

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

1<sup>st</sup> Éverton Gomes Campos  
Universidade Federal de Santa Maria  
UFSM-CS  
Cachoeira do Sul, Brasil  
everton.campos@acad.ufsm.br

2<sup>nd</sup> Paulo César Vargas Luz  
Universidade Federal de Santa Maria  
UFSM-CS  
Cachoeira do Sul, Brasil  
paulo.c.luz@ufsm.br

**Resumo** — O armazenamento de energia elétrica desempenha papel fundamental em diversos setores da engenharia elétrica. Algumas demandas como o deslocamento de ponta em cargas industriais, muitas vezes conta com tecnologias de armazenamento a base de baterias eletroquímicas, ou ainda sistemas de geração a base de combustíveis fósseis, cenário este que pode se expandir para consumidores residenciais devido a tarifação horária. O alto custo de instalação de sistemas de armazenamento de energia, vida útil relativamente curta e o apelo pela descarbonização do sistema elétrico, levantam a necessidade de estudos direcionados a sistemas de armazenamento de energia baseados em tecnologias alternativas. Neste contexto, armazenamento de energia na forma de energia mecânica tem suas características evidenciadas. Sistemas mecânicos para armazenamento de energia, tais como na forma elástica, potencial gravitacional ou cinética, possuem elevada vida útil, robustez e ainda não possuem um impacto ambiental, quando comparado as baterias eletroquímicas. Assim, este trabalho apresenta a análise, projeto e implementação de um sistema para armazenamento de energia elétrica na forma de energia cinética. Neste sistema foi possível armazenar 2,563 Wh. A estrutura conta com volante de 60 Kg que foi acelerado até 2000 rpm.

**Palavras-chave** – Armazenamento de energia, energia cinética, flywheel, tecnologia alternativa.

## I. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência, consiste em grandes centrais de geração e uma extensa rede de linhas de transmissão e distribuição, o qual é conhecida como geração centralizada de energia [1]. Contudo, a maneira de estruturar o crescimento da produção de eletricidade tornou-se extremamente relevante ao considerar a introdução de novas tecnologias para significativa redução nos custos de energia elétrica. A implementação de sistemas de geração situados próximo aos pontos de consumo, representa o conceito de Geração Distribuída (GD) [2].

Globalmente, existem diversas tecnologias de sistemas de armazenamento de energia em diferentes estágios de desenvolvimento [3]. As baterias eletroquímicas convencionais são uma das tecnologias mais amplamente adotadas, onde as células eletroquímicas convertem energia química armazenada em energia elétrica [4]. Além disso, existem tecnologias de armazenamento mecânico que operam por meio da energia potencial (como armazenamento hidráulico e ar comprimido) e energia cinética (como volantes de inércia). As centrais hidrelétricas com bombagem, sistemas de compressão de ar e volantes de inércia são exemplos desse tipo de tecnologia,

frequentemente utilizados em locais remotos devido à sua alta eficiência e confiabilidade.

Os sistemas de armazenamento de energia por meio de volantes de inércia utilizam o conceito de armazenar energia mecânica na forma de rotação. Esses sistemas geralmente consistem em uma massa cilíndrica em rotação, cuja energia armazenada está relacionada diretamente ao momento de inércia (que depende da massa e formato do cilindro) e ao quadrado da velocidade angular. Quando a energia elétrica é fornecida ao sistema, o motor/gerador (M/G) entra em ação: primeiro, acelerando o volante durante o processo de carga e, em seguida, funcionando como gerador para converter a energia mecânica do volante em energia elétrica quando a massa está girando [5]. Esse tipo de sistema de armazenamento pode ser conectado ou não à rede elétrica, oferecendo flexibilidade na utilização da energia armazenada.

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 [5].

Diante deste contexto, este artigo apresenta um estudo a respeito do desenvolvimento de um setup para armazenamento de energia elétrica por meio de 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.

Destá maneira, a presente seção deste artigo apresentou a contextualização e objetivos da referida pesquisa. Na seção II, é apresentado os conceitos e o funcionamento da *flywheel*. Na seção III, é indicado a metodologia utilizada para a elaboração do artigo. A seção IV, apresenta os estudos de caso realizado. Os resultados são demonstrados na seção V. E por fim, a seção VI, apresenta as conclusões obtidas por meio do estudo.

## II. FLYWHEEL

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 [6]. 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.

### A. Aplicações

O consumo de energia nos transportes ferroviários poderia ser reduzido em 31,21% com a utilização de um sistema de frenagem regenerativa, conforme a Fig.1 demonstra, com um sistema de armazenamento de energia por volante de inércia [7]. A capacidade energética da implementação de um sistema como esse tem inúmeras vantagens, quando comparada as demais, principalmente aos ciclos ilimitados de carregamento e descarregamento, bem como uma vida útil longa [6].

Sistemas que sofrem com oscilação no fornecimento de energia, com uma carga elétrica altamente variável, e que se encontra 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 [6].

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 [8]. 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 [9]. Na representação da Fig. 1, é desenvolvido um esquema de funcionamento de um sistema de armazenamento por volante de inércia.

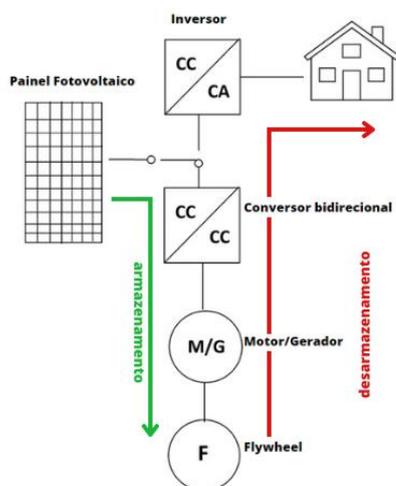


Fig.1. Estrutura de funcionamento e equipamentos do sistema.

O esquemático mostrado na Fig.1, representa o funcionamento mais comum de uma *flywheel* para o armazenamento de energia proveniente de painéis solares

fotovoltaicos (FV), com foco no uso residencial. O sistema possui dois fluxos de funcionamento: um para armazenar a energia no volante de inércia e outro para utilizar o potencial armazenado na carga, quando há necessidade de energia.

A energia de entrada no processo de armazenamento em uma *flywheel* é geralmente proveniente de uma fonte de energia elétrica, como um sistema de geração por meio de painéis fotovoltaicos, conforme mostrado na Fig. 1. O excedente de energia é então utilizado para acelerar o volante de inércia por meio de um motor elétrico. Nesse sentido, um conversor CC-CC é 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.

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 [8]. A energia cinética armazenada ( $E$ ) é obtida através de (1). A energia cinética para sistemas de *flywheel* depende do momento de inércia  $I$  e da velocidade angular ( $\omega$ ) [10].

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

O momento de inércia  $I$  para cilindros sólidos é obtido por meio de (2).

$$E = \frac{1}{2} M r^2 \omega^2 \quad (2)$$

onde  $M$ , é a massa do cilindro e  $r$  é o raio.

Conforme (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 [11].

### III. METODOLOGIA

Diante do exposto, a metodologia do estudo é demonstrada na Fig.2. no intuito do desenvolvimento de um setup para armazenamento de energia elétrica através de um volante de inércia.

A implementação do sistema de armazenamento consiste, de modo geral, em duas grandes áreas. A primeira é restrita a definição dos principais componentes que constituem o equipamento, sendo eles o volante de inércia, e o motor de corrente contínua. Já a segunda por sua vez, está ligada a parte de implementação da lógica de controle e sensoramento do comportamento do sistema, juntamente com a etapa de ensaios com diferentes configurações de funcionamento.

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.



Fig.2. Metodologia Proposta.

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 contadores 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 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 contadores 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 sensoramento, 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.

#### IV. ESTUDO DE CASO

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 Fig. 3, a peça é demonstrada.



Fig.3. Volante utilizado de um motor de trator.

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.

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  $7.700 \text{ kg/m}^3$ . Juntamente com (2), obteve-se o momento de inércia do cilindro oco 1 e 2, que somados resultaram em aproximadamente  $1,299 \text{ kg.m}^2$ .

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 1 é demonstrada a quantidade de energia variando conforme a velocidade de rotação.

Tabela 1. Quantidade de energia armazenada (wh) em função da velocidade de rotação da *flywheel*.

E (wh)	Momento Inércia	Velocidade (rpm)	Velocidade (rad/s)
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

Conforme a Tabela 1 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 se assemelha 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.

## V. 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 mecânica. 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 despendida 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 foram constituídos de duas etapas principais, a primeira delas em que o sistema foi acelerado até uma das velocidades estabelecidas, desativando o motor. Logo em seguida, o sistema de geração é acionado, o motor passa a operar como gerador, utilizando diferentes cargas para cada um dos ensaios. Além do mais, foi mensurado o tempo de desaceleração do volante de inércia para todas as faixas de velocidade de rotação com e sem carga.

Primeiramente, são avaliados os tempos requeridos pelo sistema em cada fase de funcionamento da *flywheel*. Com o

intuito de melhor compreensão, um gráfico foi elaborado, mostrando o tempo necessário para acelerar o volante de inércia até as velocidades pré-definidas, bem como o tempo de desaceleração em relação à carga conectada ao sistema, e pode ser visualizado na Fig.4.

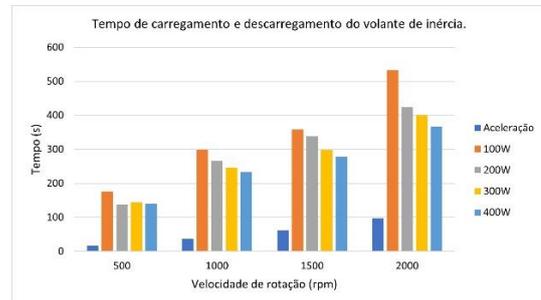


Fig.4. Tempo de carregamento e descarregamento do volante de inércia.

Como o previsto o tempo de aceleração do volante de inércia é progressivo, em que tende a aumentar proporcionalmente à medida que o nível de velocidade se altera. 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.

## B. Eficiência e energia

Após a coleta dos dados através do osciloscópio, eles foram registrados em uma mídia externa, constituindo um banco de dados dos ensaios. Os arquivos gerados pelo sistema mostram os níveis de tensão e corrente ao longo do tempo de cada caso de ensaio. A Fig.5 ilustra o comportamento das medidas de entrada durante a aceleração do sistema até alcançar a velocidade de rotação de 500 rpm.

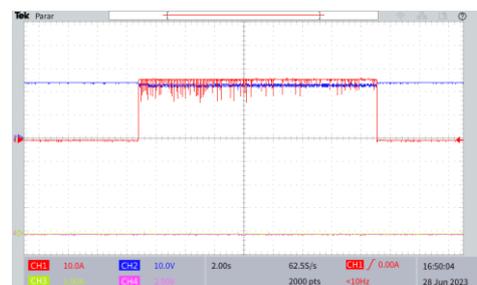


Fig.5. Medidas de aceleração a 500 rpm do volante de inércia.

A Fig.5, demonstra que tanto a corrente (CH1, vermelha) quanto a tensão (CH2, azul) fornecidas pela fonte permanecem praticamente constantes ao longo do processo de aceleração rotacional. Durante esse processo, observa-se níveis elevados de tensão e corrente. A corrente aplicada ao motor coincide com o valor nominal recomendado pelo fabricante, que é de aproximadamente 26 A, conforme o resultado do ensaio, e a tensão é de 24 V. Isso confirma que toda a potência disponível no motor é aproveitada no processo de aceleração rotacional da massa. O sistema leva 16,6 segundos para atingir a velocidade de 500 rpm.

Como forma de demonstrar os ensaios de aceleração para 1000, 1500 e 2000 rpm, a Fig.6 pode ser visualizada,

esclarecendo o comportamento do motor, em função da variação de velocidade de rotação do volante.

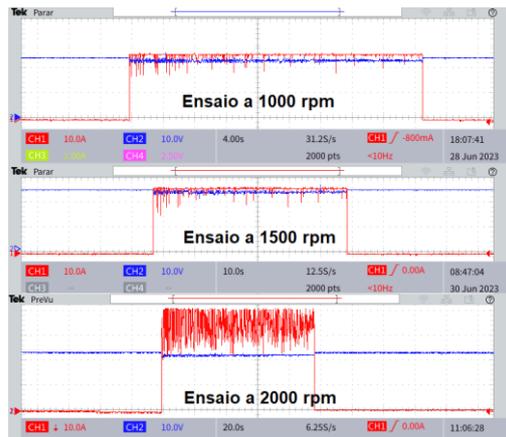


Fig. 6. Medidas de aceleração a 1000, 1500 e 2000 rpm.

A Fig. 6, demonstra que o tempo de aceleração varia consideravelmente para diferentes rotações, sendo 37 segundos para 1000 rpm, 61,5 segundos para 1500 rpm e 96,8 segundos para 2000 rpm. O nível de tensão permaneceu constante em cerca de 24V em todos os ensaios realizados. No entanto, a corrente apresentou uma elevação significativa durante a aceleração para 2000 rpm, atingindo 41,1A, conforme os dados obtidos do osciloscópio.

Após análises posteriores, outra observação foi feita sobre a utilização da energia cinética a 500 rpm para alimentar uma carga. A representação mais fidedigna do comportamento da *flywheel* como fonte de energia é obtida através do osciloscópio. Os ensaios de desaceleração consistem em acelerar o sistema até a velocidade desejada e, em seguida, enviar a energia para a carga até que o sistema retorne ao repouso. Essa mudança de funcionamento é realizada pelo sistema de contadores, utilizando os botões. Na Fig. 7, são apresentados os dados obtidos quando o sistema é conectado a uma carga de 400W a 500 rpm.

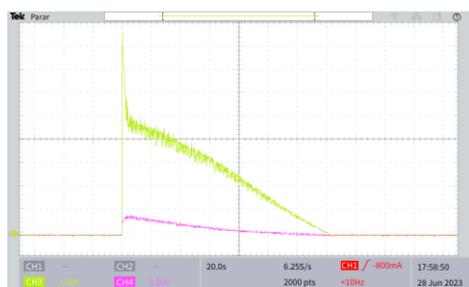


Fig. 7. Medidas de desaceleração a 500 rpm para uma carga de 400W

Neste caso, os canais "CH3" (verde) e "CH4" (rosa) representam a corrente drenada do gerador para a carga e a tensão, respectivamente. No que diz respeito à tensão em um motor CC funcionando como gerador, ela é proporcional à velocidade de rotação. Além disso, nota-se que o tempo de desaceleração é maior do que o de aceleração (140 segundos), porém com níveis muito inferiores aos valores de entrada. A tensão máxima é de 2,15V e a corrente máxima é de 8,7A, neste caso.

A Tabela 2, 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, quando disposto a variação de velocidade, e carga.

Tabela 2. Variação do tempo em função da configuração do volante de inércia.

Vel. rpm	Tempo (s)					
	Aceleração	100W	200W	300W	400W	a vazio
500	16,6	176	138	144	140	199,8
1000	37,3	299	267	246	233	360,3
1500	61,5	358	338	298	278	430,8
2000	96,8	533	424	401	367	510,6

De acordo com a Tabela 2, a aceleração é significativamente mais rápida do que o tempo de desaceleração. Constatou-se que, à medida que mais carga é aplicada ao gerador, o tempo de desaceleração diminui gradualmente. Além disso, observou-se que, ao aumentar a potência da carga, o tempo de desaceleração varia muito pouco, especialmente quando se compara a carga de 300W com a de 400W. Isso sugere que o comportamento do sistema, envolvendo o volante de inércia com o motor/gerador, provavelmente adquiriria certa estabilidade para cargas superiores a 400W.

A Tabela 3 apresenta os valores de energia armazenada no sistema para cada uma das rotações.

Tabela 3. Dados de energia (W.s) para os ensaios realizados.

Vel. rpm	Energia (W.s)				
	Aceleração	100W	200W	300W	400W
500	9.830	259	278	394	400
1000	22.700	1.183	1.707	1.865	2.078
1500	37.574	2.218	4.088	4.704	5.091
2000	77.635	4.088	6.882	8.401	9.226

Na Tabela 3, 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.

Nos ensaios realizados com diferentes configurações, foi possível identificar algumas faixas críticas de funcionamento da *flywheel*, bem como a região com melhor desempenho em termos de eficiência de armazenamento de energia elétrica. Para velocidades de operação de 500 a 1000 rpm, a eficiência variou de 2,64% a 9,15%. Os cenários de pior desempenho foram observados para cargas de 100W e 200W. Todos os dados estão listados na Tabela 4.

Tabela 4. Dados de eficiência para os ensaios realizados.

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

Além disso, nota-se que, na faixa de ensaios de 500 a 2000 rpm, a configuração que apresenta o melhor

desempenho é quando o sistema opera a 1500 rpm. Nesse caso, a eficiência do sistema de armazenagem de energia elétrica é de 13,55%, considerando uma carga de 400W. No entanto, é evidente que o sistema pode enfrentar perdas significativas devido ao atrito e às vibrações em altas velocidades, o que pode prejudicar o seu funcionamento.

## VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para avaliar um sistema mecânico de armazenamento de energia elétrica, utilizando um volante de inércia. A proposta foi conduzir ensaios de armazenamento de energia com diferentes configurações de carga e velocidade. A combinação da *flywheel* com a estrutura mecânica mostrou-se de extrema importância, devido à sua robustez, compactidade e longa vida útil.

A partir dos ensaios realizados na *flywheel*, notou-se que a energia cinética armazenada no sistema depende do momento de inércia da massa rotativa. Portanto, a massa de ferro fundido com essas dimensões tem suas limitações em relação ao armazenamento de energia elétrica, bem como ao tempo de descarregamento. É importante destacar que houve uma significativa variação entre a capacidade de armazenamento teórica e a obtida na prática, pois não foram consideradas quaisquer perdas mecânicas no cálculo do sistema.

Através dos ensaios realizados com diferentes configurações de carga e velocidade de rotação do volante de inércia, foi possível identificar a faixa em que o equipamento apresenta o melhor desempenho. Essa faixa está relacionada a uma carga e velocidade de operação específica. No entanto, quando o sistema é operado de forma diferente, acaba perdendo ainda mais rendimento.

Quando se relaciona 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.

## REFERÊNCIAS

- [1] 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. 169–199, 2018.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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/>.
- [5] 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.
- [6] OLABI, A. G. et al. Critical review of flywheel energy storage system. *Energies*, MDPI, v. 14, n. 8, p. 2159, 2021.
- [7] RUPP, A. et al. Analysis of a flywheel energy storage system for light rail transit. *Energy*, Elsevier, v. 107, p. 625–638, 2016.

- [8] 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.
- [9] PULLEN, K. R. The status and future of flywheel energy storage. *Joule*, Elsevier, v. 3, n. 6, p. 1394–1399, 2019.
- [10] MADEIRAS, A. J. C. Utilização de uma *flywheel* como sistema de armazenamento de energia para veículos elétricos/híbridos. 2015. Tese (Doutorado), 2015.
- [11] DIAS, C. R. Dimensionamento de um Sistema UPS Flywheel. 2013. Tese (Doutorado) — Instituto Politécnico do Porto (Portugal), 2013.