, dentre elas é possível destacar a fonte solar fotovoltaica e a fonte de geração eólica. No que diz respeito à evolução da utilização dos painéis fotovoltaicos, nota-se uma crescente popularização a partir de 2017, principalmente pela utilização como geração centralizada. Portanto, atualmente a realidade é outra, de acordo com o infográfico da (ANEEL., 2022), mostrado na Figura 9, a GD constitui cerca de 68% da potência instalada em 2022.

Figura 9 – Evolução da fonte solar fotovoltaica no Brasil.



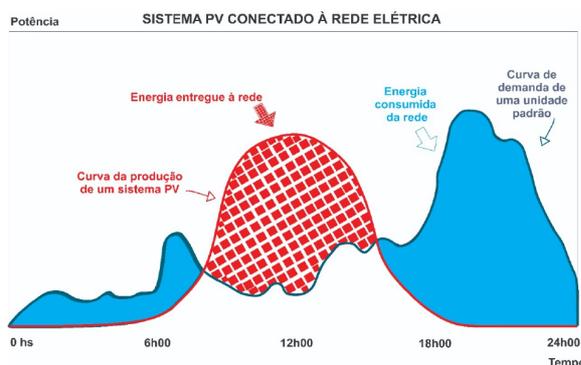
Fonte: (ABSOLAR, 2022).

No que diz respeito, a fontes de geração renovável, intrinsecamente tem-se incertezas a respeito da variação de fenômenos ambientais, que por consequência afetam a quantidade de energia gerada e quando a mesma estará disponível para o consumo. Ou seja, são fontes de energia renovável intermitentes, em que não há uma forma de controlar sua disponibilidade.

A grande questão é que a energia proveniente de painéis fotovoltaicos, possui uma curva de geração diferente da curva de consumo de um consumidor residencial, ou seja, o sistema PV, tem a geração de energia das 6h às 18h, com pico máximo de geração ao meio dia. Já a curva típica de um consumidor residencial possui o pico de demanda por volta das 21 horas, conforme ilustrado na Figura 10.

Existem duas possibilidades de obter benefícios com o excedente de geração de energia elétrica. A primeira delas, está relacionada ao sistema de injeção do excedente para a rede de distribuição local, no que diz respeito, cria-se um "crédito de energia" e consequentemente pode

Figura 10 – Gráfico de geração fotovoltaica versus a demanda de uma unidade padrão.



Fonte: (Autor).

ser utilizado nos meses subsequentes. Portanto esse sistema acaba prejudicando o sistema elétrico, e a partir de 6 janeiro de 2023 passa a valer a tarifação pelo uso do sistema de distribuição, instituída pela Lei 14.300/2022, para novos sistemas de geração fotovoltaico instalados

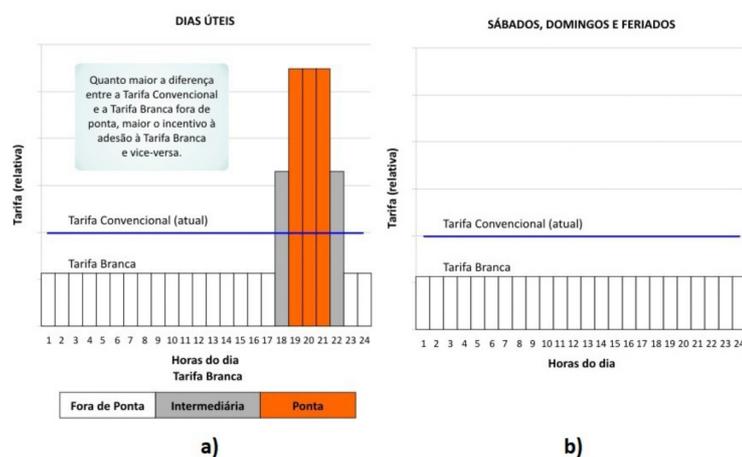
A segunda forma de solucionar a variação entre consumo e a geração, é a utilização de um sistema de armazenamento, promovendo um equilíbrio entre a energia gerada e a demanda de energia do consumidor residencial, de forma a armazenar a energia quando a produção é maior que o consumo ou então na utilização da energia armazenada, quando necessário.

Essas tecnologias de armazenamento mecânico podem ser integradas a sistemas de geração distribuída para ajudar a equilibrar a oferta e a demanda de energia elétrica, armazenando o excesso de energia produzido quando a demanda é baixa e fornecendo energia quando a demanda é alta. Isso torna-se este tipo de sistema atrativo, pelo seu tempo de vida útil elevado, e por não precisar de uma alta densidade de energia na implementação residencial.

Outro fato interessante que pode tornar a utilização de sistemas de armazenamento in-loco é a tarifação horária, tais como tarifa branca, que incentivam a alteração da curva de consumo.

A tarifação horária é um modelo de precificação em que o valor da tarifa de energia elétrica varia de acordo com o horário do consumo. Em vez de ter uma tarifa fixa ao longo do dia, a tarifa horária divide o período de 24 horas em diferentes faixas de tempo, conforme demonstrado na Figura 11, geralmente conhecidas como horas de ponta, horas intermediárias e horas fora de ponta.

Figura 11 – Comparação da tarifa branca com a convencional nos dias úteis a) e finais de semana ou feriados b).



Fonte: (LEMOS, 2017).

Nesse modelo, as horas de ponta correspondem aos períodos de maior demanda de energia, normalmente durante o dia, quando o consumo é mais intenso. As horas intermediárias são os períodos que antecedem ou sucedem as horas de ponta, com demanda e tarifas um pouco menores. Já as horas fora de ponta são os períodos de menor demanda, como durante a noite e madrugada, quando a tarifa é mais baixa.

A tarifação horária tem como objetivo incentivar os consumidores a deslocarem o consumo de energia para os horários fora de ponta, buscando uma distribuição mais equilibrada da demanda ao longo do dia. Isso pode contribuir para a melhor utilização dos recursos energéticos e a redução dos custos de geração e distribuição de energia elétrica.

Com um sistema de armazenamento de energia, os consumidores podem carregar suas baterias ou acumuladores durante as horas de tarifas mais baixas, geralmente fora de ponta. Isso envolve armazenar energia elétrica quando está disponível a um custo mais baixo. Posteriormente, durante as horas de pico ou de tarifas mais elevadas, os consumidores podem utilizar a energia armazenada em seus sistemas para atender às suas necessidades de consumo, evitando assim o consumo direto da rede elétrica durante esses períodos mais caros.

Em resumo, a tarifação horária em conjunto com sistemas de armazenamento de energia oferece aos consumidores a oportunidade de gerenciar melhor seu consumo de energia, aproveitando as tarifas mais baixas durante as horas fora de ponta e reduzindo sua dependência da rede elétrica durante as horas de pico.

### 3 SISTEMA FLYWHEEL

O sistema de armazenamento de energia através de um volante de inércia é considerado um dos mais antigos quando trata-se de sistemas mecânicos de armazenamento. Um dos exemplos mais conhecidos é a roda do oleiro, demonstrado na Figura 12, sendo um objeto rotatório que utiliza o princípio de momento de inércia para manter a energia na forma cinética (GENTA, 2014).

Figura 12 – Sistema de volante de inércia em uma roda de oleiro.

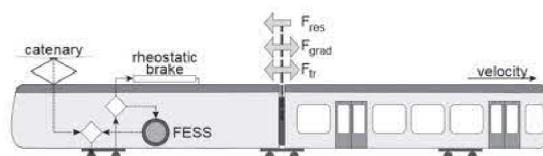


Fonte: (GENTA, 2014).

Os volantes de inércia são considerados excelentes complementos para sistemas de geração de energia elétrica. Por este motivo, a energia pode ser facilmente armazenada e drenada dependendo da quantidade de energia gerada, ou então consumida. No que se assemelha, a tecnologia pode ser mais eficiente que sistemas de ar comprimido e armazenamento de energia térmica (OLABI et al., 2021). Existem diversas aplicações para este tipo de sistema, que sofreu grandes avanços recentemente, principalmente pelas melhorias maciças na tecnologia, alguns deles serão apresentados a seguir.

O consumo de energia nos transportes ferroviários poderia ser reduzido em 31,21% com a utilização de um sistema de frenagem regenerativa, conforme a Figura 13 demonstra, com um sistema de armazenamento de energia por volante de inércia (RUPP et al., 2016). A capacidade energética da implementação de um sistema como esse tem inúmeras vantagens, quando comparada as demais, principalmente ao ciclos ilimitados de carregamento e descarregamento, bem como uma vida útil longa (OLABI et al., 2021).

Figura 13 – Sistema de armazenando de energia flywheel, para transporte ferroviário.



Fonte: (OLABI et al., 2021).

Um porta aviões americano, chamado de Gerald R. Ford, mostrado na Figura 14, possui

um sistema eletromagnético de lançamento de aeronaves, no qual precisa estar equipado com volantes de inércia para o seu funcionamento, ou seja, são responsáveis em armazenar a energia proveniente do motor do navio e descarregá-las para auxiliar na decolagem dos aviões. A tecnologia exposta trabalha a uma velocidade de rotação de 64.000 rpm, com uma alta densidade de energia (OLABI et al., 2021).

Figura 14 – Sistema eletromagnético de lançamento de aviões.



Fonte: (OLABI et al., 2021).

Sistemas que sofrem com oscilação no fornecimento de energia, com uma carga elétrica altamente variável, e que encontra-se longe da central elétrica, utilizam sistemas de volante de inércia para atenuarem a intermitência no fornecimento de energia. O que acarreta em um aumento da eficiência dos sistemas, proporcionando um fornecimento mais uniforme e contínuo de energia (OLABI et al., 2021).

Devido ao desenvolvimento industrial, associado ao crescimento da população, a procura por energia continua a aumentar (OLABI et al., 2021). Desse modo sistemas de armazenamento de energia, como o volante de inércia proporcionam vantagens e desvantagens ao seu uso, conforme a Tabela 3 mostra.

Tabela 3 – Vantagens e desvantagens de um sistema de volante de inércia.

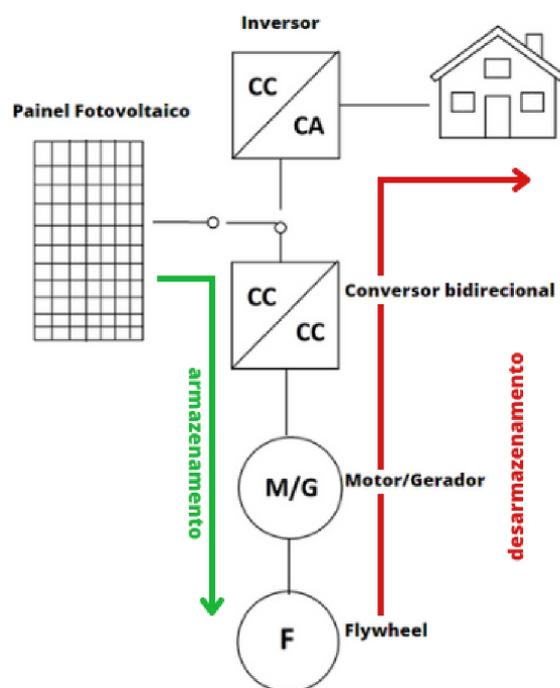
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
- Necessita de pouca manutenção.	- Durabilidade complexa.
- Ciclo de vida mais longo.	- Rolamentos de baixa perda.
- Maior profundidade de descarga.	- Tensão mecânica.
- Não apresenta riscos ambientais.	- Comparativamente, o custo é mais elevado.
- Resposta rápida de energia.	
- Densidade específica potencialmente elevada.	
- Tempo de descarga curto.	
- Capacidade eficiente de armazenamento de energia.	
- Resposta a curto prazo.	

Fonte: (Autor).

O princípio de funcionamento de um volante de inércia baseia-se em armazenar energia

em uma massa rotativa. Em certo instante, regido por um dispositivo mecânico responsável em armazenar energia elétrica sob a forma de energia cinética rotativa (AMIRYAR; PULLEN, 2017). Ou seja, as baterias mecânicas convertem energia elétrica em um movimento rotativo através de um disco de alta velocidade ligado a um motor elétrico. Esta energia armazenada pode então ser utilizada para reestabelecer a energia elétrica quando necessário, através do acoplamento de volante a um gerador (PULLEN, 2019). Na representação da Figura 15, é desenvolvido um esquema de funcionamento de um sistema de armazenamento por volante de inércia.

Figura 15 – Estrutura de funcionamento e equipamentos do sistema.



Fonte: (Autor).

O esquemático apresentado na Figura 15, configura o funcionamento mais empregado de uma flywheel, no caso de um armazenamento proveniente de painéis FV, com ênfase na utilização residencial. Neste caso, é estabelecido um fluxo de funcionamento para o sistema quando opera no armazenamento da energia no volante de inércia, e outro para a utilização do potencial armazenado, na carga, quando há necessidade de uso de energia.

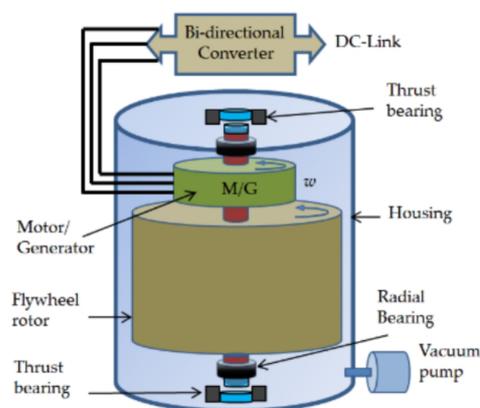
A energia de entrada utilizada no processo de armazenamento em uma flywheel normalmente é extraída de uma fonte de energia elétrica, neste caso um sistema de geração por meio de painéis fotovoltaicos é o responsável por drenar energia ao sistema, conforme representado na Figura 15. Por consequência, o excedente de energia é utilizado em um motor elétrico, para acelerar o volante de inércia. Por isso, um conversor CC-CC torna-se essencial para o funcionamento do sistema.

Um sistema de conversor CC-CC bidirecional é o responsável por elevar ou rebaixar um nível de tensão. Sua utilização tem como intuito principal manter um nível de tensão fixo e corresponde a alimentação de uma carga. Deste modo, responsabiliza-se por manter a tensão de alimentação do motor quando armazena energia no volante, da mesma forma quando opera como gerador.

O inversor é responsável em alterar uma tensão de entrada em corrente contínua (CC) e transformá-la em uma tensão de saída em corrente alternada (CA), com amplitude e frequência desejada. No que concerne, a forma de onda da saída deve ser senoidal para um inversor ideal. Para o sistema abordado, a energia cinética armazenada no volante de inércia pode ser utilizada por uma carga de corrente alternada, por meio do uso deste equipamento.

Em síntese, um sistema de armazenamento de energia através de uma flywheel é um sistema mecânico de energia usado para armazenar energia cinética. É uma roda de inércia que é acionada por um motor elétrico para girar a altas velocidades, quando o motor é desligado, o conjunto continua girando, mantendo a energia armazenada na forma cinética. No momento em que se faz necessário a utilização da energia, o motor é acionado novamente, funcionando por sua vez como um gerador, liberando assim a energia armazenada no sistema, na Figura 16 tem-se a representação de um sistema convencional.

Figura 16 – Estrutura e os componentes de um FESS.



Fonte: (AMIRYAR; PULLEN, 2017).

O volante de inércia tem a função principal de armazenar a energia proveniente de uma fonte externa na forma cinética (movimento rotacional). No que concerne, a forma (discos ou cilíndricas) e o material do rotor impactam diretamente na quantidade de energia armazenada, que é linearmente proporcional ao momento de inércia e ao quadro da sua velocidade angular. Na Figura 17, é demonstrado um tipo de volante de inércia encontrado em máquinas industriais. Vale destacar que o momento de inércia é uma função da massa do rotor e do seu fator de forma (AMIRYAR; PULLEN, 2017).

Figura 17 – Volante de inércia industrial.

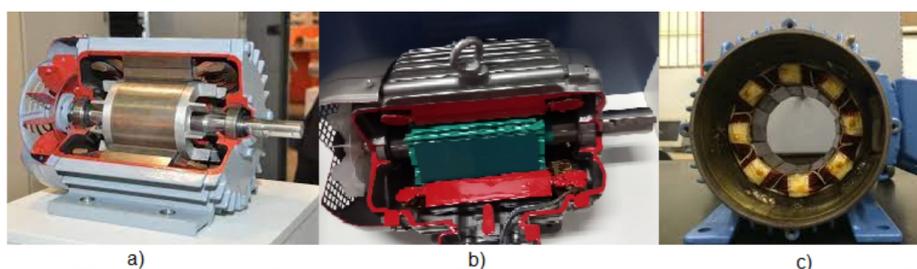


Fonte: (Autor).

O sistema de armazenamento utiliza uma máquina elétrica ou motor/gerador (MG) acoplado ao volante de inércia, com intuito de permitir a conversão de energia e o processo de carga do volante.

Máquinas elétricas como as de indução, imã permanente e a máquina de relutância variável usualmente são utilizadas para o funcionamento de uma flywheel (PENA-ALZOLA et al., 2011). Neste caso, a empregabilidade de cada um dos motores irá depender de uma série de fatores inerentes ao nível de potência, torque, velocidade e densidade de energia utilizada em cada projeto. Além do mais, dependendo da máquina elétrica a ser utilizada, o controle de velocidade pode ser mais complexo, e pode necessitar de manutenções com grande frequência. Uma representação dos motores mais utilizados é demonstrada na Figura 18.

Figura 18 – Representação de um motor de indução a), imã permanente b) e relutância variável c).



Fonte: (Autor).

Para manter o rotor fixo no lugar e diminuir as perdas por atrito, o sistema de rolamentos e mancais são essenciais. Se diferem por rolamentos mecânicos e magnéticos podendo ser utilizados em função do peso, da vida útil e menores perdas (LIU; JIANG, 2007). Os sistemas de mancais mecânicos são caracterizados por ter maior atrito quando comparados com os rolamentos magnéticos, além de necessitar de uma maior taxa de manutenção, principalmente na sua lubrificação de suas esferas, de todo modo, são os responsáveis em ocasionar uma diminuição na eficiência do sistema de armazenamento.

Os sistemas convencionais de flywheel's são compostos por diversos equipamentos interligados para o seu funcionamento, conforme listado. No entanto, não se justificam no que é

proposto por este trabalho. O sistema de volante de inércia, a ser adotado neste estudo, baseia-se em basicamente duas partes, sendo o volante de inércia a primeira delas, e o motor/gerador. As correspondentes partes devem ser projetadas, em que será abordado no próximo capítulo.

### 3.1 EQUACIONAMENTO

O princípio de funcionamento de um sistema de armazenamento de energia através do volante de inércia é estabelecido tanto pela forma quanto pelo tipo de material a ser utilizado na construção do rotor (AMIRYAR; PULLEN, 2017). A energia cinética armazenada ( $E$ ) é obtida através da equação 3.1. A energia cinética para sistemas de flywheel depende do momento de inércia  $I$  e da velocidade angular ( $\omega$ ) (MADEIRAS, 2015).

$$E = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (3.1)$$

O momento de inércia  $I$  para cilindros sólidos é obtido por meio da equação 3.2:

$$I = \frac{1}{2}Mr^2 \quad (3.2)$$

onde  $M$  é a massa do cilindro e  $r$  é o raio. A massa pode ser estabelecida pela equação 3.3:

$$M = V\rho \quad (3.3)$$

onde  $V$  representa o volume do cilindro e o  $\rho$  a densidade do material utilizado, a equação 3.4 indica o volume do cilindro ( $V$ ):

$$V = \pi Lr^2 \quad (3.4)$$

em que  $L$  representa a altura do cilindro, substituindo a equação 3.4 na 3.3 tem-se:

$$M = \pi Lr^2\rho \quad (3.5)$$

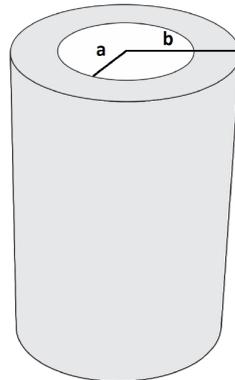
Substituindo a equação 3.5 na 3.2 obtém-se:

$$I = \frac{1}{2}r^4\pi L\rho \quad (3.6)$$

Geralmente os volantes de inércia (flywheels) são constituídos de um cilindro oco. Consequentemente o momento de inércia  $I$  para este tipo de cilindro leva em conta a diferença entre o raio externo “b” e o raio interno “a”, conforme mostra a Figura 19, e é demonstrado pela equação 3.7:

$$I = \frac{1}{2}\pi L\rho(b^4 - a^4) \quad (3.7)$$

Figura 19 – Volante de um cilindro oco.



Fonte: (Autor).

em que, “b” é o raio externo e “a” é o raio interno. Substituindo a equação 3.7 na equação 3.1 é possível obter a energia cinética armazenada (E) na flywheel, conforme a equação 3.8.

$$E = \frac{1}{4}\pi L\rho(b^4 - a^4)\omega^2 \quad (3.8)$$

Outro fator determinante para calcular a energia que pode ser entregue pela flywheel ( $\Delta E$ ) pode ser determinada levando em conta a variação de velocidade que o disco pode passar, conforme desenvolvido na equação 3.9:

$$\Delta E = E - E_{min} = \frac{1}{2}I(\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (3.9)$$

Conforme a equação 3.1, a energia armazenada (E) em uma flywheel, é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade angular ( $\omega$ ), conseqüentemente a forma mais eficiente de aumentar a energia armazenada no sistema mecânico, seria com o aumento da velocidade. No entanto, o aumento de velocidade será limitado, devido aos esforços de tensão que os materiais que a constituem estão sujeitos a suportar (DIAS, 2013).

### 3.2 VOLANTE DE INÉRCIA PARA UMA CARGA DE 1 KWH

A forma com que se estabelece o dimensionamento de um rotor de uma flywheel está diretamente relacionada ao tipo de material a ser utilizado, por ser o limitante da velocidade de rotação. Os materiais compósitos são considerados melhores para armazenamento de energia cinética, por terem baixa densidade e alta resistência à tração (DIAS, 2013).

Informações contidas na Tabela 4, demonstram uma lista dos materiais mais utilizados nos sistemas de volante de inércia.

Tabela 4 – Características de diversos materiais comumente utilizados em rotores.

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Tensile strength (MPa)	Max energy density (for 1 kg)	Cost (\$/kg)
Monolithic material 4340 Steel	7700	1520	0.19 MJ/kg = 0.05 kWh/kg	1
<i>Composites</i>				
E-glass	2000	100	0.05 MJ/kg = 0.014 kWh/kg	11.0
S2-glass	1920	1470	0.76 MJ/kg = 0.21 kWh/kg	24.6
Carbon T1000	1520	1950	1.28 MJ/kg = 0.35 kWh/kg	101.8
Carbon AS4C	1510	1650	1.1 MJ/kg = 0.30 kWh/kg	31.3

Fonte: (DIAS, 2013).

Nota-se que materiais compósitos de carbono são os que possuem maior densidade de energia, na Tabela 4 os valores estão relacionados a cada 1 kg dos variados materiais e possuem as menores densidades em comparação aos demais. Implicando de forma direta na dimensão e na eficiência do sistema de armazenamento de energia através de volante de inércia. No entanto, esses tipos de materiais detêm um custo alto de aquisição e não são facilmente encontrados.

Uma das formas de estabelecer uma análise do sistema de armazenamento mecânico, é por meio de estudos de caso. Em que, pretende-se entender o quanto a variável como o peso, o tipo de material, dimensões do volante e o seu formato são capazes de influenciar na energia armazenada ou na rotação de uma flywheel.

Para isso, pretende-se dimensionar um sistema de armazenamento de energia mecânico inicialmente para uma carga fixa de 1 kWh, neste caso utilizando como material o ferro fundido (por se tratar de um material com custo reduzido e de fácil acesso), com densidade a ser considerada de 7.700 kg/m<sup>3</sup>. A seguir serão mostrados alguns estudos de caso com diferentes abordagens.

Estudo de caso 1: consiste em encontrar a velocidade de rotação necessária para uma flywheel obter a energia cinética armazenada (E) de 1 kWh, considerando que o rotor é constituído de ferro fundido, com a forma de cilindro oco e com as dimensões do rotor estimadas de forma arbitrária.

Dados disponíveis:

$$E = 1kWh = 3,6 MJ$$

$$\rho = 7700 kg/m^3$$

$$b = \text{raio externo} = 0,25 m$$

$$a = \text{raio interno} = 0,1 m$$

$$L = 0,1 m$$

em que, o momento de inércia é calculado através da equação 3.7:

$$I = \frac{1}{2} \pi L \rho (b^4 - a^4)$$

Substituindo os dados:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 0,17700 (0,25^4 - 0,1^4)$$

$$I = 4,6037 \text{ kg.m}^2$$

Com o momento de inércia calculado e com a energia cinética armazenada (E), encontra-se pela equação 3.1, a velocidade de rotação:

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

$$3,6 \cdot 10^6 = \frac{1}{2} \cdot 4,6037 \cdot \omega^2$$

$$\omega = 11.942,16 \text{ rpm}$$

Nota-se que a velocidade é encontrada em rpm, devido ao fato da conversão de unidades realizada, neste caso, de radianos por segundo, para rotações por minuto. A massa resultante para o funcionamento do sistema pode ser obtida através do volume do rotor. Primeiro será necessário calcular o volume para os dois raios utilizados, o externo “b” e o interno “a”.

para o raio externo:

$$Vb = \pi r^2 h = 0,0196349 \text{ m}^3$$

para o raio interno:

$$Va = \pi r^2 h = 0,00314159 \text{ m}^3$$

logo o volume do cilindro é dado pela subtração de Vb por Va:

$$V = Vb - Va = 0,01649 \text{ m}^3$$

A massa necessária para o funcionamento do sistema pode ser obtida através do volume do rotor:

$$M = V \rho$$

$$M = 126,973 \text{ kg}$$

Então para este estudo de caso, para obter um armazenamento de energia de 1 kWh,

com uma volante de inércia medindo 25 cm de raio externo, 10 cm de raio interno e 10 cm de espessura, com um peso de aproximadamente 127 quilogramas a uma rotação de 11.942,16 rpm. Pode-se observar que para essas dimensões, utilizando ferro fundido como material, a quantidade de massa é consideravelmente grande, e a velocidade de rotação também é alta.

Estudo de caso 2: busca-se redimensionar o volante para que armazene a mesma energia com menor rotação. Para tanto o raio externo do volante foi alterado para 45cm.

Dados iniciais:

$$E = 1kWh = 3,6 MJ$$

$$\rho = 7700 \text{ kg/m}^3$$

$$b = \text{raio externo} = 0,45 \text{ m}$$

$$a = \text{raio interno} = 0,1 \text{ m}$$

$$L = 0,1 \text{ m}$$

Calculando o momento de inércia:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot L \cdot (b^4 - a^4)$$

$$I = 49,4766 \text{ kg.m}^2$$

utilizando a equação da energia cinética armazenada (E):

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

substituindo os dados:

$$3,6 \cdot 10^6 = \frac{1}{2} \cdot 49,4766 \cdot \omega^2$$

encontra-se a rotação do rotor da flywheel:

$$\omega = 3.642,82 \text{ rpm}$$

Novamente para obter a massa que o volante possui será necessário calcular o volume para ambos os raios. Para o raio externo:

$$V_b = \pi r^2 h = 0,06361 \text{ m}^3$$

para o raio interno:

$$V_a = \pi r^2 h = 0,00314159 \text{ m}^3$$

logo o volume do cilindro é dado pela subtração de  $V_b$  por  $V_a$ :

$$V = V_b - V_a = 0,06046 \text{ m}^3$$

A massa que forma o rotor é obtida a seguir:

$$M = V\rho$$

$$M = 465,55 \text{ kg}$$

Para uma sistema de armazenamento mecânico com dimensões de raio externo de 45 cm, raio interno de 10 cm e espessura de 10 cm consiga armazenar 1 kWh de energia, se faz necessário uma massa de 465,55 kg a uma rotação de aproximadamente 3.642,82 rpm. Quando o estudo de caso em questão é comparado com o primeiro, percebe-se que com um aumento de peso de aproximadamente de 3,65 vezes torna-se possível diminuir a velocidade de rotação em aproximadamente 3,3 vezes.

Estudo de caso 3: consiste em desenvolver um sistema para um volante de inércia de 10 polegadas, de ferro fundido, que é vendido comercialmente. Tendo como princípio o armazenamento de energia (E) de 1 kWh.

$$E = 1kWh = 3,6 \text{ MJ}$$

$$\rho = 7700 \text{ kg/m}^3$$

$$b = \text{raio externo} = b = 0,254 \text{ m}$$

$$a = \text{raio interno} = a = 0,15 \text{ m}$$

$$L = 0,15 \text{ m}$$

Calculando o momento de inércia:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 0,15 \cdot 7700 (0,254^4 - 0,15^4)$$

$$I = 6,6331 \text{ kg.m}^2$$

utilizando a equação da energia cinética armazenada (E):

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2$$

substituindo os dados:

$$3.6 \cdot 10^6 = \frac{1}{2} \cdot 6,6331 \cdot \omega^2$$

encontra-se a rotação do rotor da flywheel:

$$\omega = 9.949.41 \text{ rpm}$$

Para que, seja encontrado o valor da massa desse rotor, o processo é idêntico aos realizados anteriormente, o volume para o rotor de 10” é de:

$$V = 0,0198 \text{ m}^3$$

Consequentemente é possível obter a massa do volante de inércia:

$$M = V\rho$$

$$M = 152,46 \text{ kg}$$

Nota-se que fatores determinantes para mensurar a energia armazenada em uma flywheel, estão relacionados ao tipo de material a ser utilizado na construção do rotor, bem como, suas dimensões e a velocidade que o mesmo vai atuar. Para o caso do sistema móvel de dimensão de 10”, mostrou-se necessário uma velocidade de 9.949,41 rpm, com uma massa de aproximadamente 153 kg, para que o sistema obtivesse a capacidade de armazenamento de 1 kWh.

Estudo de caso 4: busca desenvolver uma análise, com as mesmas dimensões do rotor de 10”, constituído do material de ferro fundido, com densidade de  $7700 \text{ kg/m}^3$ . A fim de investigar o comportamento da energia cinética armazenada (E) em função da variação da velocidade de rotação ( $\omega$ ).

Todavia, o cálculo de momento de inércia é o mesmo realizado no terceiro estudo de caso, em que o resultado obtido foi:

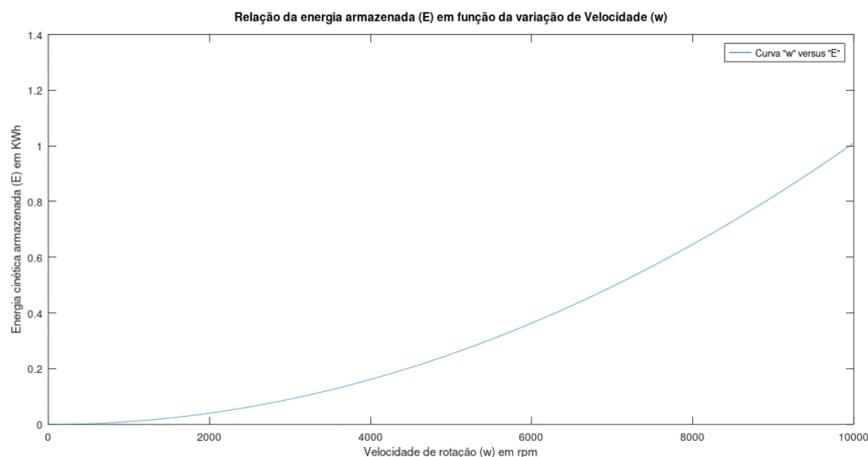
$$I = 6,6331 \text{ kg.m}^2$$

A energia cinética armazenada (E), é dada em função do quadrado da velocidade de rotação ( $\omega$ ), conforme a equação:

$$E = \frac{1}{2}.I.\omega^2$$

Deste modo, quanto maior for a velocidade de rotação do volante de inércia maior será a energia armazenada (E), por exemplo, se a velocidade de rotação for duplicada, a energia cinética armazenada será quatro vezes maior. Este tipo de representação pode ser realizada na forma gráfica, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Energia armazenada (E), em função da variação da velocidade de rotação do volante de inércia ( $\omega$ ).



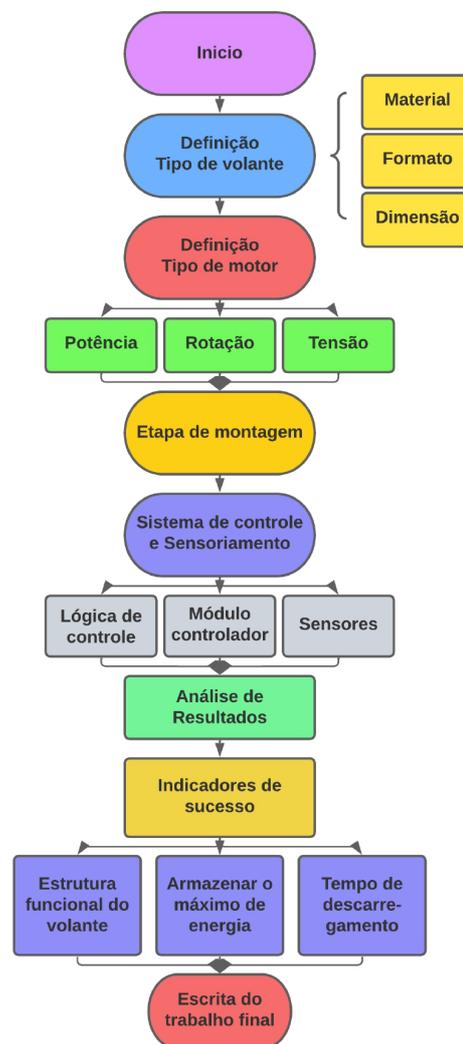
Fonte: (Autor).

Na representação da Figura 20, é possível observar que a energia armazenada na flywheel irá variar de acordo com uma velocidade teórica de rotação de 0 até 10.000 rpm, tendo em vista que os materiais que formam o sistema não alteram, o momento de inércia se mantém o mesmo também. Deste modo, o resultado de energia armazenada é obtido em função da velocidade de rotação do volante de inércia, podendo chegar próximo de 1 kWh à 10.000 rpm. No capítulo a seguir será abordado a metodologia proposta para a implementação do sistema de armazenamento.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo tem-se a descrição da metodologia proposta para a implementação de um sistema mecânico de armazenamento de energia elétrica. Desse modo, nota-se a necessidade de seguir algumas etapas para que haja um bom desenvolvimento do projeto, na Figura 21, o fluxograma com a proposta para metodologia pode ser visto.

Figura 21 – Metodologia proposta.



Fonte: (Autor).

A implementação do sistema de armazenamento consiste basicamente em duas grandes áreas. A primeira delas, é restrita a definição dos principais componentes que constituem o equipamento, sendo eles o volante de inércia, e o motor de corrente contínua. E a segunda por sua vez, esta ligada a parte de implementação da lógica de controle e sensoriamento do

comportamento do sistema, juntamente com a etapa de ensaios com diferentes configurações de funcionamento, conforme visualizado na Figura 21.

O volante de inércia, é o principal componente para o funcionamento do sistema de armazenamento mecânico de energia elétrica. Suas dimensões, assim como o material a ser utilizado e a velocidade de rotação estão diretamente relacionados a quantidade de energia a ser armazenada, na forma de energia cinética.

Outro equipamento fundamental para a implementação do sistema de armazenamento de energia, é o motor/gerador. O motor que será utilizado no trabalho é um motor de corrente contínua. Destacam-se basicamente duas etapas para o seu funcionamento: a primeira delas, em que o motor é acionado pela energia fornecida por fontes de bancada, acelerando o volante de inércia, que conseqüentemente armazena energia elétrica. Já a segunda etapa, quando a energia armazenada na forma de energia cinética impulsiona o motor, que passa a trabalhar como gerador.

No que diz respeito, o motor CC, neste caso de empregabilidade destaca-se por sua simplicidade de atuação no sistema. Pensando nisso, um dos pontos importantes para que o sistema tenha um percentual de eficiência elevada é a investigação das especificações do motor a ser utilizado, principalmente em relação a faixa de velocidade de atuação.

Na etapa de controle, o sistema irá contar com uma lógica de comando utilizando contatores e um botoeira. O principal intuito da implementação desse controle é facilitar o processo de chaveamento entre a primeira e a segunda etapa de funcionamento da flywheel. A primeira delas, está atrelada ao momento em que o conjunto de fontes de bancada fornecem energia acelerando o volante de inércia. E a segunda etapa, o processo fundamenta-se em drenar a energia cinética do volante de inércia para a carga acoplada. No que concerne, esse chaveamento ocorre através de botões, com auxílio de contatores que isolam a entrada de energia no primeiro processo, no momento em que o motor estivera funcionando como gerador, evitando um fluxo de energia que possa prejudicar os equipamentos envolvidos.

A etapa de sensoriamento, tem como principal objetivo, a definição dos tipos de equipamentos utilizados, considerando os níveis de tensão e corrente drenadas. Além do mais, o posicionamento das ponteiras faz-se importante para a retirada de dados, e compreensão dos resultados futuros.

Como forma de alcançar os objetivos do trabalho, e desenvolver os estudos, a etapa de análise dos resultados tem grande relevância. É nessa etapa que os dados obtidos são devidamente tratados para que sejam comparados e analisados. Informações como o tempo de aceleração, desaceleração, com carga e sem carga são estabelecidas, além de que, a eficiência do sistema é obtida. Concluindo assim a proposta mensurando quais indicadores de sucesso foram alcançados e o grau de satisfação de cada um deles.

#### 4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com a abordagem do estudo de caso para um sistema de armazenamento de energia de 1 kWh, com dimensionamento da massa, volume e velocidade de rotação, ficou evidente que existem duas possibilidades de funcionamento distintas para manter a energia armazenada. A primeira delas com uma massa relativamente pequena, portanto com altíssima velocidade, e a segunda delas, com uma massa grande, e uma velocidade de funcionamento reduzida.

Visto isso, notou-se que a dimensão necessária para o armazenamento proposto traria algumas limitações para ser implementada em laboratório. Logo, optou-se por encontrar um volante de inércia pronto, constituído por ferro fundido e compacto, a fim de facilitar o manuseio e o custo empregado ao mesmo.

O volante de inércia adquirido para o sistema de armazenamento de energia é comumente utilizado no acoplamento entre o motor e o sistema de transmissão de tratores. Nesse caso, conta com uma massa de 60 quilogramas e um formato típico de um volante de motor, na Figura 22 a peça é demonstrada.

Figura 22 – Volante do motor de um trator.

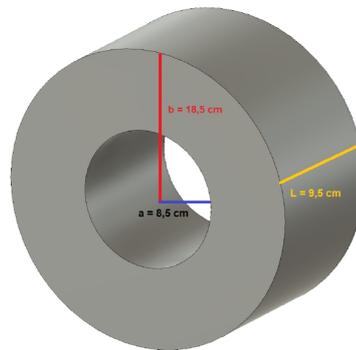


Fonte: (Autor).

Inicialmente foi preciso realizar o cálculo de momento de inércia para um sistema de armazenamento de energia utilizando esse formato de volante de inércia, considerando as dimensões e formato da peça. Para isso, fez-se necessário dividir a peça em partes, calculando o momento de inércia separadamente para logo após somá-las.

Na Figura 23, a peça foi dividida em um cilindro oco, para isso será utilizado a equação 3.7 para o cálculo do momento de inércia  $I$ , que considera a diferença entre um raio externo “b” e o raio interno “a”.

Figura 23 – Medidas do volante de inércia.



Fonte: (Autor).

Para a realização do cálculo, inicialmente considerou-se a densidade do material que é composto o volante. No caso do ferro fundido é equivalente a  $7.700 \text{ kg/m}^3$ . Considerando as medidas de raio,

$$b = \text{raio externo} = 0,185 \text{ m}$$

$$a = \text{raio interno} = 0,085 \text{ m}$$

e largura,

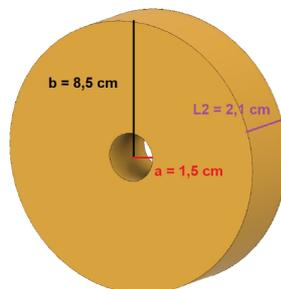
$$L = \text{largura} = 0,095 \text{ m}$$

utilizando a equação 3.7, obtêm-se o momento de inércia para o cilindro oco.

$$II = \text{momento de inércia } I = 1,2859 \text{ kg.m}^2$$

Deste modo, têm-se o respectivo valor de momento de inércia do cilindro externo da flywheel adquirida. Além disso, para o cálculo do cilindro interno, será realizado o mesmo procedimento, portanto vale salientar que os furos não serão considerados nesses cálculos. A Figura 24 representa a medida de largura, bem como os raios do novo cilindro considerado.

Figura 24 – Medidas do cilindro interno.



Fonte: (Autor).

para este caso tem-se como medidas,

$$b = \text{raio externo} = 0,085 \text{ m}$$

$$a = \text{raio interno} = 0,015 \text{ m}$$

$$L = \text{largura} = 0,021 \text{ m}$$

calculando o momento de inércia ( $I_2$ ),

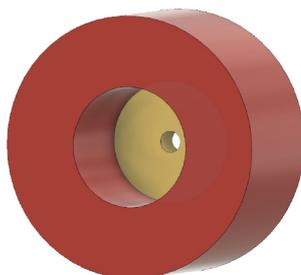
$$I_2 = \text{momento de inércia } 2 = 0,013246 \text{ kg.m}^2$$

Consequentemente o momento de inércia resultante é dado pelo somatório de  $I_1$  com  $I_2$ .

$$I = 1,299 \text{ kg.m}^2$$

Na Figura 25, é possível visualizar separadamente cada umas das peças que foram estimadas para o cálculo aproximado de momento de inércia final.

Figura 25 – Cilindros estimados para os momentos de inércia.



Fonte: (Autor).

Através do momento de inércia calculado, faz-se possível estimar a quantidade de energia elétrica que poderá ser armazenada em função da velocidade de rotação do sistema, desconsiderando quaisquer tipos de perdas. Na Tabela 5 é demonstrado a quantidade de energia variando conforme a velocidade de rotação.

Tabela 5 – Quantidade de energia armazenada (wh) em função da velocidade de rotação da flywheel.

<b>E (wh)</b>	<b>Mom. Inércia</b>	<b>Velocidade (rpm)</b>	<b>Velocidade (rad/s)</b>
0.494621	1,299	500	52.3598
1.978484	1,299	1000	104.7196
4.451567	1,299	1500	314.1588
7.913937	1,299	2000	209.4392
12.365527	1,299	2500	261.799
17.806359	1,299	3000	314.1588
24.236432	1,299	3500	366.5186

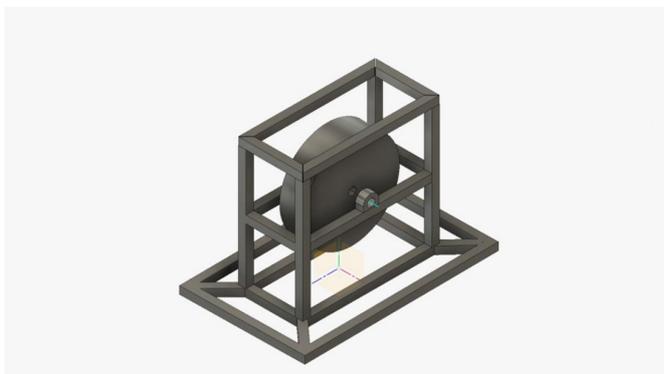
Fonte: (Autor).

Conforme a Tabela 5 demonstra, a quantidade de energia armazenada no volante de inércia adquirido, depende diretamente da velocidade de rotação que o sistema irá operar. Neste caso, o que assemelha-se é importante notar que nem sempre o volante vai estar a velocidade máxima ou nominal de operação, logo torna-se importante perceber, que a energia cinética armazenada diminui drasticamente com a velocidade.

## 4.2 ESTRUTURA

Para a implementação do sistema de volante de inercia intrinsecamente ligado ao armazenamento de energia elétrica, fora realizado um protótipo do projeto 3D no software *fusion 360* da Autodesk. A estrutura projetada, é responsável em abrigar o volante de inércia, bem como o motor elétrico, no que consiste, empregando reforços necessários para manter o sistema em um bom funcionamento, para altas e baixas velocidade. O projeto do sistema citado, é mostrado na Figura 26, contado com tubos quadrados.

Figura 26 – Projeto da estrutura 3D.



Fonte: (Autor).

O motor CC utilizado no projeto tem como características fornecidas pelo fabricante, uma potência declarada de 750W, 24V a uma velocidade nominal de 3000 Rpm. A máquina de ímãs permanentes com escovados, tem capacidade de trabalho tanto como motor bem como gerador, o que se aplica aos requisitos deste projeto. Este foi ensaiado a fim de obter as características e comportamento em ambas as forma de operação, os ensaios são apresentados no Apêndice A, deste documento.

Com a fase de projeção do sistema concluída, fez-se necessário o levantamento quantitativo dos materiais necessários na implementação do projeto, conforme expresso a seguir:

- 9 metros de tubos de metalon quadrado 40x40x1,20mm;
- 1 kg Eletrodo gerdau 6013 2,5mm;
- 1 eixo 1045 30mm;
- 2 mancais de 30mm com rolamento;

Desse modo, com todas as cotas obtidas pelo software de projeção, bem como os materiais necessários para implementação, tornou-se possível realizar a montagem da estrutura. No que consiste, o corte dos tubos foram realizados no laboratório, e a etapa de soldagem fora desenvolvida em outro ambiente. Na demonstração da Figura 27, tem-se a estrutura finalizada.

Figura 27 – Desenvolvimento da estrutura do volante de inércia.



Fonte: (Autor).

A primeira etapa de montagem, conforme mostrado na Figura 27, foi finalizada, mantendo-se muito próxima da projetada. Já a segunda etapa, consistiu na fixação do conjunto de mancais, juntamente com o eixo e o volante acoplado ao motor de corrente contínua. Neste caso, optou-se pela terceirização do serviço com a ajuda de um profissional, visto a necessidade de utilização de equipamento com torno mecânico para o enquadramento dos materiais. Na Figura 28 tem-se a parte estrutural do sistema de armazenamento concluída.

Figura 28 – Sistema mecânico de armazenamento de energia elétrica.



Fonte: (Autor).

Com as etapas mecânicas finalizadas, pode-se dar prosseguimento para a montagem do sistema elétrico, que contará com a parte de acionamento do motor, bem como a parte de atuação do sistema como um gerador de energia. No tópico a seguir, será apresentado o processo utilizado na implementação.

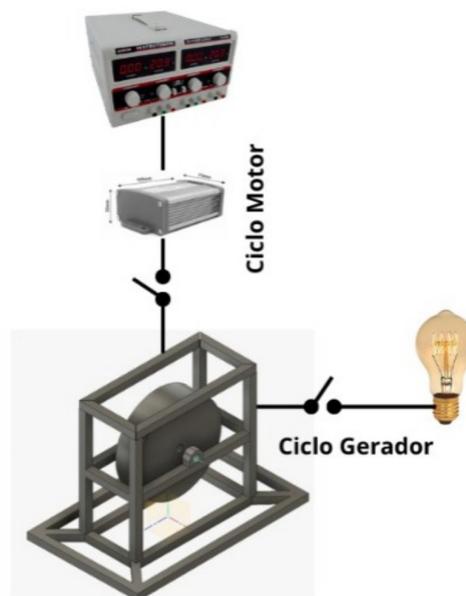
## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Quando trata-se de um sistema de armazenamento mecânico de energia elétrica é possível destacar dois grupos de funcionamento. O primeiro deles, quando o sistema utiliza energia elétrica de uma fonte externa para acelerar o volante de inércia utilizando o motor DC, e o outro, no qual o volante fornece energia rotacional para o motor, que opera como um gerador de energia. Para tal desenvolvimento, primeiro necessita-se tratar do acionamento do motor.

O acionamento do motor de corrente contínua, deu-se por um módulo controlador, que consiste basicamente em fornecer um sistema controle com modulação por largura de pulsos, conhecido com PWM. Esse tipo de sistema é favorável para a extração da maior potência do sistema sem comprometer a vida útil do motor.

Como estabelecido, o sistema é alimentado com uma tensão de 24V CC. Nesse contexto, pode-se destacar a utilização de uma lógica de controle, para alternar o funcionamento do motor para gerador, ou vice-versa. Este funcionamento pode ser visualizado através do esquemático da Figura 29.

Figura 29 – Esquemático de funcionamento do sistema.

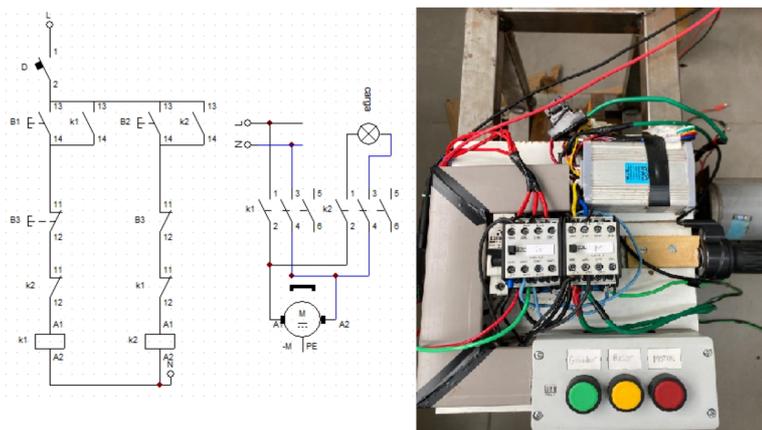


Fonte: (Autor).

A lógica desenvolvida para realizar o chaveamento do processo de acionamento do motor/gerador deu-se através do software de automação *CADeSIMU*, utilizando 2 conjuntos de contadores, um disjuntor e 3 botões de acionamento. O processo consiste basicamente em isolar o sistema de carga quando o motor é acionado para acelerar o volante de inércia, ou então, isolar

o acionamento do motor quando o mesmo comporta-se como um gerador de energia. A fim de manter a compreensão clara, a Figura 30, representa a lógica de acionamento e força de cada processo de funcionamento, através do software.

Figura 30 – Lógica de controle e força com botoeira e contatores.



Fonte: (Autor).

O botão B1 é o responsável em acionar o motor, para iniciar a aceleração do volante de inércia até a velocidade de rotação, o B3 é o reset da lógica, permitindo seccionar o sistema, e atuar somente como gerador, fornecendo energia para carga quando B2 é acionado. De todo modo, na lógica de controle foi implementado um sistema de intertravamento para evitar o acionamento de dois modos de operação ao mesmo tempo.

Logo após a projeção do sistema lógico e de força em simulação, tornou-se viável a implementação do sistema físico. A Figura 30, demonstra como foram realizadas as conexões dos equipamentos.

Os equipamentos foram fixados sobre a estrutura do sistema de armazenamento de energia, mantendo uma boa localização para o acionamento dos comandos conforme a necessidade de operação e para melhor aferição com sensores de corrente e tensão. Mediante a isso, no tópico a seguir será abordado a etapa de ensaio do sistema, operando como motor e gerador, mediante a diferentes cargas e velocidade rotação.

## 5.1 METODOLOGIA DE ENSAIOS E RESULTADOS

Com o desenvolvimento e aplicação dos equipamentos responsáveis por mensurar as variáveis de corrente, tensão na entrada e saída do sistema, cabe no momento em discriminar quais os procedimentos de ensaios e etapas a serem seguidas na retirada de informações do sistema de armazenamento de energia mecânico.

Inicialmente torna-se importantíssimo obter representações que estabeleçam a eficiência do sistema, ou seja, quanto de energia foi fornecida para o volante de inércia através do motor,

em função da energia retirada do sistema. Assim como a quantificação de dados de energia armazenada em função da velocidade de rotação do sistema. A seguir será listado um roteiro de ensaios realizados no sistema:

- Tempo de aceleração do motor para 500, 1000, 1500 e 2000 rpm.
- Quantidade de energia desprendida para cada uma das velocidades de aceleração.
- Tempo de desaceleração sem carga, para as faixas de rotação.
- Quantidade de energia fornecida para as cargas de 100, 200, 300 e 400W, em função da variabilidade de rotação do volante de inércia.

Os ensaios realizados tiveram início com a aceleração do motor. No que indica, o primeiro dos ensaios correspondeu a velocidade de rotação de 500 rpm. Logo, quando a velocidade foi alcançada o motor fora desativado possibilitando que os dados fossem coletados no osciloscópio. O tempo de aceleração foi obtido com base no arquivo .csv gerado pelo equipamento de medição. Ainda, os demais ensaios de aceleração foram realizados de forma análoga.

Em contribuição na aquisição de dados, na segunda etapa de funcionamento da bateria mecânica, foi adquirido as informações de tensão e corrente drenada para a carga, durante o tempo de desaceleração do sistema. Iniciando as análises com 500 rpm e 100W de carga, e por conseguinte incrementando a potência da carga e velocidade. Além do mais, foi mensurado o tempo de desaceleração do volante de inércia para todas as faixas de velocidade de rotação sem carga. A principal finalidade da obtenção do tempo de descarregamento de energia, está vinculado a estimativa de perdas do conjunto mecânico.

Os resultados assim como discussões dos dados obtidos referente a eficiência, tempo de aceleração e desaceleração do sistema mecânico de armazenamento de energia elétrica, serão demonstrados e analisados no tópico a seguir.

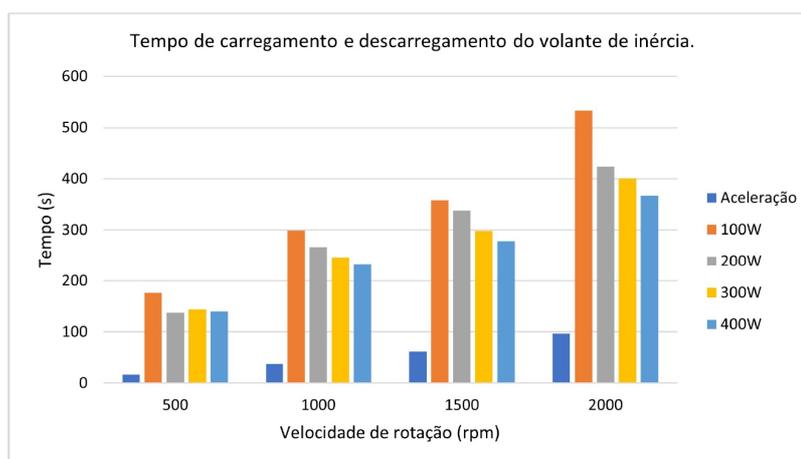
## 5.2 ESTUDO DE CASO

Nesta seção serão abordados os dados obtidos através dos ensaios, em que, os resultados podem ser visualizados através de tabelas ou gráficos mediante análise e discussões dos mesmos. No que concerne, serão representados os impactos do tempo em função do nível de velocidade e carga quando implementado no sistema de armazenamento mecânico, bem como dados de quantidade de energia disponível nas duas etapas de funcionamento.

### 5.2.1 Tempo de aceleração e desaceleração do volante de inércia

Inicialmente é analisado a quantidade de tempo que o sistema necessita em cada uma das etapas de funcionamento da flywheel. Para a maior compreensão construiu-se um gráfico representativo do tempo necessário para aceleração do volante de inércia para as velocidades pré definidas, bem como, para a desaceleração em função da quantidade de carga conectada ao sistema, e pode ser visualizado na Figura 31.

Figura 31 – Tempo de carregamento e descarregamento do volante de inércia em função da velocidade de rotação.



Fonte: (Autor).

Como o previsto o tempo de aceleração do volante de inércia é progressivo, em que tende a aumentar proporcionalmente a medida que o nível de velocidade altera-se. Em contrapartida, o tempo de desaceleração para a menor carga ensaiada é considerado o maior em todas as faixas de rotação. Isso deve-se a resistência aplicada ao movimento do gerador.

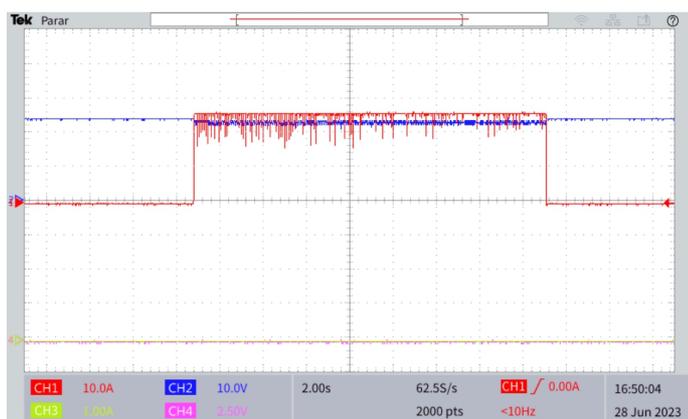
Por exemplo, quando uma carga maior é aplicada a um motor CC funcionando como gerador, o motor precisa gerar um torque maior para superar a resistência da carga. No entanto, como o motor está operando como gerador, convertendo energia mecânica em energia elétrica, a energia disponível para gerar esse torque é fornecida principalmente pela energia cinética armazenada no movimento rotacional do volante de inércia.

Conforme o motor fornece energia para superar a carga, a energia cinética do volante diminui gradualmente. Quanto mais rapidamente essa energia cinética é dissipada, mais rápido o motor desacelera. Deste modo, torna-se evidente que o tempo tende a diminuir a medida que há um aumento de carga aplicada ao gerador, conforme a representação gráfica.

### 5.2.2 Energia e eficiência

Posteriormente realizou-se a análise dos dados obtidos pelo osciloscópio no qual foram armazenados em uma mídia externa, servindo como um banco de dados dos ensaios. Os arquivos gerados pelo sistema, demonstram os níveis de tensão e corrente desprendidos durante o tempo de ensaio, para cada um dos casos. Para a aceleração do sistema, a Figura 32 representa, o comportamento das medidas de entrada até a velocidade de rotação de 500 rpm.

Figura 32 – Medidas de aceleração a 500 rpm do volante de inércia.

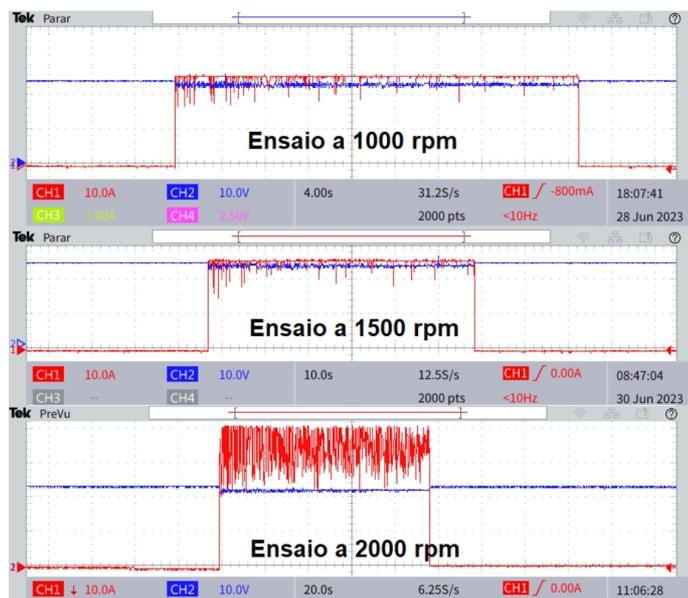


Fonte: (Autor).

A Figura 32, evidência que a corrente (CH1, vermelho) e a tensão (CH2, azul) drenada pela fonte são praticamente constantes, entre o início e o fim do processo de aceleração rotacional. No que assemelha-se, tem-se altos níveis de tensão e corrente durante o processo. Como pode ser visto, a corrente aplicada no motor é condizente com a nominal estabelecida pelo fabricante, cerca de 26 A de acordo com o resultado do ensaio e 24 V para a tensão, validando que toda a potência disponível no motor está sendo utilizada no processo de aceleração rotacional da massa. Para que o sistema atingisse a velocidade de 500 rpm precisou-se de 16,6 segundos.

Como forma de demonstrar os ensaios de aceleração para 1000, 1500 e 2000 rpm, a Figura 33 pode ser visualizada, esclarecendo o comportamento do motor, em função da variação de velocidade de rotação do volante.

Figura 33 – Medidas de aceleração a 1000, 1500 e 2000 rpm.

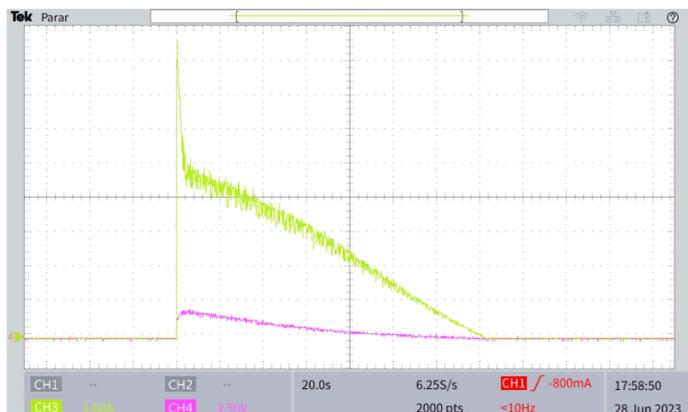


Fonte: (Autor).

Pode-se perceber por meio da Figura 33, que a grande variante é o tempo de aceleração para 1000, 1500 e 2000 rpm, em que respectivamente alcançaram 37, 61,5 e 96,8 segundos. O nível de tensão manteve-se o mesmo para todos ensaios realizados, por volta de 24V. Portanto, o mesmo não ocorre para a corrente, que no caso da aceleração a 2000 rpm, teve um elevação significativa, chegando a 41,1A, conforme os dados retirados do osciloscópio.

Ainda, outra análise realizada posteriormente, é a utilização da energia cinética presente a 500 rpm para alimentar uma carga. Novamente a forma mais honesta de mostrar o comportamento da flywheel operando como fonte de energia é utilizando a representação formada pelo osciloscópio. Os ensaios de desaceleração, consistem em acelerar o sistema até a velocidade definida e em seguida, enviar a energia para carga até que o sistema chegue em repouso, essa troca de funcionamento, é realizada pelo sistema de contadores, utilizando os botões. Na Figura 34, tem-se os dados obtidos quando o sistema é conectado a uma carga de 400W a 500 rpm.

Figura 34 – Medidas de desaceleração a 500 rpm para uma carga de 400W.



Fonte: (Autor).

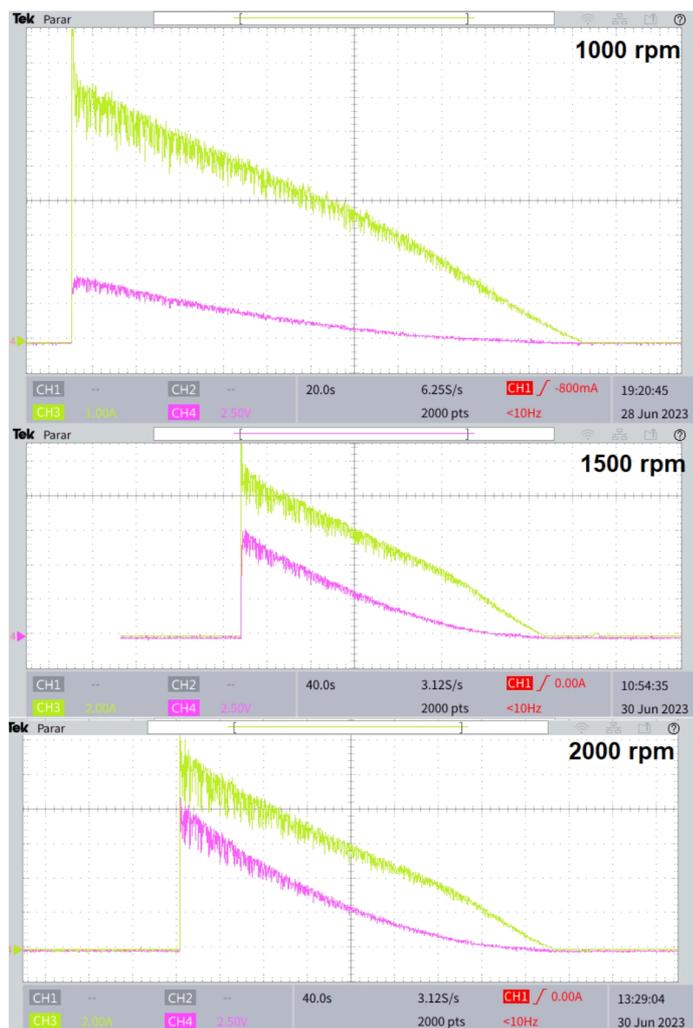
Neste caso o "CH3"(verde), demonstra a corrente drenada do gerador para a carga, e o "CH4"(rosa) a tensão. No que concerne, a tensão em um motor DC, funcionando como gerador, é proporcional a velocidade de rotação, ou seja, a 500 rpm o nível de tensão é muito pequeno, conforme os ensaios já realizados, descritos no Apêndice A. De todo modo, percebe-se que o tempo de desaceleração neste caso é superior ao de aceleração (140 segundos), no entanto, com níveis muito inferiores aos de entrada. A tensão e corrente máxima neste caso fora de 2,15V e 8,7A, respectivamente.

Outras análises realizadas na desaceleração, podem ser visualizadas na Figura 35, em que uma carga de 400W fora conectado na saída do gerador a 1000, 1500 e 2000 rpm.

Neste caso o "CH3"(verde), demonstra a corrente drenada do gerador para a carga, e o "CH4"(rosa) a tensão. No que concerne, a tensão em um motor DC, funcionando como gerador, é proporcional a velocidade de rotação, ou seja, a 500 rpm o nível de tensão é muito pequeno, conforme os ensaios já realizados, descritos no Apêndice A. De todo modo, percebe-se que o tempo de desaceleração neste caso é superior ao de aceleração (140 segundos), no entanto, com níveis muito inferiores aos de entrada. A tensão e corrente máxima neste caso fora de 2,15V e 8,7A, respectivamente.

Outras análises realizadas na desaceleração, podem ser visualizadas na Figura 35, em que uma carga de 400W fora conectado na saída do gerador a 1000, 1500 e 2000 rpm.

Figura 35 – Medidas de desaceleração para 1000, 1500 e 2000 rpm para uma carga de 400W.



Fonte: (Autor).

É possível perceber através da Figura 35 que os níveis de tensão variam consideravelmente, a medida que a velocidade do sistema altera-se, assim como os de corrente. Outra variável importante é o tempo para que o volante pare quando está em uma alta rotação, é muito superior a de 500 rpm, por exemplo, foram necessários 233, 278 e 367 segundos nas respectivas velocidades de 1000, 1500 e 2000 rpm para que o sistema atingisse repouso.

No Apêndice B, é dado as representações gráficas do ensaios realizados com sistema de volante de inércia, com cargas de 100, 200 e 300W. Em suma, pode-se perceber a variação do comportamento da flywheel com variáveis de tempo, eficiência e potência em cada uma das configurações.

A Tabela 6, refere-se ao tempo de aceleração e desaceleração quando o volante de inércia foi ensaiado em diferentes configurações, como velocidade e carga. Promovendo o levantamento de dados para mensurar o comportamento do sistema de armazenamento de energia.

Conforme estabelecido na Tabela 4, a aceleração é muito mais rápida que o tempo de

Tabela 6 – Variação do tempo em função da configuração do volante de inércia.

Velocidade		Tempo (s)				
rpm	Aceleração	100W	200W	300W	400W	a vazio
500	16.6	176	138	144	140	199.8
1000	37.3	299	267	246	233	360.6
1500	61.5	358	338	298	278	430.8
2000	96.8	533	424	401	367	510.6

Fonte: (Autor).

desaceleração. E neste caso, a medida que uma maior quantidade de carga é aplicada ao gerador, o tempo diminui de maneira gradual. Além do mais, pode-se observar que a medida que a potência da carga aumenta, o tempo tende a variar muito pouco, quando relaciona-se a carga de 300W com a de 400W. Ou seja, o comportamento do sistema, volante de inércia com o motor/gerador, para carga superiores a 400W possivelmente iria adquirir certa estabilidade.

Para que a eficiência do protótipo criado seja identificada e validada, precisa-se calcular a energia utilizada, tanto para o momento de aceleração do volante de inércia, quanto para o momento de alimentação da carga. E por meio da fração da energia de saída pela de entrada, obtém-se a eficiência. Pensando nisso, a equação 5.1 foi utilizada para desenvolver o cálculo de energia, utilizando os dados armazenados, e é demonstrada a seguir.

$$E_n = V_n \cdot I_n \cdot (t_n - t_{n-1}) \quad (5.1)$$

em que "n" representa cada dado obtido em um intervalo de aquisição do osciloscópio.

A energia total é dada pelo somatório das energias instantâneas, conforme a equação (5.2).

$$\sum_0^n = E_n \quad (5.2)$$

Com as equações estabelecidas, tornou-se possível a realização do cálculo de energia tanto para a aceleração quanto para o descarregamento do volante de inércia. Afim de manter uma boa compressão das análises fora criado a Tabela 7, com os dados de energia em função da velocidade de rotação e carga.

Tabela 7 – Dados de energia (W.s) para os ensaios realizados.

	Energia (W.s)			
	500 rpm	1000 rpm	1500 rpm	2000 rpm
Aceleração	9830	22700	37574	77635
100W	259.32	1183	2218.4	4088
200W	277.83	1707	4088	6882
300W	393.89	1865	4703.44	8401
400W	400.31	2077.69	5091	9226

Fonte: (Autor).

Na Tabela 7, é disposto os dados de todos os ensaios realizados, considerando a variação de carga para cada tipo de velocidade de rotação do volante de inércia. Percebe-se que embora o tempo de aceleração, seja muito menor quando comparado com a desaceleração, é o que mais demanda energia no sistema. Isso deve-se principalmente pela potência do motor, de 800W. Em contrapartida, a energia fornecida para as cargas é significativamente menor, comparando-a com a fornecida na aceleração, o que envolve um baixo rendimento do sistema.

Partindo do pressuposto que a quantidade de energia fornecida na primeira e segunda etapa do volante de inércia é conhecida, pode-se estabelecer a eficiência percentual inerente a cada um dos ensaios realizados, distribuídos para diferentes velocidades de rotação e cargas acopladas, para este caso utilizou-se a equação (5.3).

$$\eta = \frac{E_{sada}}{E_{entrada}} * 100(\%) \quad (5.3)$$

No contexto de ensaios obtidos, com diferentes configurações, foi possível estabelecer algumas faixas críticas de funcionamento da flywheel, bem como, a região com melhor desempenho, quando trata-se de eficiência de armazenamento de energia elétrica. Neste caso, para velocidade de operação de 500 à 1000 rpm a eficiência variou de 2,64 % à 9,15 %, com os piores cenários para cargas de 100 e 200W, os dados listados podem ser visualizados na Tabela 8. Isso identifica que o motor/gerador utilizado, possui menor rendimento quando opera com baixas velocidades e cargas.

Tabela 8 – Eficiência do sistema para diferentes configurações de carga e velocidade.

Velocidade (rpm)	Eficiência (%)			
	100W	200W	300W	400W
500	2.64	2.83	4.01	4.07
1000	5.21	7.52	8.22	9.15
1500	5.90	10.88	12.52	13.55
2000	5.27	8.86	10.82	11.88

Fonte: (Autor).

Além do mais, percebe-se que para a faixa de ensaios de 500 a 2000 rpm, a configuração que melhor se comporta é quando o sistema opera a 1500 rpm. A eficiência do sistema de armazenagem de energia elétrica, no melhor caso, com uma carga de 400W é de 13,55%. De todo modo, ao que indica, o sistema pode incorporar perdas consideráveis ao atrito e vibração em altas velocidades, prejudicando o seu funcionamento.

De maneira a estabelecer uma comparação entre o valores teóricos e práticos obtidos, a Tabela 5, mostrada anteriormente, a qual refere-se sobre a quantidade de energia que poderia ser armazenada (wh) no volante de inércia fora comparada com os valores práticos o obtidos. Neste caso, pode-se perceber os dados comparados na Tabela 9.

Tabela 9 – Energia teórica e prática armazenada no volante.

Vel. (rpm)	Et (wh)	Ep (wh)	Efic.(%)
500	0.495	0.111	22.48
1000	1.978	0.577	29.17
1500	4.452	1.414	31.77
2000	7.914	2.563	32.38

Fonte: Autor.

Para representação de energia fora utilizado as siglas Et, Ep e Efic, que respectivamente significam energia teórica, prática e o percentual de acerto, obtidas para o volante de inércia. Como pode-se identificar, os dados teóricos são significativamente maiores que os práticos, isso deve-se as perdas relacionadas ao sistema de rolamento e atrito dos componentes do motor CC. Nota-se que nas melhores das hipóteses a quantidade de energia armazenada foi de aproximadamente 32% da calculada teoricamente.

Para que tenha-se uma análise mais fidedigna a cerca das perdas relacionadas no sistema de armazenamento por volante de inércia, fora realizado uma estimativa de perdas. Esta estimativa, relaciona a quantidade de energia empregada na aceleração, para as variadas velocidade de rotação em função do tempo de desaceleração respectivo. Desse modo, busca-se através da equação 5.4, estimar a configuração que o sistema tem um melhor desempenho.

$$W = \frac{E_{entrada}}{t_{avazio}} \quad (5.4)$$

em que, W representa a potência estimada de perdas, E a energia utilizada na aceleração em w.s e t o tempo de desaceleração a vazio para cada velocidade ensaiada. Na Tabela 10, é representada as perdas estimadas do sistema.

Tabela 10 – Perdas estimadas em potência ativa (W).

Velocidade (rpm)	Perdas estimadas (W)
500	49.199
1000	62.951
1500	87.219
2000	152.047

Fonte: Autor.

Como pode-se observar na Tabela 10, a estimativa de perdas deu-se de forma acentuada conforme a velocidade de funcionamento foi elevada. À medida que a velocidade de rotação aumenta, as forças de atrito nos rolamentos e engrenagens também aumentam. Essas forças de atrito convertem parte da energia cinética rotacional em calor, resultando em perdas mecânicas, neste caso, resultando em um valor de aproximadamente 150W a 2000 rpm.

Os ensaios conduzidos foram limitados a 2000 rpm, devido à observação de instabilidade na estrutura do volante de inércia em velocidades mais altas. Conforme previamente mencionado, a rotação nominal do motor permitiria alcançar 3000 rpm.

## 6 CONCLUSÃO

Com o avanço da geração de energia elétrica próxima as cargas, torna-se de suma importância a utilização de sistemas de armazenamento de energia, com uma boa eficiência e longa vida útil. Neste caso, os sistemas de armazenamento de energia por volante de inércia, tornam-se mais atrativos aos sistemas de armazenamento convencionais, no entanto, não existem estudos para o armazenamento em longos períodos de tempo.

Nesse sentido, este trabalho apresentou uma metodologia capaz de avaliar um sistema mecânico de armazenamento de energia elétrica, através de um volante de inércia. Desta forma, o sistema mecânico teve como propósito realizar ensaios de armazenamento de energia, com diferentes configurações de carga e velocidade. A utilização da flywheel em conjunto com a estrutura mecânica demonstram-se de vital importância, principalmente devido a robustez, por ser um sistema compacto e com elevada vida útil.

Através dos ensaios realizados na flywheel, percebe-se que a energia cinética armazenada no sistema é dependente do momento de inércia da massa rotativa. Deste modo, a massa de ferro fundido com tais dimensões tem como limitação o armazenamento de energia elétrica, assim como o tempo de descarregamento. Destaca-se que houve uma significativa variação entre a capacidade de armazenamento teórica e a obtida na prática, visto que, foram desconsideradas quaisquer perdas mecânicas inerentes ao cálculo do sistema.

Por meio dos ensaios realizados, com diferentes configurações de carga e velocidade de rotação do volante de inércia, pode-se observar a faixa de melhor comportamento do equipamento. Neste caso, estando relacionada a uma carga e velocidade específica de funcionamento. Todavia, quando o sistema é operado de outra forma acaba perdendo ainda mais rendimento.

Quando relaciona-se a quantidade de energia injetada no sistema mecânico com a extraída, há uma grande discrepância de valores. No que estabelece, a eficiência é comprometida pelas vibrações e rolamentos formados pelo conjunto do sistema. Não desconsiderando as perdas relacionadas aos enrolamentos do motor de corrente contínua.

No que refere-se a implementação do sistema de armazenamento de energia elétrica, os objetivos propostos foram atingidos. No entanto, em relação aos resultados obtidos, melhorias são sugeridas, conforme é descrito na seção 6.1, deste modo, para que haja um aprimoramento do trabalho, deve-se ter uma melhoria na eficiência do mesmo. Contudo, é factível descrever que o trabalho em questão, teve como desafios a construção da parte estrutural/mecânica em que foi concentrada a maior parte do trabalho.

## 6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se a realização de estudos adicionais para aprimorar o trabalho realizado, conforme indicado a seguir:

- Balanceamento da estrutura e reforços estruturais do volante de inércia e acoplamento do motor;
- Desenvolvimento de ensaios com cargas superiores a 400W, com intuito principal de estabelecer curvas características do volante de inércia, ou em qual configuração a flywheel comporta-se melhor;
- Implementação de um sistemas de conversor CC-CC, para a substituição das contadoras e botoeira.
- Implementação de um sistema de medição de velocidade integrado;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABSOLAR. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTO-VOLTAICA. **Panorama da Solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. 2022. <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>.
- AMIRYAR, M. E.; PULLEN, K. R. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. **Applied Sciences**, MDPI, v. 7, n. 3, p. 286, 2017.
- ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica - Tarifa Branca**. 2022. <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/tarifa-branca>.
- BHUIYAN, F. A.; YAZDANI, A. Energy storage technologies for grid-connected and off-grid power system applications. In: IEEE. **2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference**. [S.l.], 2012. p. 303–310.
- BUENO, A.; BRANDÃO, C. Visão geral de tecnologia e mercado para os sistemas de armazenamento de energia elétrica no Brasil. **Associação Brasileira de Armazenamento e Qualidade de Energia**, 2016.
- CHOUDHURY, S. Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, Wiley Online Library, v. 31, n. 9, p. e13024, 2021.
- DIAS, C. R. **Dimensionamento de um Sistema UPS Flywheel**. 2013. Tese (Doutorado) — Instituto Politecnico do Porto (Portugal), 2013.
- EMBARCADOS. **Baterias de Níquel-Metal Hidreto**. 2022. <https://embarcados.com.br/baterias-de-niquel-metal-hidreto/>.
- FILHO, W. P. B.; AZEVEDO, A. C. S. de. Geração distribuída: Vantagens e desvantagens. **II Simpósio de Estudos e Pesquisa em Ciências Ambientais na Amazônia**, v. 2, p. 126–135, 2013.
- FREIRE, F. **O que são os sistemas de armazenamento de energia?** 2019. <https://www.shareenergy.com.br/o-que-e-sistema-de-armazenamento-de-energia/>.
- GENTA, G. **Kinetic energy storage: theory and practice of advanced flywheel systems**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2014.
- IEC, I. E. C. **Electrical Energy Storage**. 2011. <http://www.iec.ch/>.
- \_\_\_\_\_. **Electrical Energy Storage**. 2015. <http://www.iec.ch/>.
- INEE. **INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA - O que é Geração Distribuída**. 2022. [http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp?Cat = gd](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp?Cat = gd).
- LEMOS, I. P. Medidor de energia para avaliação da adesão à tarifa branca em smart grids. PUC-Campinas, 2017.
- LIU, H.; JIANG, J. **Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability**. [S.l.]: Elsevier, 2007. 599–604 p.

LUO, X. et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied energy**, Elsevier, v. 137, p. 511–536, 2015.

LUO XING E WANG, J. e. D. M. e. C. J. **Visão geral do desenvolvimento atual em tecnologias de armazenamento de energia elétrica e o potencial de aplicação na operação do sistema de energia**. [S.l.]: Elsevier, 2015. 511–536 p.

MADEIRAS, A. J. C. **Utilização de uma flywheel como sistema de armazenamento de energia para veículos elétricos/híbridos**. 2015. Tese (Doutorado), 2015.

MARTINS, M. A. Projeto tres: Redes isoladas com elevada penetração de energia eólica utilizando volantes de inércia. Em Programa de Cooperação Transnacional MAC 2007-2013, 2011.

MEDINA, P. et al. Electrical energy storage systems: technologies' state-of-the-art, techno-economic benefits and applications analysis. In: IEEE. **2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences**. [S.l.], 2014. p. 2295–2304.

OLABI, A. G. et al. Critical review of flywheel energy storage system. **Energies**, MDPI, v. 14, n. 8, p. 2159, 2021.

PENA-ALZOLA, R. et al. **Review of flywheel based energy storage systems**. 2011. 1–6 p.

PULLEN, K. R. The status and future of flywheel energy storage. **Joule**, Elsevier, v. 3, n. 6, p. 1394–1399, 2019.

RENEWABLE. **Big batteries are all the rage, but this one's 16 years old**. 2019. <https://www.renewableenergyworld.com/storage/big-batteries-are-all-the-rage-but-these-ones-16-years-old/gref>.

RUPP, A. et al. Analysis of a flywheel energy storage system for light rail transit. **Energy**, Elsevier, v. 107, p. 625–638, 2016.

SERRA, E. T. et al. **Armazenamento de energia: situação atual, perspectivas e recomendações**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SILVA, A. C. da. **Utilização de sistemas de armazenamento de energia para melhoria das condições de estabilidade de redes isoladas**. 2015.

\_\_\_\_\_. **Utilização de sistemas de armazenamento de energia para melhoria das condições de estabilidade de redes isoladas**. 2015.

SILVA, J. L. de S. et al. Análise do crescimento da geração distribuída: Estudo de caso do Brasil com ênfase no estado de Minas Gerais. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 10, n. 1, p. 169–169, 2018.

STREMA. **Li-Ion DLR 18650 (3.7V-2200mAh)**. 2022. <https://stremabaterias.com.br/produto/modelo/117/>.

## APÊNDICE A – ENSAIO DO MOTOR DC COMO GERADOR

### A.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Um motor de ímãs permanentes pode ser usado como gerador, aproveitando a capacidade dos ímãs permanentes de produzir um campo magnético estável. Quando o motor é acionado externamente (por exemplo, girando o eixo manualmente), ele atua como um gerador eletromagnético, convertendo energia mecânica em energia elétrica.

O ensaio de um motor DC operando como gerador é realizado para determinar as características elétricas do motor quando está funcionando como uma fonte de energia, convertendo energia mecânica em energia elétrica. Esse ensaio é importante para avaliar a eficiência, a capacidade de geração de tensão e a resposta do motor como gerador, visto que o mesmo irá atuar tanto como motor quanto como gerador, no sistema de armazenamento de energia mecânica. Na Figura 36, é apresentada algumas características nominais do motor DC, disponibilizada pelo fabricante.

Figura 36 – Características técnicas do motor DC de 750W.

<b>DADOS TÉCNICOS (MB750W24)</b>	
VOLTAGEM (DC)	24V
CORRENTE (máx)	30A
RPM (velocidade)	3000 RPM
TORQUE	2,35 Nm
POTÊNCIA	750W
PESO	4 Kg

Fonte: (Autor).

O procedimento básico para realizar esse ensaio envolve o acionamento do motor por uma fonte de energia mecânica, como um motor de indução, uma turbina hidráulica ou uma fonte de força externa. Na proposta em questão, um motor de indução será utilizado como fonte de energia mecânica. Na Figura 37, tem a representação do motor utilizado, bem como as informações disponibilizadas pelo fabricante.

Figura 37 – Motor de indução de 2CV - WEG.



Fonte: (Autor).

Neste caso, identifica-se que o motor de indução deverá ser acionado por uma fonte trifásica, com o auxílio de um inversor de frequência. Esse dispositivo converte a frequência de alimentação elétrica fornecida ao motor, permitindo controlar sua velocidade de rotação de forma precisa. o inversor utilizado foi o CFW500 da WEG, podendo atuar nas faixas de potências de 0,25 a 175 cv, auxiliando no controle de velocidade e torque em motores de indução trifásicos.

O equipamento inicialmente precisou ser alimentado, com três fases (L1, L2 e L3), com tensão entre fases de 380 V. A configuração dos parâmetros inerentes ao equipamento foram realizadas de acordo com as especificações nominais do motor de indução, como: tensão de saída, corrente de saída, frequência nominal, rotação nominal do motor, fator de potência, potência entre outras mais.

Todavia, o motor de indução pode entrar em funcionamento juntamente com o inversor de frequência. No que estabelece, torna-se prático a variação da velocidade de rotação, alterando apenas um parâmetro de forma manual, neste caso a frequência. Para dar início às análises, é preciso realizar o acoplamento dos eixos dos motores para obtenção de medidas.

Entretanto, conforme mostrado na Figura 37, a rotação nominal do motor de indução, conforme mostra a placa, é de 1740 rpm, sendo que o motor DC pode operar até 3000 rpm. Com este impasse mecânico, adotou-se duas metodologias para realizar as análises e retiradas de medidas do sistema. A primeira delas foi construir um acoplador por meio da impressora 3D, e ensaiar até a velocidade nominal de 1740 rpm, e a segunda, estaria ligada a utilização de um sistema de redução de polias (2:1).

Para o desenvolvimento do acoplador, para a primeira metodologia, foi utilizado uma ferramenta de desenho em três dimensões do software Autodesk Fusion 360. Para tal desenvolvimento foi necessário desenvolver dois diâmetros diferentes. O projeto da peça desenvolvida na ferramenta computacional bem como a impressão já acoplada entre os motores, são demonstradas na Figura 38.

Figura 38 – Desenvolvimento do sistema de acoplamento com relação 1:1.



Fonte: (Autor).

Com o sistema de acoplamento concluído, e o inversor de frequência configurado para o motor de indução, os ensaios foram realizados, no tópico a seguir será descrito as primeiras análises realizadas do gerador, sem carga.

## A.2 ENSAIO A VAZIO

Sem carga, o gerador de ímãs permanentes pode ser avaliado observando a tensão gerada em relação à velocidade de rotação. Os dados podem ser obtidos conectando-se um voltímetro aos terminais de saída do gerador enquanto ele é acionado manualmente em diferentes velocidades. Isso permitirá construir uma curva de tensão versus velocidade, que mostrará como a tensão gerada varia com a rotação. Na Tabela 11, é distribuído os valores de tensão versus velocidade de rotação dependente da velocidade rotação.

Tabela 11 – Dados de tensão versus velocidade, obtidos no ensaio a vazio do motor DC.

Rotação (RPM)	Tensão (V)
100	0,68
200	1,353
400	2,715
600	4,055
800	5,41
1000	6,77
1200	8,1
1400	9,45
1600	10,79
1800	12,8

Fonte: Autor.

Por meio dos dados obtidos, torna-se evidente, que a velocidade de rotação do motor de ímãs permanente é proporcional à tensão de saída. Além disso, entende-se que a tensão de saída tende a aproximar-se dos 24 V fornecidos pelo fabricante, quando opera como um motor.

Para traçar as curvas características do motor, funcionando como um gerador e avaliar o seu desempenho em diferentes condições de operação, torna-se necessário a realização de ensaios até a velocidade nominal do equipamento. Neste caso, o sistema de polias utilizado foi

do tipo “V”, com uma relação de 2:1, ou seja, a velocidade de rotação do gerador, sempre será o dobro da disposta na ponta do eixo do motor de indução.

Vale ressaltar que a relação de transmissão ou relação de velocidade 2:1, em que polia que é movida tem o dobro de velocidade da polia motora, a relação de força é inversamente proporcional, ou seja, a força recebida na polia menor é dada em uma fração de  $\frac{1}{2}$ , comparada a outra. De todo modo, o sistema implementado pode ser visualizado na Figura 39.

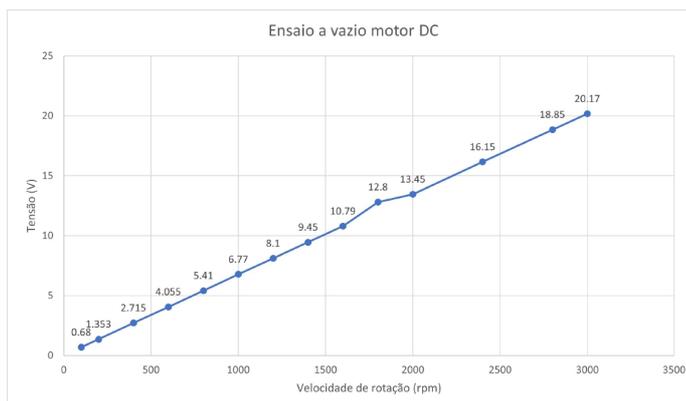
Figura 39 – Sistema de polias 2:1 para o acoplamento dos motores.



Fonte: (Autor).

De maneira análoga à realizada anteriormente, foi ensaiado o gerador até a velocidade nominal, obtendo dados de tensão a vazio em função da variação de velocidade de rotação. Conforme demonstrado no Figura 40.

Figura 40 – Sistema de polias 2:1 para o acoplamento dos motores.



Fonte: (Autor).

Observa-se que a tensão máxima de saída, sem carga, em rotação nominal é de aproximadamente 20V. No entanto, a tensão fornecida pela placa de identificação do motor e a tensão de saída do gerador podem ter pequenas diferenças devido a fatores como perdas de resistência ou características específicas do circuito externo ao qual o gerador está conectado. Considerando tais características, pode-se traçar um comportamento específico do motor quando opera

como gerador. O ensaio com carga também implica em fatores importantes para descrever o comportamento do gerador, e será explorado de maneira cuidadosa, no tópico a seguir.

### A.3 ENSAIO COM CARGA

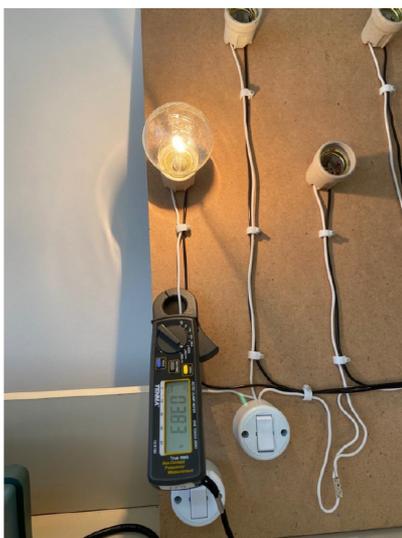
O ensaio de um motor funcionando como gerador, com carga é realizado para avaliar o desempenho elétrico do motor quando está convertendo energia mecânica em energia elétrica. Nesse ensaio, uma carga é conectada ao motor para simular a demanda de energia e medir as características elétricas resultantes.

Com carga, além da tensão gerada nos terminais de saída do motor, é importante medir a corrente elétrica de saída do gerador. Isso pode ser feito conectando-se um alicate amperímetro nos terminais de saída do equipamento. Novamente varia-se a velocidade de rotação do eixo, a fim de obter-se a tensão e corrente em função de cada ponto.

No projeto em questão, a carga utilizada foi do tipo resistiva, neste caso lâmpadas incandescentes de 24V, com potência estabelecida pelo fabricante de 100W. O que assemelha-se ao motor de ímãs permanentes tem uma potência declarada de 750W. Desse modo, busca-se realizar uma análise juntamente com levantamento de dados para identificar o comportamento do motor em função da variação de carga.

O sistema de carga, vai contar com um quadro com soquetes de lâmpadas e interruptores, para realizar o chaveamento ordenado de carga, para a obtenção de dados. A sequência de cargas utilizadas foi de 100W, 200W e 300W. Na Figura 41, pode-se observar a medição de corrente para carga de 100W.

Figura 41 – Ensaio do gerador com carga de 100W.



Fonte: (Autor).

O intuito principal da medição de corrente e tensão na saída do gerador, está intrinsecamente relacionada à compreensão da capacidade de geração do motor. Os dados obtidos nos ensaios com carga foram dispostos na Tabela 12, podendo notar a variação das tensões de saída com e sem carga conectada.

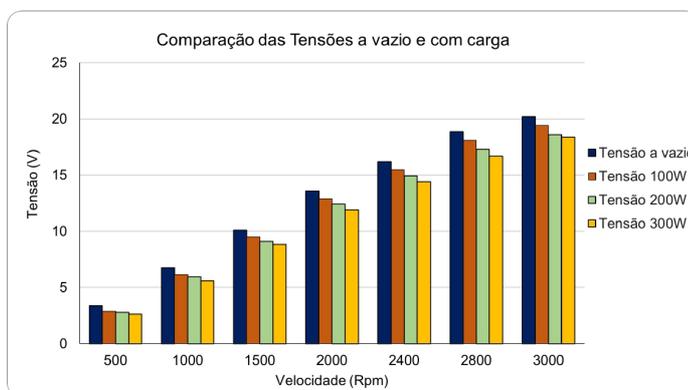
Tabela 12 – Dados de tensão versus velocidade, obtidos no ensaio com carga do motor DC.

Carga	Medidas	500	1000	1500	2000	2400	2800	3000
100W	A vazio (V)	3,4	6,77	10,1	13,58	16,2	18,87	20,19
	Com carga (V)	2,9	6,15	9,5	12,9	15,47	18,1	19,42
	Corrente	1,41	2,06	2,6	3,06	3,34	3,64	3,78
200W	A vazio (V)	3,4	6,77	10,1	13,58	16,2	18,87	20,19
	Com carga (V)	2,8	5,94	9,1	12,43	14,91	17,3	18,6
	Corrente	2,8	4,17	5,2	6,03	6,69	7,2	7,52
300W	A vazio (V)	3,4	6,77	10,1	13,58	16,2	18,87	20,19
	Com carga (V)	-	-	-	-	-	-	18,37
	Corrente	-	-	-	-	-	-	11,22

Fonte: Autor.

As informações pertencentes aos ensaios com carga, foram dispostas considerando a variação de velocidade de rotação do gerador. Percebe-se que, quando comparado às tensões sem carga, há uma pequena variação, ou também chamado de afundamento de tensão à medida que a carga é adicionada. Os dados coletados durante o ensaio são utilizados para traçar as curvas características do motor como gerador, como um gráfico de comparação entre tensões, a curva de corrente versus carga, curva de tensão versus carga. Essas curvas fornecem informações importantes sobre o desempenho do motor como gerador em diferentes condições de operação. No Figura 42, é representado os níveis de tensão em decorrência da variação de velocidade e carga.

Figura 42 – Comparação das tensões a vazio e com carga no gerador DC.



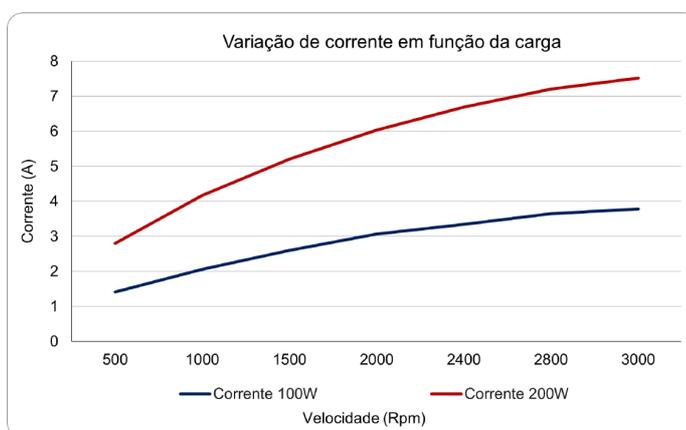
Fonte: (Autor).

Na representação gráfica, é possível visualizar os níveis de tensão distribuídos em função da velocidade de rotação do gerador e a carga conectada ao mesmo. O afundamento de tensão

de um gerador quando ensaiado com diferentes cargas refere-se a diminuição da tensão de saída quando ocorre um aumento na corrente demandada pela carga. Isso pode ocorrer devido a várias razões, como resistência interna do gerador e as perdas nos componentes.

A magnitude da corrente gerada depende de vários fatores, incluindo a velocidade de rotação do motor, a intensidade do campo magnético, a resistência dos condutores e a carga conectada ao gerador. À medida que a carga no gerador varia, a corrente também se ajusta para atender às demandas da carga. Os dados de corrente correlacionados com velocidade de rotação e carga, foram dispostos graficamente conforme mostrado na Figura 43.

Figura 43 – Corrente em função da velocidade de rotação e carga.



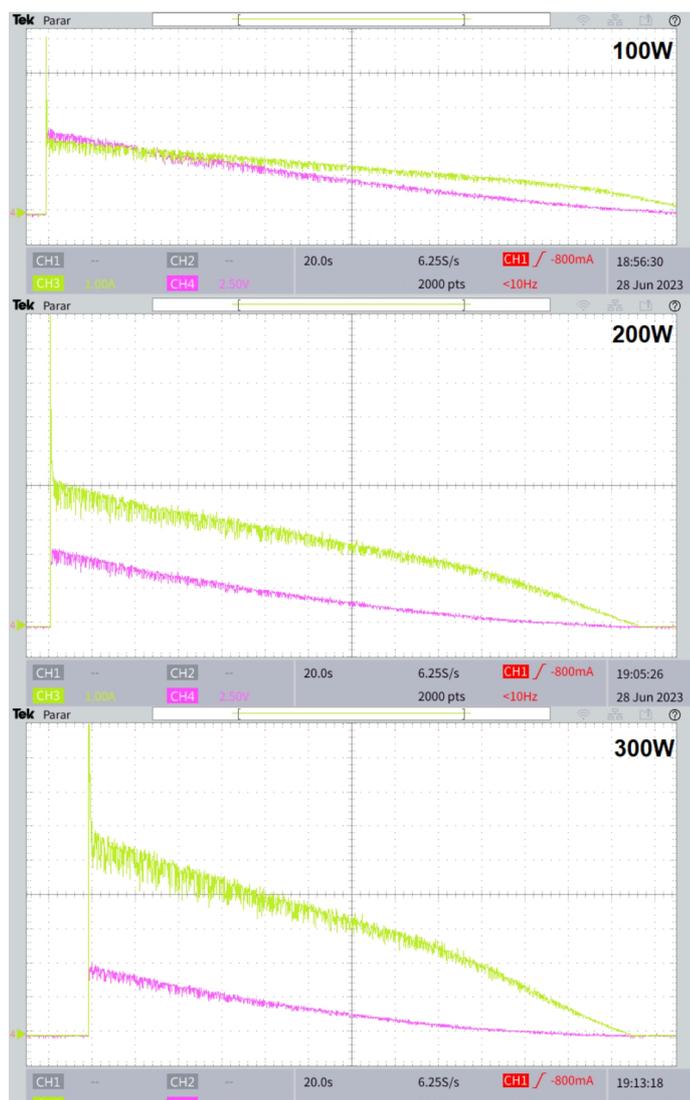
Fonte: (Autor).

Como pode ser observado, as grandezas de carga e resistência elétrica aumentam em decorrência uma da outra. Isso resulta em uma diminuição da tensão disponível para manter a velocidade de rotação do motor. Como resultado, a corrente gerada aumenta para compensar a queda na tensão e fornecer energia à carga.

## APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DA FLYWHEEL COM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE VELOCIDADE E CARGA

Os demais ensaios realizados no sistema de volante de inércia, com a configuração de desaceleração com as cargas de 100, 200 e 300W para 1000 rpm, são mostrados na Figura 44. Os dados obtidos foram retirados do osciloscópio do laboratório.

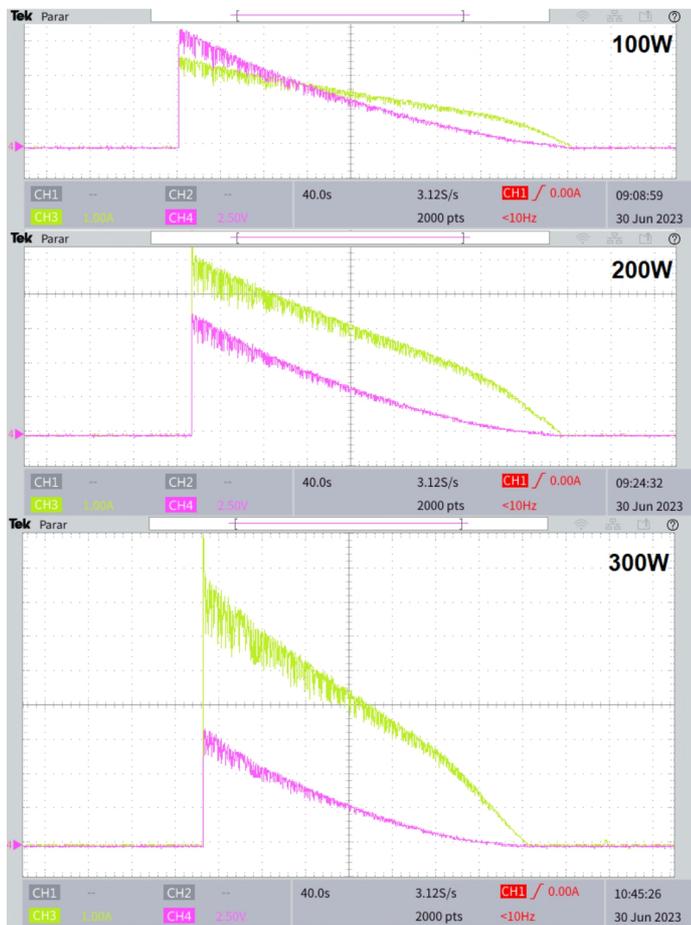
Figura 44 – Ensaio de desaceleração a 1000 rpm, com carga de 100, 200 e 300W.



Fonte: (Autor).

Representação gráfica do sistema quando desacelerado a 1500 rpm, com as respectivas cargas mostradas no ensaio anterior, podem ser visualizados na Figura 45.

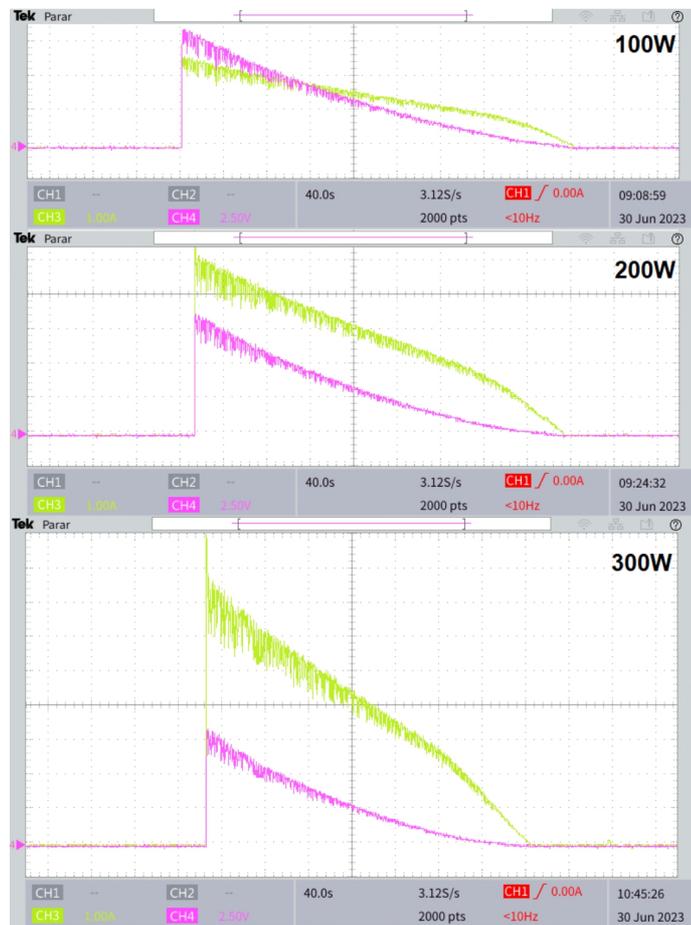
Figura 45 – Ensaio de desaceleração a 1500rpm, com carga de 100, 200 e 300W.



Fonte: (Autor).

E por fim, o ensaio foi realizado a velocidade de rotação de 2000 rpm, na Figura 46, tem-se a representação gráfica dos resultados obtidos.

Figura 46 – Ensaio de desaceleração a 2000 rpm, com carga de 100, 200 e 300W.



Fonte: (Autor).