



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

KENNEDY DIAS DOS SANTOS

**ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE UMA BATERIA
GRAVITACIONAL**

CARAÚBAS

2023

KENNEDY DIAS DOS SANTOS

**ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE UMA BATERIA
GRAVITACIONAL**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Mackson Matheus França Nepomuceno

CARAÚBAS

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S237a Santos, Kennedy Dias dos.
Armazenamento de energia elétrica a partir de
uma bateria gravitacional / Kennedy Dias dos
Santos. - 2023.
55 f. : il.

Orientador: Mackson Matheus França Nepomuceno.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2023.

1. armazenamento de energia. 2. bateria
gravitacional. 3. protótipo. I. Nepomuceno,
Mackson Matheus França, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

KENNEDY DIAS DOS SANTOS

ARMAZENAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE UMA BATERIA GRAVITACIONAL

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 16 / 05 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



MACKSON MATHEUS FRANÇA NEPOMUCENO

Data: 25/05/2023 18:35:14-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Mackson Matheus França Nepomuceno, Prof. Dr. (UFERSA)

Presidente

MARCOS VINICIUS DE
MENDONÇA FERREIRA

Assinado digitalmente por MARCOS VINICIUS DE MENDONÇA FERREIRA:
DN: CN=MARCOS VINICIUS DE MENDONÇA FERREIRA, [REDACTED]
OU=UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, O=UFERSA,
*C=BR
*Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2023.05.24 12:58:25 -03'00'
Font: PDF Reader Versão: 1.1.2.2

Marcos Vinícius de Mendonça Ferreira, Téc. Me. (UFERSA)

Documento assinado digitalmente



PEDRO NERI BANDEIRA DE SOUZA

Data: 24/05/2023 19:32:22-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Pedro Neri Bandeira de Souza, Téc. Me. (UFERSA)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me proporcionar a dádiva da vida e guiar meus passos diariamente. Ele, sem sombra de dúvidas, me deu forças para realizar esse trabalho e chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais, Wanderlan Ferreira dos Santos e Maria Evaneide Dias da Cunha dos Santos, por todo o apoio prestado. Vocês são a base da construção da minha vida, são meu ponto de apoio, seja nas horas boas, seja nos momentos difíceis. Bem como ao meu irmão, Kelven Dias dos Santos, que me dá forças para seguir em frente e é uma fonte de inspiração para guiá-lo.

Agradeço aos meus familiares, em especial ao meu tio, Francisco Edinaldo Dias da Cunha, por toda a contribuição dada para a realização desse trabalho, e aos demais que se fizeram presentes quanto ao apoio emocional.

Agradeço a Mackson Matheus França Nepomuceno pela orientação, dedicação e conhecimentos repassados, assim como aos técnicos do Laboratório de Física, Marcos Vinícius de Mendonça Ferreira e Pedro Neri Bandeira de Souza, que ajudaram na realização deste trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos que se fizeram presentes durante essa jornada, em especial aos colegas de estudo e amigos de infância, com quem tenho a oportunidade de vivenciar os momentos mais incríveis.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer à banca examinadora pela disponibilidade e aceitação em contribuir com suas considerações para este trabalho.

O homem que não tem imaginação não tem asas. É preciso ter os pés no chão e a cabeça no ar. Sonhar é a única coisa gratuita que existe. É preciso sonhar antes de realizar.

Ariano Suassuna

RESUMO

Com o constante crescimento no consumo energético em todo o mundo, surge então a necessidade do aumento da produção de energia. Atrélado a essa produção, existe a preocupação com o meio ambiente, onde cada vez mais busca-se a redução na emissão de poluentes. Com isso, surgem no cenário de geração de energia as matrizes eólicas e solares. Entretanto, essas matrizes estão atreladas a fenômenos climáticos variáveis e, assim, possuem inconstância quanto à sua geração. Dentro desse cenário de inconstância, as baterias surgem como solução para esse problema. Porém, as baterias químicas convencionais existentes no mercado possuem baixa vida útil e contêm materiais poluentes em sua composição. Visando esse problema, as baterias físicas surgem no mercado como opção de armazenamento de energia, em especial a bateria gravitacional. Sendo assim, o presente trabalho tem como finalidade apresentar esse modelo de baterias como possível solução de armazenamento, por meio de estudos e levantamentos realizados por outros autores, bem como pela construção de um próprio modelo de bateria. A partir do embasamento teórico, é realizada a confecção de um modelo de bateria capaz de acender uma lâmpada de LED. Em laboratório, é realizada a suspensão de massas a uma certa altura do solo, armazenando assim energia gravitacional. O movimento de descida dessas massas provoca uma rotação no eixo do gerador, de modo a ele entregar uma potência para a lâmpada conectada em seus terminais. Aparelhos, então, fazem uma quantificação de potência entregue, e a partir do conhecimento de energia armazenada e energia gerada, é calculada a eficiência do sistema.

Palavras-chave: armazenamento de energia; bateria gravitacional; protótipo.

ABSTRACT

With the constant growth in energy consumption around the world, the need for increased energy production arises. Linked to this production, there is concern for the environment, where it is increasingly sought to reduce the emission of pollutants. With this, wind and solar arrays appear in the scenario of power generation. However, these matrices are linked to variable climatic phenomena and, thus, have inconstancy regarding their generation. Within this scenario of inconstancy, batteries emerge as a solution to this problem. However, conventional chemical batteries on the market have a low service life and contain polluting materials in their composition. Aiming at this problem, physical batteries appear on the market as an energy storage option, especially the gravitational battery. Thus, the present work aims to present this model of batteries as a possible storage solution, through studies and surveys conducted by other authors, as well as by the construction of a battery model itself. From the theoretical basis, it is carried out the manufacture of a battery model capable of lighting an LED lamp. In the laboratory, the suspension of masses is carried out at a certain height from the ground, thus storing gravitational energy. The downward movement of these masses causes a rotation in the axis of the generator, so that it delivers a power to the lamp connected in its terminals. Appliances then make a quantification of power delivered, and from the knowledge of stored energy and energy generated, the efficiency of the system is calculated.

Keywords: energy storage; gravitational battery; prototype.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico geração de energia eólica no Nordeste no período de 2021-2022.....	21
Figura 2 - Gráfico geração de energia solar no Brasil no período de 2021-2022.....	22
Figura 3 - Sistema de baterias de Laurel Mountain implantado pela AES	25
Figura 4 - Sistema de armazenamento de energia ferroviária	26
Figura 5 - (a) Processo de armazenamento de energia do sistema; (b) Processo de geração de energia do sistema	27
Figura 6 -Relação de alturas do sistema de armazenamento com peso único.....	28
Figura 7 - Ilustração do sistema Gravity Light.....	31
Figura 8 - Ilustração do sistema de armazenamento de energia da Gravitricity.....	32
Figura 9 - Ilustração do sistema de armazenamento de energia da Energy Vault.....	33
Figura 10 - Ilustração das etapas de desenvolvimento do trabalho	35
Figura 11 – Modelo de motor utilizado no protótipo	36
Figura 12 - Base de madeira para o sistema	36
Figura 13 - Haste de elevação do sistema.....	37
Figura 14 – Polia que é conectada ao eixo do motor.....	37
Figura 15 - Modelo de bateria desenvolvido	38
Figura 16 - Modelo de balança digital utilizado.....	39
Figura 17 - Fita métrica utilizada	39
Figura 18 - Amperímetro utilizado	40
Figura 19 - Voltímetro utilizado.....	41
Figura 20 - Modelo de lâmpada LED utilizada	41
Figura 21 – Realização da pesagem da massa.....	42
Figura 22 – Esquema de verificação da altura h.....	43
Figura 23 – Esquema utilizado para coleta de dados.....	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Gráfico de tensão <i>versus</i> tempo.....	47
Gráfico 2 - Gráfico de Corrente <i>versus</i> tempo	47
Gráfico 3 - Gráfico de potência <i>versus</i> tempo.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos sistemas de armazenamento de energia.....	24
Tabela 2 - Resultados para cálculo da energia potencial gravitacional armazenada.....	46
Tabela 3 – Resultados de tensão e corrente médias.....	48
Tabela 4 - Resultados de potência média, tempo de descida e energia gerada	49
Tabela 5 – Resultados para a energia armazenada, energia gerada e eficiência	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARES	Armazenamento Avançado de Energia Ferroviária
CAES	Armazenamento de Energia de ar Comprimido
CO ₂	Gás carbônico
ESS	Sistema de Armazenamento de Energia
fem	Força Eletromotriz
GPM	Módulo de Energia por Gravidade
HHS	Armazenamento Hidrelétrico Hidráulico
IEA	International Energy Agency
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
ONU	Organização das Nações Unidas
PHES	Armazenamento de Energia Hidrelétrica Bombeada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral.....	17
2.2 Objetivos específicos.....	17
3 REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1 Energia cinética	18
3.2 Energia potencial gravitacional.....	18
3.3 Energia mecânica.....	19
3.4 Conservação de energia.....	19
3.5 Lei de Faraday	19
3.6 Potência	20
3.7 Fontes de energias renováveis	20
3.8 Armazenamento de energia	22
3.8.1 Armazenamento de energia por baterias eletroquímicas	24
3.8.2 Armazenamento avançado de energia ferroviária	25
3.8.3 Armazenamento de energia potencial gravitacional.....	26
3.8.4 Armazenamento de energia potencial gravitacional por sistema de pesos.....	27
4 METODOLOGIA.....	35
4.1 Levantamento bibliográfico.....	35
4.2 Construção de um pequeno protótipo de bateria gravitacional.....	35
4.3 Experimento para verificação da eficiência da conversão de energia do protótipo...38	
4.3.1 Materiais utilizados	38
4.3.2 Realização do experimento.....	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1 Energia potencial armazenada	46
5.2 Energia gerada.....	46
5.3 Eficiência	49
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	50
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	50
REFERÊNCIAS	51

ANEXO A – DADOS DE TENSÃO E CORRENTE A CADA SEGUNDO DURANTE A GERAÇÃO (continua)	54
ANEXO A - DADOS DE TENSÃO E CORRENTE A CADA SEGUNDO DURANTE A GERAÇÃO (conclusão)	55

1 INTRODUÇÃO

O constante desenvolvimento humano está intimamente ligado ao progresso de diversas tecnologias. Essas tecnologias têm o poder de melhorar a qualidade de vida das pessoas e de servir como base para novas melhorias, impulsionando o progresso da civilização. No entanto, esse desenvolvimento contínuo vem acompanhado de um aumento significativo na demanda por energia, resultado do grande crescimento industrial e comercial.

A matriz energética mundial tem sua maior parcela de contribuição advinda de fontes de energia não renováveis. Segundo dados do IEA (2022), em 2020 o carvão mineral e o petróleo com seus derivados somam 56,3% da matriz energética mundial, o que gera um impacto ambiental significativo.

Segundo matéria do portal de notícias G1 (2021), após a realização da conferência do clima da Organização das Nações Unidas (ONU) em novembro de 2021, a COP26 previu pela primeira vez a redução gradativa do financiamento de combustíveis fósseis e da utilização de carvão. Esse acontecimento acelera ainda mais o processo de migração das matrizes energéticas para matrizes renováveis. Em 2011, realizou-se uma revisão na Lei de Fontes Renováveis de Energia que entraria em vigor em 2012, na qual definia metas como a maior participação de energias renováveis na geração de energia elétrica. A lei previa que, no ano de 2020, as energias renováveis representariam 35% de todo o suprimento de energia e 50% em 2030 (UCZAI, 2012).

Diante desse contexto, dois mecanismos de geração de energia limpa e renovável vêm ganhando destaque no mercado: a geração de energia por painéis fotovoltaicos e por meio de turbinas eólicas. Segundo dados do Sistema Interligado Nacional (2023), no Brasil, esses mecanismos somam 17% da parcela total da matriz energética do país

Singh (2016) aborda que os sistemas autônomos de geração eólica e solar possuem uma desvantagem em relação aos demais sistemas, devido ao recurso eólico e solar apresentarem inconstância quanto a sua geração, podendo apresentar momentos de picos de geração, assim como momentos de escassez de geração, tornando-os, assim, dependentes de outro mecanismo de reserva de energia.

Zdeněk Dostál (2018) ressalta que, assim como os demais sistemas de geração de energia, os sistemas de energias renováveis devem incluir armazenamento de energia. O armazenamento de energia irá garantir a continuidade de funcionamento do sistema, assim como reduzir a perda de receita e elevar a quantidade de energia resultante.

Em uma escala de rede de distribuição de energia, para esses sistemas de geração, o armazenamento de energia é tido como uma componente de extrema importância, principalmente por se tratar de um mecanismo sem emissão de poluentes. Esse mecanismo é responsável por equilibrar a inconstância entre oferta e demanda (Thomas Morstyna, 2022). Assim, esses dispositivos podem armazenar energia fora dos horários de pico e devolver essa energia armazenada nos horários de pico, garantindo o equilíbrio e a estabilidade da rede de distribuição de energia.

Diante do cenário ecológico no qual a sociedade vivencia, busca-se então uma solução viável para promover tal equilíbrio. Pensando nisso, foram propostos nos últimos anos diferentes modelos de armazenamento, dentre eles o armazenamento de energia potencial gravitacional por pesos (Thomas Morstyna, 2022).

A utilização de baterias físicas, em especial as baterias gravitacionais, reduz o descarte de resíduos químicos gerados por baterias químicas convencionais e permite a reutilização de espaços físicos já abandonados, como minas e poços subterrâneos. Além disso, as baterias gravitacionais proporcionam uma maior praticidade e facilidade na manutenção.

Com isso, a utilização de baterias gravitacionais apresenta-se como uma solução ecologicamente viável para produtores de energia limpa e renovável em pequena e grande escala.

Nas próximas sessões serão apresentados os objetivos deste trabalho, bem como o referencial utilizado como embasamento teórico para o seu desenvolvimento. Também será explanado sobre a metodologia utilizada e os resultados obtidos a partir do experimento realizado. Por fim, será apresentado as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Construir um protótipo de armazenamento de energia potencial gravitacional.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar a utilização de baterias gravitacionais como método de armazenamento de energia;
- Realizar a revisão bibliográfica sobre o armazenamento de energia elétrica através de baterias gravitacionais;
- Confeccionar uma maquete de uma bateria gravitacional com armazenamento através de pesos;
- Realizar um estudo sobre a eficiência energética do modelo de bateria gravitacional construído.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Energia cinética

Segundo Alaor Chaves (2000), a energia cinética de um corpo pode ser descrita como a energia que ele possui em decorrência do seu movimento.

Para Halliday e Resnick (2012), a energia cinética de um corpo está diretamente ligada ao seu estado de movimento. Em outras palavras, quanto mais rápido é o movimento desse corpo, maior sua energia cinética. Se o objeto se encontra em repouso, sua energia cinética é nula. Isso fica perceptível na eq. (1) a seguir, que mostra a equação para o cálculo da energia cinética de um corpo:

$$K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2, \quad (1)$$

onde K é a energia cinética do corpo, m é sua massa e v representa a velocidade.

3.2 Energia potencial gravitacional

De acordo com Alaor Chaves (2000), a energia potencial gravitacional pode ser armazenada. À medida que se eleva um corpo para uma altura h, é realizado um trabalho para que esse deslocamento aconteça e, ao fim do deslocamento, esse trabalho fica armazenado para ser utilizado ao reverter o processo. Trabalho pode ser descrito como a energia aplicada ou retirada de um objeto (HALLIDAY E RESNICK, 2012). Assim, a variação de energia potencial gravitacional, ΔU , pode ser descrita como o produto da sua massa m pela aceleração da gravidade g e a altura h, como mostra a eq. (2) a seguir:

$$\Delta U = m \cdot g \cdot h. \quad (2)$$

3.3 Energia mecânica

A variação de energia mecânica de um sistema é a soma da variação de sua energia potencial, ΔU , com a sua variação de energia cinética, ΔK , (TIPLER; MOSCA, 2009). Essa energia pode ser representada matematicamente como mostra a eq. (3) a seguir:

$$\Delta E_{mec} = \Delta U + \Delta K. \quad (3)$$

Considerando um sistema isolado, pode ocorrer variação da energia potencial e da energia cinética, porém a soma dessas duas energias, ou seja, a energia mecânica do sistema é constante (HALLIDAY E RESNICK, 2012).

3.4 Conservação de energia

O Universo possui energia total constante; essa energia pode ser convertida de uma forma para outra, assim como transferida de localização, porém essa energia não pode ser criada ou destruída (TIPLER; MOSCA, 2009).

Halliday e Resnick (2012) ressaltam que a variação total de energia de um sistema (ΔE) pode ser expressa como a soma da variação de energia mecânica (ΔE_{mec}), com a variação de energia térmica (ΔE_t) e a variação de qualquer outro tipo de energia do sistema (ΔE_{int}), como mostrado na eq. (4). A variação de energia de um sistema é de caráter conservativo, podendo se alterar à medida que se transfere ou retira certa parcela de energia desse sistema. Assim como a presença de uma força externa, como o atrito, pode perturbar essa conservação.

$$\Delta E = \Delta E_{mec} + \Delta E_t + \Delta E_{int}. \quad (4)$$

3.5 Lei de Faraday

Em um de seus experimentos, Faraday percebeu que ao movimentar um ímã nas proximidades de uma bobina condutora ocorria o surgimento de uma corrente nessa bobina. Logo, se ocorre o surgimento de uma corrente na bobina, tem uma força eletromotriz (fem) responsável por ela. Essa fem é conhecida como fem induzida (HESSEL, 2015).

A lei de Faraday determina que a variação de fluxo magnético ao decorrer do tempo ocasiona o surgimento de uma fem que induz uma corrente em um circuito fechado adequado (HAYT, 2013), como mostra a eq. (5):

$$fem = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (5)$$

sendo $\frac{d\Phi}{dt}$ a variação de fluxo magnético em relação ao tempo.

3.6 Potência

Fisicamente, a potência pode ser definida como a taxa de variação temporal do gasto ou consumo de energia. Apesar de tensões e correntes serem variáveis muito úteis na análise de sistemas elétricos, muitas vezes o resultado útil de interesse do sistema não é em relação a esses termos elétricos, mas sim em termos de sua potência ou energia. Matematicamente, potência em função da energia é definida como a variação de energia em relação ao tempo, como mostra a eq. (6). Quando em função da tensão (V) e corrente (I) do sistema, a potência pode ser definida como o produto dessas duas grandezas, como mostra a eq. (7), (NILSSON; RIEDEL, 2015).

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (6)$$

e

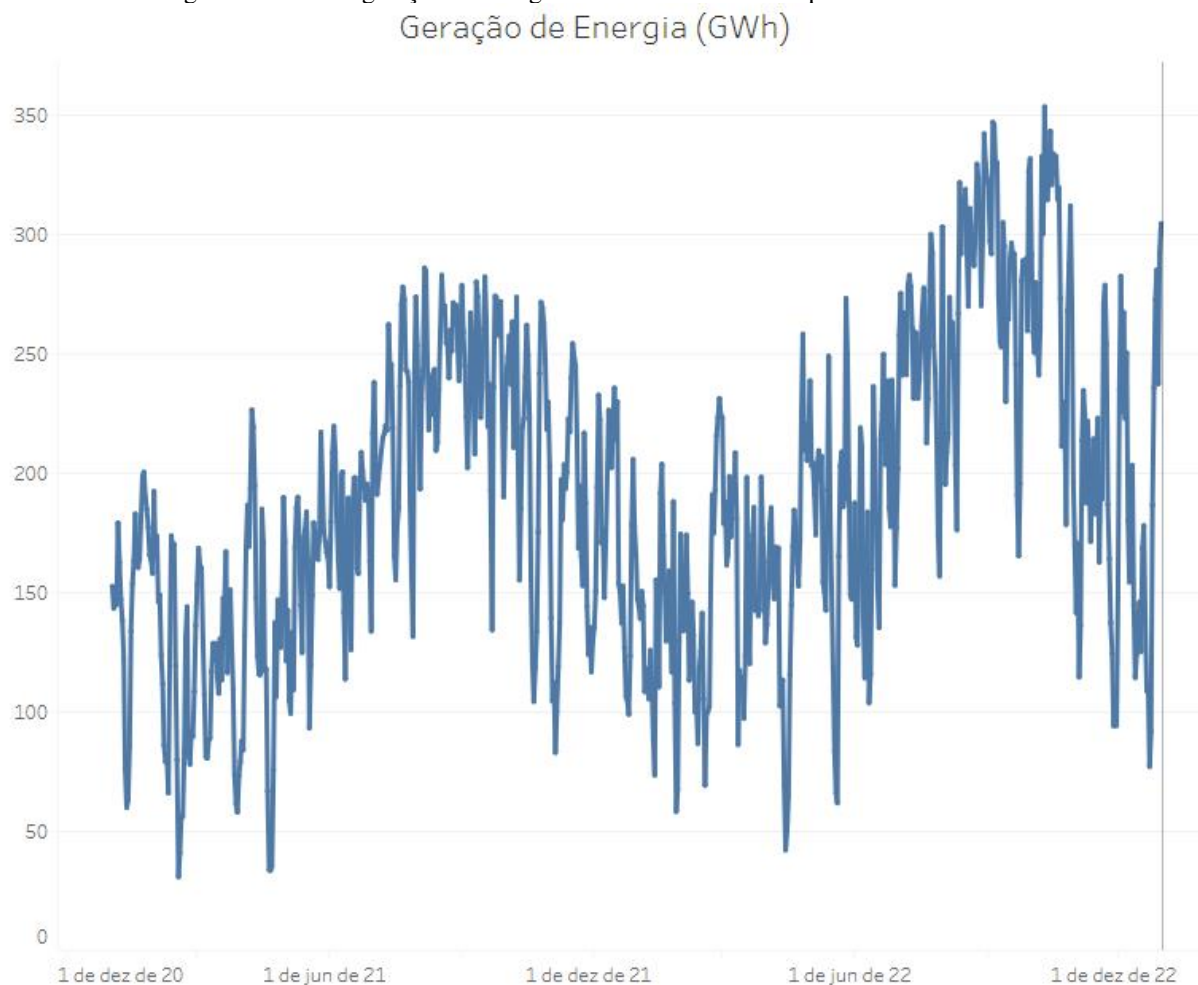
$$P = V \cdot I. \quad (7)$$

3.7 Fontes de energias renováveis

Em sua maioria, as fontes de energia renováveis são intermitentes, como a eólica e solar, por exemplo. Essa intermitência traz consigo um grande desafio quanto à garantia de uma estabilidade de fornecimento de energia elétrica. Em meio a esse cenário, são buscadas soluções viáveis para esse problema, como por exemplo o Armazenamento de Energia Elétrica (EES), deslocamento de carga por gerenciamento de demanda e interligação com redes externas, tendo a EES como a mais promissora entre elas (LOU *et al.*, 2015)

Para o contexto de geração distribuída, San Martín (2011) relata que as novas fontes de energia renováveis possuem picos de produção, picos esses que nem sempre estão de acordo com a demanda energética. Dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) confirmam essa inconstância. A Figura 1 mostra a geração de energia eólica no Nordeste e a Figura 2 a geração solar no Brasil no período de um ano.

Figura 1 - Gráfico geração de energia eólica no Nordeste no período de 2021-2022



Fonte: ONS, 2023.

Figura 2 - Gráfico geração de energia solar no Brasil no período de 2021-2022
Geração de Energia (GWh)



Fonte: ONS, 2023.

3.8 Armazenamento de energia

De acordo com Ruoso (2019), o armazenamento de energia pode ser classificado em três tipos distintos: armazenamento mecânico, eletroquímico ou hidrogênio. Dentre eles, o eletroquímico, em especial as baterias ácidas, é o mais utilizado para armazenamento de energia fotovoltaica. No entanto, esse tipo de armazenamento demanda um grande investimento inicial, não tolera altos ciclos de carregamento e descarregamento, não é econômico e ainda gera impacto ambiental com seus resíduos.

Os sistemas de armazenamento de energia elétrica possuem uma diversidade de subclassificações que se baseiam em seus tipos e funções. Esses sistemas têm como princípio de utilização o aproveitamento de energia elétrica através do sistema de carregamento e descarregamento. Tendo em vista que a demanda por eletricidade é variável com o tempo, os sistemas de armazenamento, atrelados à rede de energia, surgem como uma solução para esse

problema, tornando o sistema estável, separando a geração do uso e trazendo maior confiabilidade para os recursos renováveis (SUBERU, 2014).

Ainda segundo Suberu (2014), o sistema de gestão de energia, como um todo, envolve o equilíbrio entre a sustentabilidade do serviço de abastecimento e a demanda de energia dos usuários finais. Na geração de energia, essa energia precisa ser armazenada nas maiores demandas, para serem utilizadas nas menores demandas, ideal para casos como a energia eólica e solar. Em casos de alta demanda de energia, os sistemas de armazenamento de backup seriam responsáveis por complementar essa demanda e regulá-la para de acordo com a oferta.

Para Aneke (2016), o conceito que está por trás do armazenamento secundário de energia é a captura da energia produzida em um dado momento para uma utilização posterior. Esse processo de captação de energia é considerado como carregamento, e o processo de liberação dessa energia é o descarregamento. Essa energia é armazenada usando diferentes tipos de materiais, a esses dá-se o nome de portadores de energia.

Esse armazenamento de energia na forma secundária reduz a quantidade do consumo de formas primárias de energia, assim como nos combustíveis fósseis utilizados para gerá-las. Esse processo reduz, então, a emissão de CO₂ e outros gases do efeito estufa, como também conserva o estoque de combustíveis finitos. Esse método pode também desempenhar um papel crucial na ascensão das energias renováveis, limpas e intermitentes, como a energia solar, eólica e das correntes marinhas na rede de distribuição (ANEKE, 2016).

Outro ponto crucial citado por Aneke (2016) é a relação de vida útil dos sistemas de armazenamento. Esse fator é impactante na tomada de decisão sobre a utilização de determinada tecnologia para uma aplicação específica. Na maioria dos casos, as tecnologias com maior vida útil se sobressaem em relação às de curta vida útil. Pode-se afirmar que tecnologias mecânicas, como armazenamento de energia por gravidade, têm uma longa vida útil devido à alta durabilidade de suas componentes mecânicas. Já os sistemas baseados em baterias normalmente têm vida curta em decorrência de sua deterioração química com o tempo de operação.

Algumas características dos sistemas de armazenamento de energia apresentadas por Ruoso (2019) são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos sistemas de armazenamento de energia

Tecnologia de armazenamento	Potência (W)	Tempo de descarga (h)	Vida útil (anos)	Eficiência de ida e volta (%)
CAES	$5 \times 10^6 - 3 \times 10^8$	1-24	20-60	50-89
PHES	$10^8 - 5 \times 10^9$	1-24	40-60	65-87
GPM	$4 \times 10^7 - 1.6 \times 10^9$	1-4	30+	75-80
HHS	$2 \times 10^7 - 2.75 \times 10^9$	1-24	40+	80
ARES	$10^8 - 3 \times 10^9$	2-24	40+	75-86
Gravitricity	$< 4 \times 10^7$	< 2	50+	80-90

Fonte: Adaptado de Ruoso (2019).

Rathore (2021) apresenta algumas vantagens do sistema de armazenamento para recursos de energias renováveis, como o caso do corte de pico, mitigação de desvio de tensão, deslocamento de carga, redução da emissão de gases do efeito estufa, nivelamento de carga, benefícios de custo e expansão do sistema.

3.8.1 Armazenamento de energia por baterias eletroquímicas

Baterias eletroquímicas são sistemas eletroquímicos utilizados para armazenar energia, esses sistemas podem ser recarregáveis ou não. As reações eletroquímicas ali presentes são responsáveis por converter energia química em energia elétrica. Atualmente três tipos de baterias eletroquímicas têm maior usualidade: as baterias de chumbo-ácido, as baterias à base de lítio e as à base de níquel (HADJIPASCHALIS, 2009).

Existem historicamente alguns exemplos de utilização comercial de baterias como sistema de armazenamento de energia, como é o caso da utilização em Bewag, na Alemanha, onde na ocasião ocorreu a utilização de baterias de 14 MWh para regulação de frequência, assim como na subestação Edison chino do sul da Califórnia, onde foram utilizadas baterias de 40 MWh para o nivelamento de carga e controle de frequência instantânea (DIVYA, 2009).

Em Elkins, no oeste da Virginia, EUA, é implementado um projeto de armazenamento de Laurel Moutain que é avaliado em 32 MW de potência. Esse sistema de armazenamento é interligado com o parque eólico de Laurel Moutain com potência de geração de 92 MW. Esse

armazenamento de energia possibilita a regulação de frequência e auxilia a regulação das flutuações de geração do parque (SUBBURAJ, 2015).

A Figura 3 mostra o sistema de baterias de Laurel Mountain implantado pela empresa global de energia AES.

Figura 3 - Sistema de baterias de Laurel Mountain implantado pela AES



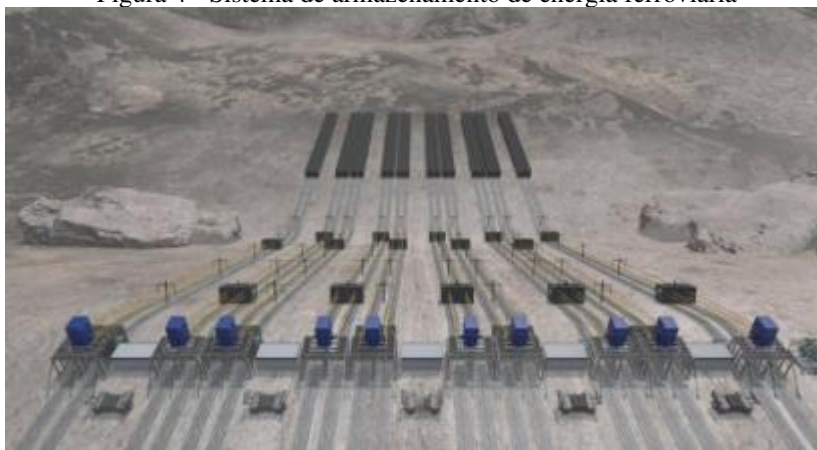
Fonte: SUBBURAJ (2015).

3.8.2 Armazenamento avançado de energia ferroviária

O Armazenamento Avançado de Energia Ferroviária (ARES) é uma tecnologia baseada na utilização de trilhos para aproveitar a gravidade, uma solução de armazenamento em larga escala que supera os custos com baterias (ARES, 2023). ARES será alimentado pela energia excedente da geração eólica e/ou solar da rede. Essa energia é responsável por acionar motores que, ligados a ônibus ferroviários, ocasionam no deslocamento desses ônibus de uma superfície inferior para uma superfície superior, armazenando assim milhares de megawatts-hora na forma de energia potencial, quantidade suficiente para abastecer uma cidade de médio porte por algumas horas. Conforme a exigência de demanda ocorre, a reversão desse processo acontece, e então a massa se desloca da superfície mais elevada para a menos elevada através da ação da força gravitacional. Durante esse processo, os motores reverterem e operam como geradores, fornecendo assim energia elétrica de volta para a rede (CAVA *et al.*, 2016).

Um esquema de como se procede esse sistema de armazenamento é ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Sistema de armazenamento de energia ferroviária



Fonte: Ares (2023).

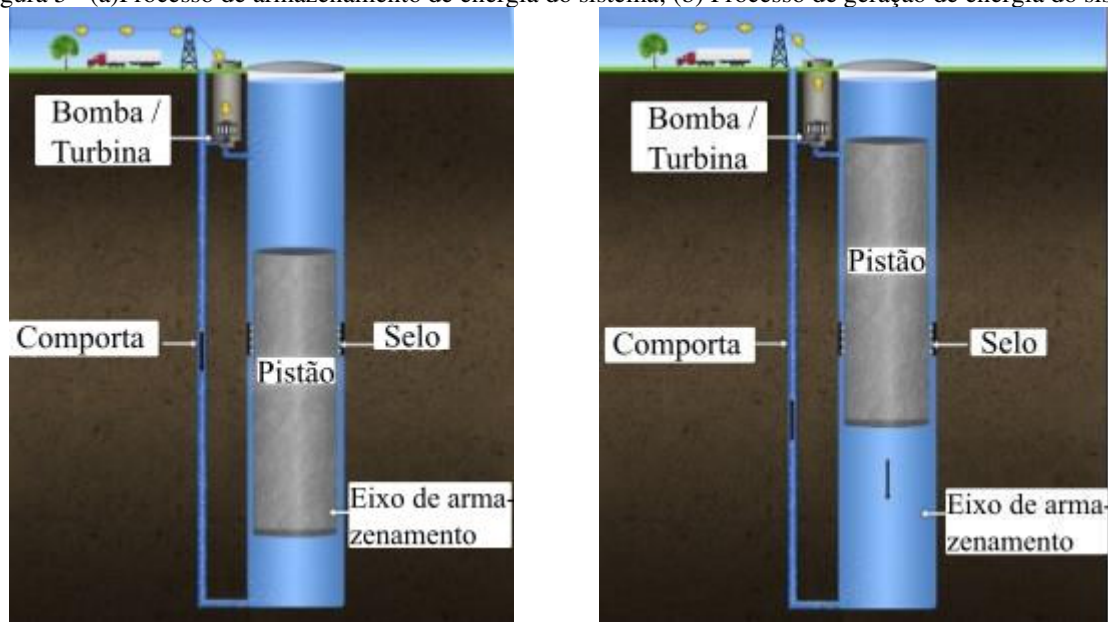
3.8.3 Armazenamento de energia potencial gravitacional

O sistema de armazenamento de energia potencial gravitacional (GESS) é descrito por Georgious *et al.* (2021) como um dispositivo capaz de armazenar energia hidrelétrica bombeada ou energia renovável na forma de energia potencial gravitacional. Esse sistema possui vantagem sobre o eletroquímico devido sua capacidade de armazenamento não diminuir a cada ciclo assim como sua capacidade de potência não se associa a sua capacidade de energia.

A Gravity Power (2023) oferece um sistema de armazenamento de energia econômico e de alta eficiência, com a utilização de tecnologias comerciais já usuais, além de proporcionar condições ambientalmente viáveis. O projeto tem como princípio de funcionamento uma bomba de água. Essa bomba conduz a água por um poço subterrâneo profundo que irá levantar um pistão, com a ajuda da gravidade esse pistão desce e conduzirá a água para uma passagem do gerador, que por sua vez devolverá a energia à rede.

A descrição do processo de funcionamento do sistema da Gravity Power é ilustrada na Figura 5.

Figura 5 - (a) Processo de armazenamento de energia do sistema; (b) Processo de geração de energia do sistema



(a)

(b)

Fonte: Adaptado Gavity Power (2023).

3.8.4 Armazenamento de energia potencial gravitacional por sistema de pesos

A tecnologia por trás do sistema de armazenamento de energia potencial gravitacional por sistema de pesos é considerada simples. Ao erguer um objeto contra a gravidade, automaticamente está armazenando energia nele e ao realizar o movimento inverso essa energia é recuperada. Com isso, empresas como a Energy Vault e a Gravitricity elaboram projetos para utilização desse modelo de armazenamento (QUARTZ, 2023).

3.8.4.1 Capacidade de armazenamento de energia para um único peso

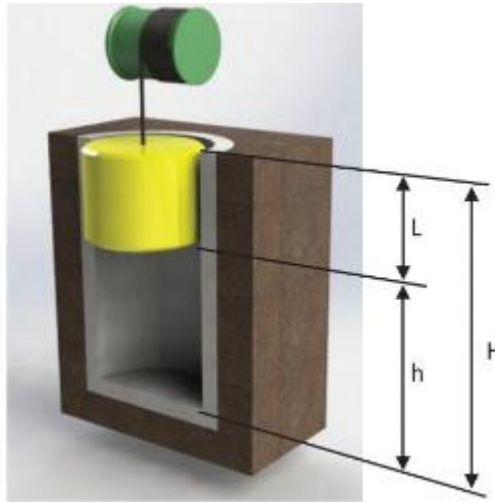
Considerando um bloco de massa m que é movimentado verticalmente a uma distância h , pode-se calcular a energia desse sistema como sendo a energia potencial descrita na eq. (2) (FRANKLIN *et al.*, 2022).

Morstyn (2019) considera a eficiência de ida e volta do sistema (η), apresentando assim a capacidade de armazenamento de energia do sistema (E) como mostra a eq. (8).

$$E = \eta \cdot m \cdot g \cdot h. \quad (8)$$

Entretanto, a massa do bloco (m), está diretamente relacionado com as dimensões do bloco e sua densidade média ρ , assim como a altura h percorrida é uma relação entre a altura total do sistema (H), menos a altura do bloco (L), como mostra a Figura 6. Assim, é possível identificar uma altura do bloco para conseguir um máximo armazenamento de energia (FRANKLIN et al.,2022).

Figura 6 -Relação de alturas do sistema de armazenamento com peso único



Fonte: (FRANKLIN et al.,2022).

Com isso, é possível reformular a equação da energia armazenada, como descrita na eq. (9).

$$E = (\rho AL)g(H - L), \quad (9)$$

onde ρ é a densidade média do bloco e A representa sua área da seção transversal.

Reagrupando os termos, tem-se a eq. (10):

$$E = (\rho A)g(HL - L^2). \quad (10)$$

Morstyn (2019) elabora uma abordagem semelhante, porém dando ênfase na massa e volume do bloco, considerando o mesmo sistema da Figura 6, onde o bloco tem formato cilíndrico e um diâmetro d . O volume do bloco (Vol) é dado como mostra a eq. (11) a seguir:

$$Vol = \frac{\pi d^2 L}{4}. \quad (11)$$

A massa do bloco pode ser calculada como o produto de sua densidade média (ρ) e seu volume (Vol), como mostra a eq. (12) a seguir (MORSTYN, 2019).

$$m = \rho \cdot Vol. \quad (12)$$

Então, para Morstyn (2019), a capacidade total de energia armazenada, em joules, pode ser calculada como um rearranjo da eq. (8), onde a altura h , é a altura total H menos a altura do bloco L , como descrita na eq. (13) a seguir:

$$E = \eta \cdot g \cdot m \cdot (H - L), \quad (13)$$

entretanto, da eq. (12) é observado que o volume do bloco (Vol) é o quociente da sua massa m e sua densidade média ρ . Substituindo o volume (Vol) na eq. (11), pode-se definir, então, a altura L como na eq. (14):

$$L = \frac{4 \cdot Vol}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot d^2 \cdot \rho}, \quad (14)$$

assim, a capacidade total de energia armazenada é definida por Morstyn (2019) como na eq. (15):

$$E = \eta \cdot g \cdot \left(mH - \frac{4m^2}{\pi d^2 \rho} \right) \quad (15)$$

Como a massa do bloco cilíndrico está diretamente ligada com sua altura, à medida que essa altura é aumentada, aumenta-se assim a massa do bloco. Porém, acarreta na redução da profundidade utilizável do sistema, criando assim uma compensação na capacidade de armazenamento de energia (MORSTYN, 2019).

Para Franklin *et al.* (2022), a variação de energia em relação à altura L $\left(\frac{dE}{dL}\right)$, pode ser descrita como a derivada da eq. (10) em relação a L . Seu resultado é apresentado na eq. (16) a seguir:

$$\frac{dE}{dL} = (\rho A)g(H - 2L). \quad (16)$$

A máxima transferência de energia é encontrada quando essa variação é nula, ou seja, $\frac{dE}{dL} = 0$ e $\frac{d^2E}{dL^2} < 0$. Logo, o máximo armazenamento acontece quando a altura L do bloco é igual a metade da altura total H do sistema (FRANKLIN et al., 2022), conforme mostra a eq. (17).

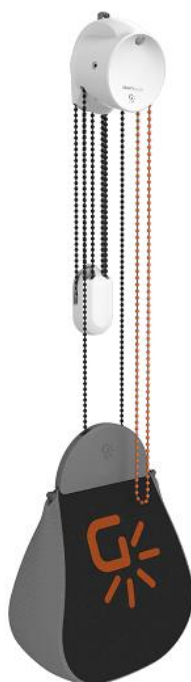
$$L = \frac{H}{2} \quad (17)$$

Entretanto, ao considerar um caso de um poço ou mina subterrânea em que a profundidade é relativamente grande, adequar a altura do bloco para obter o máximo armazenamento ocasionará um grande impasse mecânico na desenvoltura desse sistema, tendo em vista que a massa desse bloco seria muito elevada para um equipamento realizar sua suspensão. Em casos como esse, a altura do bloco é cerca de 1 a 4% da profundidade do meio. Um possível caminho economicamente viável para otimização desse sistema é o desenvolvimento do sistema com múltiplos pesos, onde a massa total do sistema é consideravelmente maior (FRANKLIN et al., 2022).

Um sistema para pequenas aplicações foi desenvolvido e recebe o nome de Gravity Light. Esse sistema tem como princípio de atuação um pequeno gerador que está ligado a um LED de alta potência. A energia gerada é proveniente de um saco com pesos sob o efeito da gravidade. Ao erguer o peso, acontece o armazenamento de energia e, ao liberar esse peso, acontece através do gerador a conversão de energia potencial gravitacional para elétrica, fornecendo assim de 15 a 25 minutos de iluminação para o usuário (BORGES, 2018).

A Figura 7 ilustra o aparelho Gravity Light.

Figura 7 - Ilustração do sistema Gravity Light



Fonte: SOUZA (2022).

3.8.4.2 Capacidade de armazenamento de energia para pesos múltiplos

Para sistemas de armazenamento de peso único, o sistema de elevação deve ser dimensionado de modo a elevar toda a massa ao mesmo tempo, dificultando assim o dimensionamento das componentes e equipamentos para realizar esse trabalho, impondo dessa forma limites práticos para a execução desse sistema. Para sistemas com múltiplos pesos, um único sistema de elevação é responsável por elevar ou abaixar os pesos em sequência, permitindo assim que o conjunto dessas massas proporcione uma massa total mais elevada e, consequentemente, uma maior capacidade de armazenamento de energia (FRANKLIN et al., 2022).

Para um sistema em que blocos são empilhados um sobre o outro na base do meio subterrâneo e erguidos para serem armazenados no solo, a energia armazenada pelo primeiro bloco pode ser definida como o produto de sua massa m , pela profundidade total do eixo H . Já para o segundo bloco, a energia armazenada pode ser descrita pelo produto de sua massa m , pela altura H menos a altura L do primeiro bloco. Assim, para n blocos, pode-se calcular a capacidade total de armazenamento de energia como mostra a eq. (18) a seguir (FRANKLIN *et al.*, 2022):

$$E = m \cdot g \cdot n \cdot \left[H - \frac{L(n-1)}{2} \right]. \quad (18)$$

A Gravitricity (2023) vem desenvolvendo um projeto inovador de um sistema de armazenamento de energia baseado em gravidade com pesos múltiplos. Este projeto tem financiamento parcial do Departamento de Negócios do governo do Reino Unido e fornecerá cerca de 4 MWh de armazenamento. Devido ao uso de vários blocos, o sistema possibilita um grande aumento da capacidade de armazenamento de energia através do aumento da massa do sistema, com um único sistema de guinchos. Esse sistema possibilita um custo de armazenamento cada vez mais atraente.

Na Figura 8 é ilustrado o modelo do sistema de armazenamento de energia da Gravitricity.

Figura 8 - Ilustração do sistema de armazenamento de energia da Gravitricity



Fonte: Adaptado Gravitricity (2023).

Outra aplicação é a da Energy Vault no vale suíço. Uma torre metálica de 75 metros de altura, com três braços metálicos, é responsável por dar suporte a motores alimentados pela rede elétrica suíça que içam blocos de concreto de 35 toneladas a uma altura de trinta, trinta e cinco e quarenta metros de altura, armazenando assim a energia potencial gravitacional. Ao iniciar a descida desses blocos, os motores passam a girar em sentido inverso, funcionando assim como geradores. Durante a descida de aproximadamente 30 segundos, cada bloco é capaz de gerar cerca de um megawatt de potência (REYNOLDS, 2022).

A Figura 9 ilustra o modelo usado pela Energy Vault.

Figura 9 - Ilustração do sistema de armazenamento de energia da Energy Vault



Fonte: (ENERGY VALT, 2022).

3.8.4.3 Potência gerada

Franklin *et al.* (2022) elabora um modelo matemático para cálculo da capacidade de energia do sistema. Segundo eles, a potência mecânica do sistema (P_m) é equivalente ao produto entre a massa do bloco (m), sua aceleração, que nesse caso é a da gravidade (g) e a velocidade vertical (v) que esse bloco se desloca, como mostra a eq. (17).

$$P_m = m \cdot g \cdot v. \quad (17)$$

Logo, a potência do sistema é função do peso e da velocidade vertical na qual ele se desloca (FRANKLIN *et al.*, 2022).

A potência elétrica durante o carregamento (P_{ca}), eq. (18), e a potência elétrica durante a geração (P_{ge}), eq. (19), se diferenciam da potência mecânica devido a suas perdas (FRANKLIN *et al.*, 2022).

$$P_{ca} = \frac{m \cdot g \cdot v}{\eta_{ca}}, \quad (18)$$

onde η_{ca} é a eficiência de conversão de energia elétrica em potência mecânica para o peso do sistema durante o ciclo de carga e

$$P_{ge} = m \cdot g \cdot v \cdot \eta_{ge}, \quad (19)$$

onde η_{ge} é a eficiência de conversão de energia mecânica para energia elétrica no ponto de conexão do sistema.

3.8.4.4 Eficiência do sistema

De acordo com San Martín (2011), a eficiência do sistema (η) pode ser calculada como sendo a razão entre a energia liberada e a energia armazenada, como mostra a eq. (20) a seguir:

$$\eta = \frac{E_{lib}}{E_{arm}}, \quad (20)$$

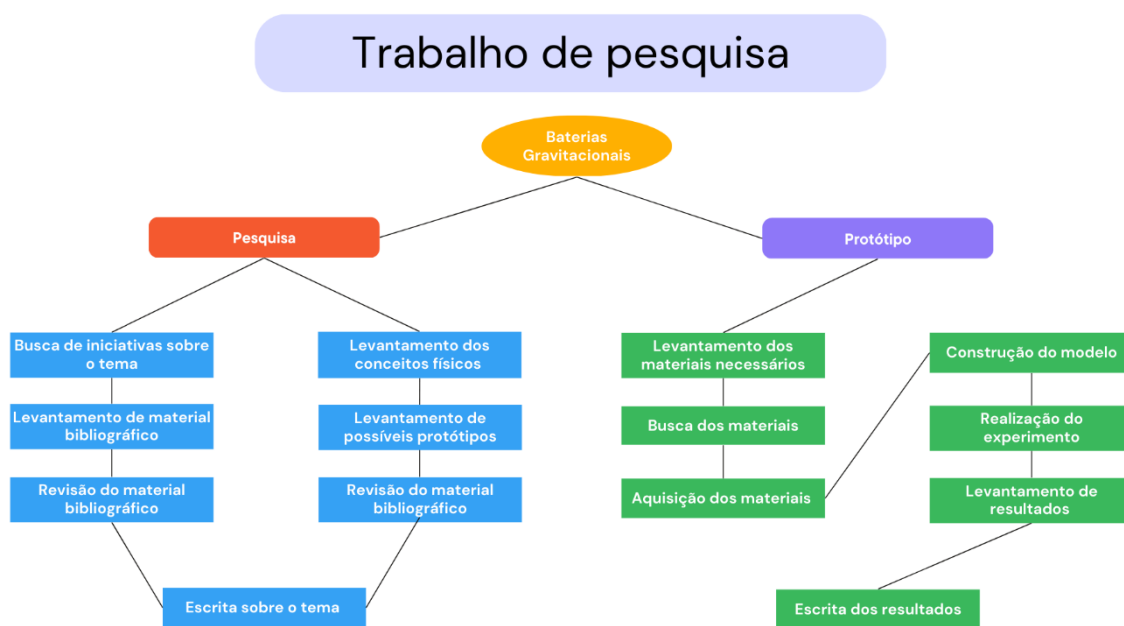
ou em termos de porcentagem como na eq. (21):

$$\eta(\%) = \frac{E_{lib}}{E_{arm}} \cdot 100 \%. \quad (21)$$

4 METODOLOGIA

Nesta seção, é descrito como o trabalho de pesquisa foi desenvolvido, especificando materiais e métodos. A Figura 10 ilustra um fluxograma com as etapas da pesquisa.

Figura 10 - Ilustração das etapas de desenvolvimento do trabalho



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

4.1 Levantamento bibliográfico

Através de pesquisas, foi realizado o levantamento de materiais de estudos relacionados ao tema, visando montar um acervo de embasamento teórico e prático para desenvolvimento do referido trabalho.

4.2 Construção de um pequeno protótipo de bateria gravitacional

Foi realizada uma investigação sobre um modelo de gerador na qual fosse possível operar também como motor para realizar a elevação da massa. O modelo escolhido foi o motor de prato de micro-ondas, com alimentação de 220V, velocidade de rotação de 5/6 RPM e frequência de 50/60Hz. O referido foi adquirido em uma oficina e é ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Modelo de motor utilizado no protótipo



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Em seguida, foi construída uma base de madeira, com pedaços reutilizados de uma oficina de reforma de estofados, para ser possível dar suporte ao motor e a sua haste de elevação do bloco. A base é ilustrada na Figura 12 a seguir.

Figura 12 - Base de madeira para o sistema



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Com a base já construída, foi realizada a confecção da haste de elevação (Figura 13), utilizando um suporte para antenas descartado, e foram fixadas roldanas nos pontos de contato do cabo para diminuir a resistência por atrito.

Figura 13 - Haste de elevação do sistema



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Um cabo é conectado na polia fixada no eixo do motor (Figura 14) e passado pelas roldanas da haste até conectar a massa dos objetos a serem suspensos. Com isso, ao girar o eixo do motor, acontece então a suspensão das massas e, ao baixá-las, ocorre a rotação inversa do eixo do motor, acionando então seu funcionamento como gerador.

Figura 14 – Polia que é conectada ao eixo do motor



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

4.3 Experimento para verificação da eficiência da conversão de energia do protótipo

4.3.1 Materiais utilizados

4.3.1.1 protótipo de bateria confeccionada pelo autor;

A Figura 15 ilustra o protótipo de bateria desenvolvido, capaz de armazenar energia na forma de energia potencial gravitacional, assim como realizar o processo de conversão dessa energia para elétrica.

Figura 15 - Modelo de bateria desenvolvido



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

4.3.1.2 Balança digital;

Com o auxílio de uma balança digital (Figura 16), é realizada a quantificação da massa dos objetos suspensos.

Figura 16 - Modelo de balança digital utilizado



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

4.3.1.3 Fita métrica;

A fita métrica ilustrada na Figura 17 foi utilizada para verificar a altura entre a massa suspensa e o solo.

Figura 17 - Fita métrica utilizada



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Figura 19 - Voltímetro utilizado



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

4.3.1.7 Lâmpada de LED 8W.

Com a finalidade de tornar visual o efeito de geração realizado pelo sistema, uma lâmpada de LED foi conectada aos terminais do gerador, como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Modelo de lâmpada LED utilizada



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

4.3.2 Realização do experimento

Com os materiais em mãos, foi realizada a pesagem da massa proposta em uma balança digital, anotando seu valor. Como mostra na Figura 21.

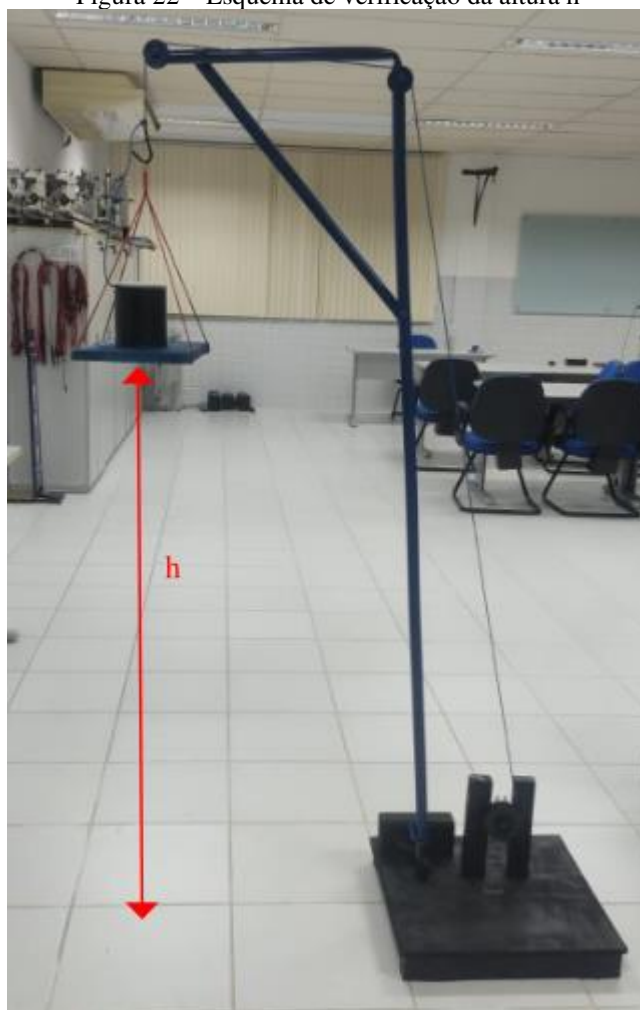
Figura 21 – Realização da pesagem da massa



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Com o auxílio dos técnicos do laboratório de física, a massa foi suspensa até a altura permitida pela haste e registrada, com o auxílio de uma fita métrica, a diferença de nível entre o solo e a parte inferior do objeto, ou seja, a primeira a tocar o solo quando realizado o movimento de descida. O esquema da Figura 22 ilustra a referência de altura (h) verificada.

Figura 22 – Esquema de verificação da altura h



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Com a massa devidamente suspensa, a lâmpada foi conectada aos terminais do motor e o circuito foi aberto, conectando assim o amperímetro para registro de corrente. Nos terminais de ligação da lâmpada, foi conectado um voltímetro para realizar a medição de tensão durante a descida. A Figura 22 ilustra o esquema de coleta de dados.

Figura 23 – Esquema utilizado para coleta de dados



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Com o circuito devidamente montado, a descida da massa foi liberada e registrada a corrente e tensão a cada segundo, montando assim uma base de dados para o cálculo da energia ali consumida.

Após a coleta de dados, foi realizado o cálculo da energia potencial armazenada no objeto. Com o valor referente à altura do objeto, sua massa e a aceleração da gravidade foram aplicados na eq. (22) para mensurar o valor total da energia armazenada:

$$E_{arm} = mgh. \quad (22)$$

Para o cálculo da energia entregue à lâmpada, foram encontradas z medidas de tensão em x intervalos de tempo. Com esses pontos definidos, foi realizado um cálculo prévio da tensão média pela eq. (23). De forma análoga, para a corrente, foram encontradas y medidas nos x intervalos de tempo, obtendo assim a média pela eq. (24). De posse de todos esses valores, foi realizada a aplicação na eq. (25) para ter a potência mensurada durante a descida das massas. O tempo total de descida das massas também foi registrado e multiplicando esse tempo pela potência entregue à lâmpada, como mostra a eq. (26), obteve-se a energia entregue à lâmpada:

$$V_{média} = \frac{\sum Z}{x}; \quad (23)$$

$$I_{média} = \frac{\sum y}{x}; \quad (24)$$

$$P = V_{média} \cdot I_{média}; \quad (25)$$

$$E_{ger} = P \cdot t. \quad (26)$$

Por fim, conhecendo a energia que foi armazenada nas massas e considerando essa como a energia de entrada do sistema, e conhecendo a energia entregue à lâmpada e considerando como a energia de saída do sistema, foi calculada a eficiência do sistema pela eq. (27):

$$\eta = \frac{E_{ger}}{E_{arm}}. \quad (27)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa seção apresenta os resultados e discussões da pesquisa através da análise de dados coletados experimentalmente. Os resultados são apresentados na forma de tabelas e gráficos para melhor observação e quantificação dos dados.

5.1 Energia potencial armazenada

Os resultados obtidos para o cálculo da energia potencial gravitacional, bem como o resultado da energia armazenada, são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados para cálculo da energia potencial gravitacional armazenada	
Massa dos objetos (kg)	1,360
Altura dos objetos (m)	1,585
Aceleração da gravidade (m/s^2)	9,810
Energia armazenada (J)	21,015

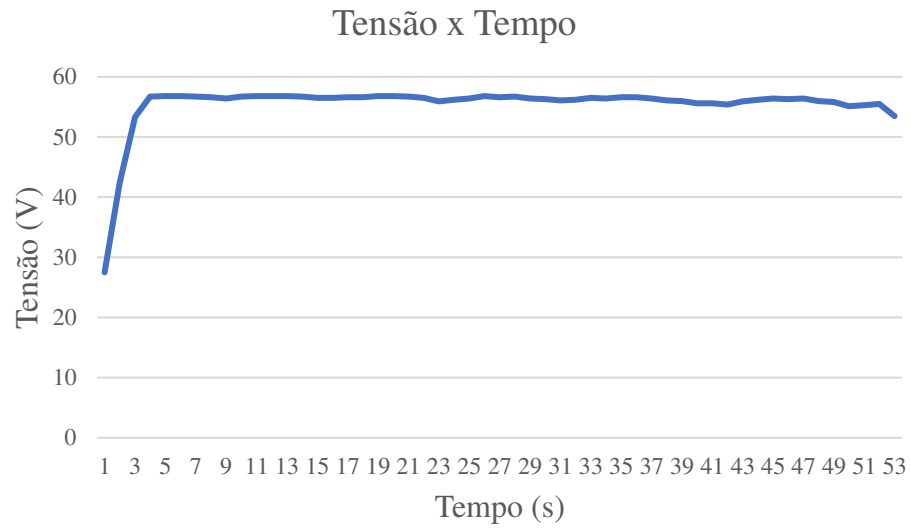
Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Essa energia armazenada, se aplicada a um modelo de larga escala, seria proveniente da conversão da energia elétrica que seria desperdiçada em picos de geração ou nos horários com tarifas mais moderadas, por exemplo.

5.2 Energia gerada

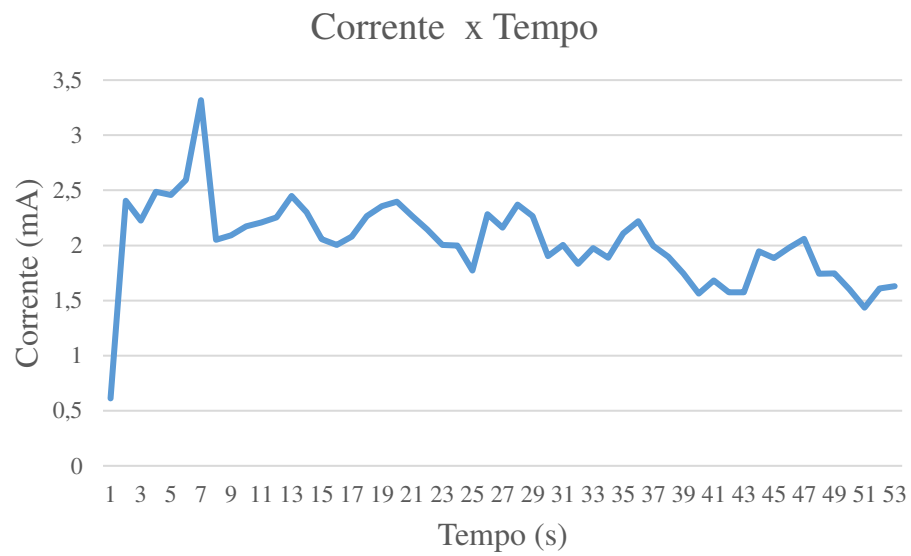
Os resultados de corrente, tensão e potência a cada segundo são apresentados no anexo A. Uma melhor análise do comportamento dessas três grandezas pode ser observada através de gráficos, como mostra o Gráfico 1 para a tensão, Gráfico 2 para corrente e o Gráfico 3 para a potência.

Gráfico 1 – Gráfico de tensão *versus* tempo

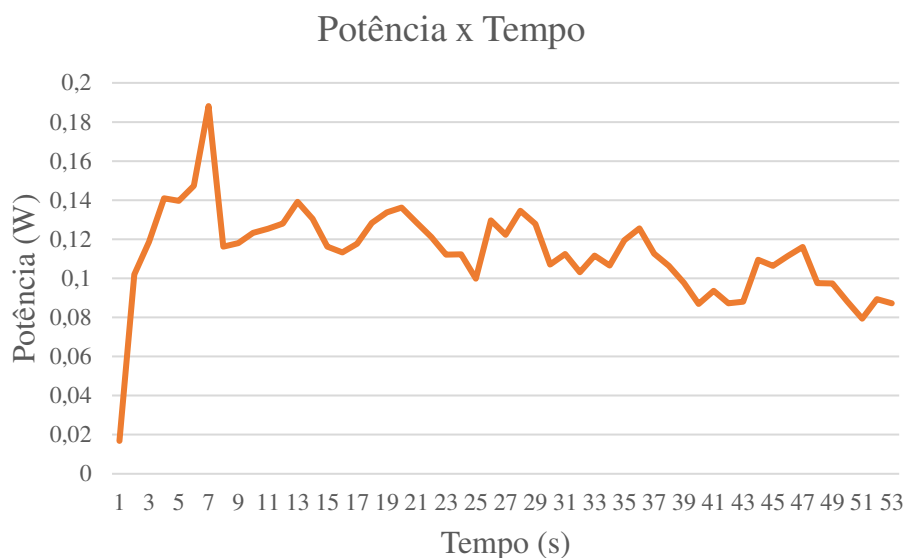


Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Gráfico 2 - Gráfico de Corrente *versus* tempo



Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Gráfico 3 - Gráfico de potência *versus* tempo

Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Conforme mostrado na tabela anexada, podemos perceber que a corrente apresentou uma maior variação em relação a tensão, tendo em vista que em sua escala qualquer variação é mais perceptível, proporcionando então uma variação de potência e consequentemente apresentando luminosidade variável na lâmpada durante o percurso. Os gráficos de corrente (Gráfico 2), tensão (Gráfico 1) e potência (Gráfico 3) apresentam visualmente uma melhor percepção desse fenômeno.

Para fins de quantificação de uma base de dados, valores médios foram obtidos. A Tabela 3 mostra valores de tensão e corrente média.

Tabela 3 – Resultados de tensão e corrente médias	
Tensão média (V)	Corrente média (mA)
56,400	2,052

Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Os valores de tensão e corrente médias da Tabela 3 são utilizados para cálculo de potência média. A partir dessa potência e o tempo total de descida das massas, é calculada a energia gerada. A Tabela 4 apresenta os valores de potência média, tempo de descida e energia gerada.

Tabela 4 - Resultados de potência média, tempo de descida e energia gerada

Potência média (W)	Tempo de descida (s)	Energia gerada (J)
0,113	53	5,989

Fonte: De Autoria Própria, 2023.

5.3 Eficiência

Com base nos valores de energia armazenada e energia gerada, foi possível calcular a eficiência do modelo por meio da eq. 26, considerando que toda a diferença de energia se dá através das perdas ao longo da conversão de energia. A Tabela 5 apresenta os valores de energia armazenada, energia gerada e a eficiência do sistema.

Tabela 5 – Resultados para a energia armazenada, energia gerada e eficiência

Energia armazenada (J)	Energia gerada (J)	Eficiência (%)
21,146	5,989	28,322

Fonte: De Autoria Própria, 2023.

Considerando que as características eletromecânicas do motor foram desprezadas, e que o exemplar utilizado foi adaptado para fins de geração, é perceptível que o modelo de armazenamento de energia através da energia potencial gravitacional tem uma significativa expressão para utilização.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos grandes problemas enfrentados quanto à produção e distribuição de energia elétrica limpa, as baterias gravitacionais por sistema de pesos surgem como uma promissora alternativa. Uma vez que esses sistemas, associados a sistemas de geração renováveis, como os sistemas eólicos e solares, podem ampliar a escala de geração, fazendo com que a energia gerada em picos de produção seja armazenada e reutilizada quando solicitada. Outra alternativa a ser considerada é a redução de custos da tarifa energética, onde sistemas como esse seriam responsáveis por armazenar energia durante horários com tarifas reduzidas e, ao chegar os horários de tarifas mais elevadas, o fornecimento de energia seria proveniente do sistema de armazenamento.

Por meio do estudo realizado através dos experimentos, foi possível verificar a eficiência da utilização de baterias gravitacionais por sistemas de pesos como uma fonte promissora para o armazenamento de energia elétrica de forma sustentável e de grande longevidade. Uma vez que, para o sistema apresentado, a taxa de aproveitamento da energia potencial gravitacional chegou a mais de 28%, considerando sistemas previamente dimensionados, voltados para a melhoria dessa eficiência, ela pode chegar a 80%, como apontado por Ruoso (2019).

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Verificação de variações no sistema, como o raio da polia fixada ao eixo, utilização de mais de uma polia para controle de velocidade na descida da massa.
- Estudos eletromecânicos relacionados a um modelo de gerador que se adaptasse de forma mais significativa ao sistema, fazendo com que a potência gerada tornasse cada vez melhor.
- Melhorias e adaptações para uma maior durabilidade no tempo de geração.
- Estudo de quantificação das perdas durante o processo, para então buscar reduzi-las.

REFERÊNCIAS

- ANEKE, Mathew; WANG, Meihong. Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review. **Applied Energy**, v. 179, p. 350-377, 2016.
- ARES. **The Power of Gravity**: gravity power: non-explosive, non-flammable, non-degrading and freely available. Gravity Power: Non-Explosive, Non-Flammable, Non-Degrading And Freely Available. Disponível em: <https://aresnorthamerica.com/>. Acesso em: 20 mar. 2023.
- BRASIL. SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL. . **O sistema em números**. 2023. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 26 jan. 2023.
- CAVA, Francesca et al. Advanced rail energy storage: green energy storage for green energy. In: **Storing Energy**. Elsevier, 2016. p. 69-86.
- CHAVES, Alaor; SAMPAIO, José F. **Física básica: mecânica**. Grupo Gen-LTC, 2000.
- DE FIGUEIREDO, Filipe Papa. Armazenamento de Energia Solar e Eólica por Usinas Hidráulicas Reversas: Uma Solução para o Brasil?. 2021.
- DIVYA, K. C.; ØSTERGAARD, Jacob. Battery energy storage technology for power systems—An overview. **Electric power systems research**, v. 79, n. 4, p. 511-520, 2009.
- ENERGY VALT. **PHOTO GALLERY**: ev1 cdu castione, switzerland 143. EV1 CDU Castione, Switzerland 143. 2022. Disponível em: <https://www.energyvault.com/photo-gallery>. Acesso em: 12 mar. 2023.
- FRANKLIN, Miles et al. Gravity energy storage systems. In: **Storing Energy**. Elsevier, 2022. p. 91-116.
- G1. São Paulo, 13 nov. 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/meio-ambiente/cop-26/noticia/2021/11/13/cop26-texto-final-e-acordado-apos-pedido-de-mudanca-de-ultima-hora-mas-ainda-assim-defende-reducao-de-combustiveis-fosseis.ghml>. Acesso em: 25 jan. 2023.
- GEORGIOUS, Ramy et al. Review on energy storage systems in microgrids. **Electronics**, v. 10, n. 17, p. 2134, 2021.
- GRAVITY POWER. **Low-cost energy storage with minimal environmental impact**. Disponível em: <https://www.gravitypower.net/>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- GRAVITRICITY. **Projects**: multi-weight project. Multi-Weight Project. Disponível em: <https://gravitricity.com/projects/>. Acesso em: 25 jan. 2023.
- HADJIPASCHALIS, Ioannis; POULLIKKAS, Andreas; EFTHIMIOU, Venizelos. Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 13, n. 6-7, p. 1513-1522, 2009.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012.

HAYT JR, William H.; BUCK, John A. **Eletromagnetismo**. Bookman Editora, 2013.

HESSEL, Roberto; FRESCHI, Agnaldo A.; SANTOS, Francisco J. dos. Lei de indução de Faraday: Uma verificação experimental. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, 2015.

IEA (2022), Energy Statistics Data Browser, IEA, Paris. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>>. Acesso em: 25 jan. 2023.

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

MORSTYN, Thomas; BOTHA, Christoff D. Gravitational energy storage with weights. **Encyclopedia of energy storage**. Amsterdam: Elsevier, p. 64-73, 2022.

MORSTYN, Thomas; CHILCOTT, Martin; MCCULLOCH, Malcolm D. Gravity energy storage with suspended weights for abandoned mine shafts. **Applied energy**, v. 239, p. 201-206, 2019.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A.. **Circuitos elétricos**. 10. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015. Tradução Sonia Midori Yamamoto ; revisão técnica Antônio Emílio Angueth de Araújo, Ivan José da Silva Lopes

ONS. **Geração de energia**. 2023. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: 31 jan. 2023.

QUARTZ. **Stacking concrete blocks is a surprisingly efficient way to store energy**. Disponível em: <https://qz.com/1355672/stacking-concrete-blocks-is-a-surprisingly-efficient-way-to-store-energy>. Acesso em: 25 mar. 2023.

RATHORE, Arun; PATIDAR, N. P. Optimal sizing and allocation of renewable based distribution generation with gravity energy storage considering stochastic nature using particle swarm optimization in radial distribution network. **Journal of Energy Storage**, v. 35, p. 102282, 2021.

REYNOLDS, Matt. **Gravity Could Solve Clean Energy's One Major Drawback**: finding green energy when the winds are calm and the skies are cloudy has been a challenge. storing it in giant concrete blocks could be the answer.. Finding green energy when the winds are calm and the skies are cloudy has been a challenge. Storing it in giant concrete blocks could be the answer.. 2022. Disponível em: <https://www.wired.com/story/energy-vault-gravity-storage/>. Acesso em: 13 nov. 2022.

RUOSO, Ana Cristina; CAETANO, Nattan Roberto; ROCHA, Luiz Alberto Oliveira. Storage gravitational energy for small scale industrial and residential applications. **Inventions**, v. 4, n. 4, p. 64, 2019.

SAN MARTÍN, J. I. et al. Energy storage technologies for electric applications. In: **International Conference on Renewable Energies and Power Quality**. 2011. p. 15.

SINGH, Shakti; SINGH, Mukesh; KAUSHIK, Subhash Chandra. Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system. **Energy Conversion and Management**, v. 128, p. 178-190, 2016.

SOUZA, L. B. Leonardo. Gravity Light: Uma luz que funciona por gravidade. Autossustentável. Disponível em: <<https://autossustentavel.com/2018/08/gravitylight.html>>. Acesso em: 20 set. 2022.

SUBERU, Mohammed Yekini; MUSTAFA, Mohd Wazir; BASHIR, Nouruddeen. Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 499-514, 2014.

SUBBURAJ, Anitha S.; PUSHPAKARAN, Bejoy N.; BAYNE, Stephen B. Overview of grid connected renewable energy based battery projects in USA. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 219-234, 2015.

TIPLER, Paul Allen; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros**: volume 1 : mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. 6. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009.

UCZAI, Pedro Relator; TAVARES, Wagner Marques; QUEIROZ FILHO, Alberto Pinheiro de. Energias renováveis: riqueza sustentável ao alcance da sociedade. 2012.

ANEXO A – DADOS DE TENSÃO E CORRENTE A CADA SEGUNDO DURANTE A GERAÇÃO (continua)

Tempo (s)	Tensão (V)	Corrente (mA)	Potência (W)
1	27,500	0,612	0,0168
2	42,400	2,406	0,102
3	53,300	2,225	0,118
4	56,700	2,487	0,141
5	56,800	2,457	0,139
6	56,800	2,595	0,147
7	56,700	3,318	0,188
8	56,600	2,052	0,116
9	56,400	2,092	0,118
10	56,700	2,174	0,123
11	56,800	2,207	0,125
12	56,800	2,254	0,128
13	56,800	2,449	0,139
14	56,700	2,300	0,130
15	56,500	2,056	0,116
16	56,500	2,005	0,113
17	56,600	2,080	0,117
18	56,600	2,266	0,128
19	56,800	2,355	0,133
20	56,800	2,398	0,136
21	56,700	2,267	0,128
22	56,500	2,144	0,121
23	55,900	2,006	0,112
24	56,200	1,998	0,112
25	56,400	1,771	0,099
26	56,800	2,283	0,129
27	56,600	2,160	0,122
28	56,700	2,372	0,134
29	56,400	2,267	0,128
30	56,300	1,902	0,107
31	56,100	2,004	0,112
32	56,200	1,834	0,103
33	56,500	1,976	0,112
34	56,400	1,888	0,106
35	56,600	2,110	0,119
36	56,600	2,219	0,126
37	56,400	1,997	0,113

ANEXO A - DADOS DE TENSÃO E CORRENTE A CADA SEGUNDO DURANTE A GERAÇÃO (conclusão)

38	56,100	1,896	0,106
39	56,000	1,746	0,097
40	55,600	1,562	0,086
41	55,600	1,683	0,093
42	55,400	1,575	0,087
43	55,900	1,575	0,088
44	56,200	1,947	0,109
45	56,400	1,885	0,106
46	56,300	1,979	0,111
47	56,400	2,059	0,116
48	56,000	1,743	0,097
49	55,800	1,745	0,097
50	55,100	1,602	0,088
51	55,300	1,436	0,079
52	55,500	1,609	0,089
53	53,500	1,630	0,087