



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

GUSTAVO DIAS DE FREITAS

**SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DA FORÇA DE
EMPUXO**

CARAÚBAS

2023

GUSTAVO DIAS DE FREITAS

**SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DA FORÇA DE
EMPUXO**

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

F866s Freitas, Gustavo Dias de.
Sistema de armazenamento de energia por meio
da força de empuxo / Gustavo Dias de Freitas. -
2023.
52 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. Protótipo. 3.
Força de empuxo. 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.

GUSTAVO DIAS DE FREITAS

**SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DA FORÇA DE
EMPUXO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Interdisciplinar 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.iti.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,
OU=UFERSA - Universidade Federal Rural
do Semi-Árido, O=ICPEdu, C=BR

MARCOS VINICIUS DE MENDONÇA FERREIRA
Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2023.05.24 14:02:03-0300
Font: PDF-Reader Versão: 11.2.2

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.iti.gov.br>

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

Aos meus pais, Francisco Freitas e Evilma Dias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me fortalecer para chegar ao fim dessa jornada e me conceder forças para não desistir.

Também gostaria de agradecer a toda minha família, em especial ao meu pai Francisco Freitas, a minha mãe Evilma Dias e a minha irmã Sara Dias, que sempre me apoiaram em todas as etapas da minha vida, incluindo esta jornada acadêmica, sem eles eu não conseguiria essa conquista.

A minha amada Camila Clara, que sempre está ao meu lado me fazendo lembrar dos meus objetivos, sempre me ajudando quando mais preciso, agradeço por todo amor e carinho, te amo.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Mackson Matheus França Nepomuceno, pela sua orientação dedicada e valiosos conselhos. Sem o seu comprometimento este trabalho não teria sido possível.

Também gostaria de agradecer a banca examinadora pela disponibilidade em participar deste projeto e por todas as sugestões para um melhor trabalho.

Agradeço aos meus amigos, por todo o apoio e compartilhamento de conhecimentos. Agradeço em especial aos irmãos que a vida me deu pela parceria e contribuições: Gabriel Ribeiro, Pablo Alves, Pedro João e Romel Monteiro.

Agradeço aos meus companheiros de curso, por estarem ao meu lado durante o processo desta conquista. Em especial aos grandes amigos Kennedy Dias, Tulio Emmanuel, Carlos Henrique, Teslim Zarif e Mateus Felipe, por toda a ajuda durante essa jornada.

Por fim, agradeço a todos que, direto ou indiretamente, contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Obrigado(a) a todos.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

RESUMO

Com o aumento da utilização de fontes renováveis, como a energia eólica e solar, para a geração de energia elétrica, novos desafios foram apresentados, incluindo a necessidade de armazenamento dessa energia elétrica. As fontes renováveis produzem energia de forma intermitente, o que pode não coincidir com a demanda energética, algumas vezes gerando excedentes. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de armazenamento desta energia utilizando a força de empuxo. O protótipo foi construído com materiais simples e acessíveis, utilizando uma garrafa pet presa a um barbante como objeto de flutuação que é levado até uma determinada profundidade em um tonel preenchido com água, por meio de um sistema de polias acionado por um motor de prato de micro-ondas. Os dados foram coletados por meio de um voltímetro e um amperímetro conectados ao circuito, permitindo o cálculo da energia que será gerada a partir do trabalho da força de empuxo e da energia entregue à uma lâmpada. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema é capaz de armazenar energia e convertê-la em energia elétrica utilizável. Este trabalho contribui para o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia renovável, mostrando uma possibilidade de como armazenar a energia que é desperdiçada pelas fontes renováveis como eólica e solar.

Palavras-chave: armazenamento de energia; força de empuxo; protótipo.

ABSTRACT

With the increasing use of renewable sources such as wind and solar energy for electricity generation, new challenges have been presented, including the need to store this electrical energy. Renewable sources produce energy intermittently, which may not coincide with energy demand, sometimes resulting in excess production. This work presents the development of a prototype for storing this energy using buoyancy force. The prototype was built with simple and affordable materials, using a PET bottle attached to a string as a floating object, which is taken to a certain depth in a water-filled container by means of a pulley system powered by a microwave turntable motor. Data were collected using a voltmeter and an ammeter connected to the circuit, allowing the calculation of the energy generated from the buoyancy force work and the energy delivered to a light bulb. The results obtained demonstrated that the system is capable of storing energy and converting it into usable electrical energy. This work contributes to the development of renewable energy storage systems, showing a possibility of how to store the energy wasted by renewable sources such as wind and solar.

Keywords: energy storage; buoyancy force; prototype.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico da geração de energia elétrica em GWh por meio da fonte de energia eólica no Brasil no ano de 2020.	22
Figura 2 - Gráfico da geração de energia elétrica em GWh por meio da fonte de energia eólica no Brasil no ano de 2021.	23
Figura 3 - Gráfico da geração de energia elétrica em GWh por meio da fonte de energia eólica no Brasil no ano de 2022.	23
Figura 4 - Sistema de armazenamento de energia utilizando a energia cinética.	25
Figura 5 - Sistema de armazenamento de energia utilizando ar comprimido.	26
Figura 6 - Sistema de armazenamento de energia utilizando um volante.	27
Figura 7 - Sistema de armazenamento de energia por meio da força de empuxo.	28
Figura 8 - Armazenamento de energia por meio da força de empuxo com plataforma e boias de isopor cilíndricas.	30
Figura 9 - Sistema de boias submersas produzido pela Whirl Energy.	31
Figura 10 - Fluxograma com as etapas realizadas no decorrer da pesquisa.	32
Figura 11 - Tonel utilizado no protótipo.	33
Figura 12 - Objeto de flutuação utilizado no protótipo.	33
Figura 13 – Proveta utilizada para a medição do volume da garrafa pet.	34
Figura 14 - Motor de prato de micro-ondas utilizado.	35
Figura 15 - Base utilizada para acoplar o motor e a haste de alumínio.	35
Figura 16 - Haste com sistema de polias.	36
Figura 17 - Barbante utilizado para prender o objeto de flutuação.	37
Figura 18 - Base com a polia.	37
Figura 19 - Polia que será acoplada ao motor.	37
Figura 20 - Protótipo montado pelo autor.	39
Figura 21 - Fita métrica utilizada para a medição da profundidade.	40
Figura 22 - Medição da profundidade em que o objeto de flutuação foi levado.	40
Figura 23 - Lâmpada de LED 8 W.	41
Figura 24 - Multímetro utilizado.	41
Figura 25 - Circuito montado.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados utilizados para o cálculo da energia armazenada pela força de empuxo.	44
Tabela 2 – Dados coletados para o cálculo da energia entregue à lâmpada.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GWh	Giga watts hora
fem	Força eletromotriz induzida
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
FGV	Fundação Getulio Vargas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
3.1 PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES	17
3.2 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.....	17
3.2.1 Variação de energia mecânica do sistema	18
3.3 LEI DE FARADAY	20
3.4 POTÊNCIA.....	21
3.4.1 Eficiência	21
3.5 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	21
3.6 FONTES DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DE SISTEMAS MECÂNICOS.....	25
3.6.1 Sistema de armazenamento de energia por meio da energia cinética	25
3.6.2 Sistema de armazenamento de energia utilizando ar comprimido.....	25
3.6.3 Sistema de armazenamento de energia utilizando volante de inércia	26
3.7 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DA FORÇA DE EMPUXO	27
4. METODOLOGIA	32
4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
4.2 ELABORAÇÃO DO PROTÓTIPO	32
4.3 PROCEDIMENTO PARA A VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO PROTÓTIPO	38
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
7. REFERÊNCIAS	49
ANEXO A – VALORES DE TENSÃO E CORRENTE COLETADOS A CADA SEGUNDO DURANTE O MOVIMENTO DE SUBIDA DA GARRAFA PET.....	52

1. INTRODUÇÃO

As fontes de energias renováveis desempenham um papel fundamental na contemporaneidade, seja pela sua eficiência energética, seja pelo seu papel ecológico, uma vez que utiliza recursos naturais, a exemplo da energia solar e eólica. O uso das energias renováveis surgiu no cenário global através de discussões em torno dos impactos ambientais e da crise do petróleo na década de 70. No Brasil, as fontes renováveis atingiram a demanda de uso de 46,1% na matriz nacional, o que equivale ao triplo do contexto mundial, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2019).

No panorama nacional, a energia eólica abrange umas das principais fontes, já que desempenha a sua utilidade na redução do impacto ambiental e na geração de empregos em áreas vulneráveis economicamente. Diante dessa perspectiva, a rede energética brasileira constituiu um crescimento notório na última década. Segundo a ONS, a energia eólica hoje representa 10,9% da matriz energética nacional, e a expectativa é que atinja 13,6% ao fim de 2025 (BRASIL, 2020).

Apesar de tal feito, as energias renováveis apresentam desafios no cenário atual, sendo um deles o armazenamento de energia. O maior obstáculo das fontes alternativas é que elas são intermitentes, pois produzem energia não necessariamente quando há demanda, ou então podem estar indisponíveis quando a demanda for elevada. Em virtude desse impasse, o armazenamento de energia passa a ser um fator imprescindível para o uso eficiente das energias renováveis.

Diante desse contexto problemático, estudos vêm sendo discutidos e aprimorados para a efetivação de sistemas capazes de armazenar a energia proveniente das fontes renováveis. No Brasil, em agosto de 2016, a ANEEL realizou uma chamada para elaborar projetos de pesquisa e desenvolvimento em torno de tecnologias eficientes para o armazenamento de energia elétrica no setor nacional. A partir de então, mecanismos como os sistemas mecânicos passam a ser analisados com maior notoriedade no cenário nacional (LEITE; DELGADO; HAGE, 2017).

Os sistemas mecânicos são tecnologias capazes de armazenar a energia que seria desperdiçada por sistemas renováveis comuns. Esse mecanismo funciona por intermédio de dispositivos que armazenam energia elétrica excedentes das fontes alternativas, e que utilizam sua forma de energia mecânica, podendo ser cinética, potencial gravitacional, força de empuxo e potencial elástica para devolver energia elétrica quando as fontes renováveis demandarem.

Os sistemas de armazenamento de energia podem estar divididos de acordo com as suas características físicas, ou seja, a tecnologia de energia hidrelétrica bombeada e armazenamento de energia por gravidade irão utilizar a energia potencial gravitacional. O sistema volante de

inércia irá utilizar a energia cinética rotacional e o armazenamento de energia em ar comprimido irá utilizar energia potencial.

De acordo com a FGV, nos parques eólicos do nordeste brasileiro as tecnologias de armazenamento seriam eficientes, uma vez que, quando os ventos param de soprar de forma severa, manobras complexas devem ser realizadas em pouco tempo para que esse volume de potência seja substituído por outras centrais geradoras, as quais estão localizadas, majoritariamente, a muitos quilômetros (LEITE; DELGADO; HAGE, 2017).

Com o avanço das pesquisas em torno dos sistemas de armazenamento de energia, propostas mais funcionais começaram a ganhar destaque. Dentro desses fatores, o trabalho realizado pela força de empuxo é uma das maneiras de gerar e armazenar energia elétrica. O seu funcionamento se deve pelo armazenamento de energia utilizando a fluatibilidade de um material pela força de empuxo.

Sendo assim, o estudo em questão busca apresentar consonância entre a teoria e a prática sobre a força de empuxo, a qual será abordada como uma tecnologia eficiente para o armazenamento de energia elétrica, evitando assim desperdícios no ramo das fontes renováveis.

Partindo dessa introdução, o trabalho também contém os objetivos traçados pelo autor, o referencial teórico envolvendo conceitos teóricos e pesquisas que abordam o tema do trabalho, a metodologia que foi utilizada para a realização do trabalho, os resultados que foram obtidos por meio da aplicação da metodologia e uma discussão sobre os resultados. Por fim, as considerações finais incluindo o que foi possível obter a partir dos resultados e como esse estudo pode contribuir na área abordada.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar a construção de um protótipo de um sistema de armazenamento de energia por meio de um sistema mecânico baseado na força de empuxo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar na prática o funcionamento da Lei de Faraday;
- Apresentar um mecanismo de armazenamento de energia alternativo aos sistemas químicos;
- Averiguar a possibilidade de utilização deste sistema mecânico de armazenamento de energia a partir do cálculo da eficiência do sistema.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES

Quando um corpo é colocado em um líquido, como a água, o fluido será deslocado a medida que o corpo esteja entrando nele. Este corpo irá sofrer uma ação do fluido, uma força cuja direção é vertical e para cima. Essa força é conhecida como força de empuxo (MARTINS, 2022).

No momento em que um corpo que está flutuando em um dado fluido, significa que ele possui uma densidade menor que a do fluido. O oposto ocorre quando o corpo tem uma densidade maior, o que ocasiona o afundamento do corpo no fluido (YOUNG; FREEDMAN, 2015).

O módulo da força de empuxo é igual ao módulo peso do fluido que está sendo deslocado pelo objeto de flutuação (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

A equação 1 mostra como a força de empuxo pode ser calculada.

$$F_E = m_f g, \quad (1)$$

onde F_E é a força de empuxo, m_f é igual à massa do fluido deslocado e g é a gravidade.

A massa do fluido deslocado pode ser expressa pelo produto entre densidade do fluido (ρ_f) e o volume do fluido deslocado (V_f). Substituindo na equação 1, a equação para o cálculo da força de empuxo é mostrada a seguir:

$$F_E = \rho_f V_f g. \quad (2)$$

3.2 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Segundo Halliday e Resnick (2012), a lei da conservação de energia está relacionada a energia total de um sistema. A energia do sistema pode ser alterada apenas se houver uma transferência de energia para fora ou dentro do próprio sistema. A equação 3 mostra como a lei da conservação de energia pode ser calculada, partindo de que o trabalho que é produzido sobre um sistema é uma maneira de transferir energia para um sistema

$$W = \Delta E = \Delta E_{mec} + \Delta E_t + \Delta E_{int}, \quad (3)$$

no qual W o trabalho realizado sobre um sistema, ΔE é igual a variação total de um sistema, ΔE_{mec} é igual a variação de energia mecânica do sistema, ΔE_t é a variação de energia térmica e ΔE_{int} a variação de qualquer outro tipo de energia presente no sistema. No presente trabalho, o trabalho externo e a variação de energia interna são desconsiderados, logo, a energia presente no sistema só variou devido a energia associada à estrutura do sistema.

O trabalho produzido por uma força exercida sobre um sistema, no qual existe atrito, pode ser dado pela soma da variação de energia mecânica do sistema com a variação de energia térmica existente no sistema, muito semelhante a equação da lei da conservação de energia (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

3.2.1 Variação de energia mecânica do sistema

A variação de energia mecânica em sistema pode ser calculada a partir da soma das variações da energia cinética e energia potencial.

A energia cinética pode ser encontrada em corpos que se movimentam, a exemplo da energia cinética de translação e a energia cinética de rotação. A energia cinética de um corpo que está em movimento depende da massa e da velocidade do corpo. Essa energia pode ser nula apenas quando objeto estiver em repouso (YOUNG; FREEDMAN, 2015).

A energia cinética de translação pode ser calculada por meio da velocidade elevada ao quadrado (v^2) em que o corpo está se movendo e a massa (m) dele. A equação a seguir demonstra como calcular essa energia

$$K_T = \frac{mv^2}{2}. \quad (4)$$

O trabalho que é realizado para um dado corpo ser deslocado até o repouso é igual a energia cinética do corpo (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

Um corpo que está em rotação possui uma energia cinética de rotação. Essa energia não pode ser calculada da mesma maneira que a energia cinética de translação. Nesse caso, a energia cinética de rotação pode ser calculada a partir da equação 5

$$K_R = \frac{I\omega^2}{2}, \quad (5)$$

em que K_R é a energia cinética de rotação, I é o momento de inércia e ω é a velocidade angular do corpo.

O momento de inércia está associado a massa do corpo e também em como a massa desse corpo está distribuída sobre o eixo de rotação. Quanto maior o momento de inércia de um corpo, mais difícil será que o corpo execute o movimento de rotação (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2012).

A energia cinética pode ser utilizada para a geração de energia elétrica, sendo convertida através do eletromagnetismo, e pode ser convertida a partir de diferentes meios em que esteja presente, como vibrações, forças e também deslocamentos (BEEBY; TORAH; TUDOR, 2008).

A energia potencial de um sistema está relacionada com a posição do corpo desse sistema, tendo como exemplo a energia potencial gravitacional e a energia potencial elástica. A energia potencial gravitacional está associada a distância em que um dado corpo se encontra, tal como referência o chão (HELERBROCK, 2023).

A expressão matemática mostrada na equação 6, mostra como a energia potencial gravitacional pode ser calculada

$$U_g = mgh, \quad (6)$$

sendo U_g a energia potencial gravitacional e h a altura em que o corpo está em relação ao ponto de referência.

A energia potencial elástica é obtida por meio de corpos elásticos, que podem voltar a mesma forma inicial mesmo após se deformarem (YOUNG; FREEDMAN, 2015).

A forma matemática para obter a energia potencial elástica é mostrada pela equação 7

$$U_e = \frac{kx^2}{2}, \quad (7)$$

na qual U_e é a energia potencial elástica, k é a constante elástica do corpo e x é a deformação do corpo.

A constante elástica varia de acordo com o material de que cada corpo elástico é constituído, onde geralmente os materiais com maior dificuldade de se deformarem possuem uma constante elástica maior (HELERBROCK, 2023).

3.3 LEI DE FARADAY

Faraday notou que em um campo magnético estático não existe fluxo de corrente, mas um campo magnético variando no tempo é capaz de produzir uma tensão induzida dentro de um circuito fechado, proporcionando um fluxo de corrente (SADIKU, 2008).

A lei de indução de Faraday enuncia que a força eletromotriz induzida de uma espira fechada é dada pela taxa de fluxo magnético variando em relação ao tempo, com sinal negativo, por meio da área da espira (YOUNG; FREEDMAN, 2009).

A equação 8 mostra como a força eletromotriz induzida pode ser calculada

$$fem = -\frac{d\phi}{dt}, \quad (8)$$

em que $d\phi$ a variação de fluxo magnético e $\frac{d}{dt}$ a derivada em relação ao tempo.

Já a força eletromotriz induzida em uma bobina com várias espiras pode ser calculada a partir da equação a seguir:

$$fem = -N \frac{d\phi}{dt}, \quad (9)$$

onde N é o número de espiras da bobina.

O sinal negativo na fórmula é um indicativo de que a tensão induzida age de maneira contrária ao fluxo que a originou. Essa característica é conhecida como lei de Lenz, que ressalta que a direção da corrente induzida em um circuito é tal que o campo magnético por ela gerado se opõe ao campo magnético original (SADIKU, 2008).

Faraday percebeu que a força eletromotriz induzida e a corrente induzida não dependem da quantidade de linhas de campo que passam pela espira, mas é dependente de quanto que as linhas de campo vão variar (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2009).

3.4 POTÊNCIA

Para compreender melhor o comportamento de um circuito elétrico é preciso conhecer mais do que as duas variáveis básicas de um circuito (tensão e corrente). É necessário conhecer a potência que um determinado sistema elétrico pode manipular, pois essa informação é fundamental para determinar a eficiência energética do sistema (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

A equação 9 mostrada a seguir demonstra como a potência pode ser calculada

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (10)$$

sendo P a potência e E a energia.

3.4.1 Eficiência

A eficiência de um sistema de energia elétrica pode ser calculada a partir da razão entre a energia que é utilizada e a energia armazenada (Cheung *et al.*, 2012).

A equação a seguir demonstra a forma matemática da eficiência energética:

$$e = \frac{E_U}{E_A} \cdot 100\%, \quad (11)$$

onde e é igual a eficiência energética do sistema, E_U é a energia utilizada e E_A a energia fornecida ao sistema.

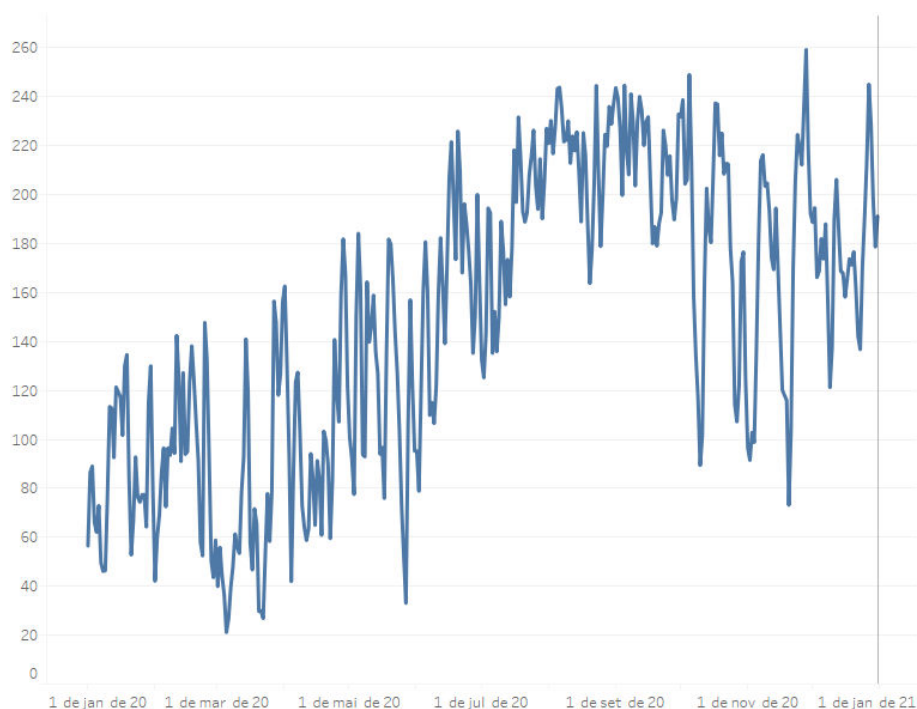
3.5 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

As energias renováveis apresentam desafios em torno do armazenamento de energia elétrica, uma vez que a produção excede a estocagem nesses sistemas, o que indica que o armazenamento de energia elétrica não obteve pesquisas e desenvolvimento suficiente em torno dessa área (BASSETT; CARRIVEAU; TING, 2016).

Devido ao grande investimento em energias renováveis, o estudo de como armazenar essas energias vem ganhando grande impulso. Um grande desafio no investimento dessas energias é que elas não conseguem manter uma constância na geração de energia elétrica, em alguns momentos geram muita energia e em outros não conseguem obter o que se demanda. Isso acontece devido essas fontes de energia serem variáveis, tendo como exemplo a energia eólica, onde a força do vento vai variar de acordo com a época do ano. (LEITE; DELGADO; HAGE, 2017).

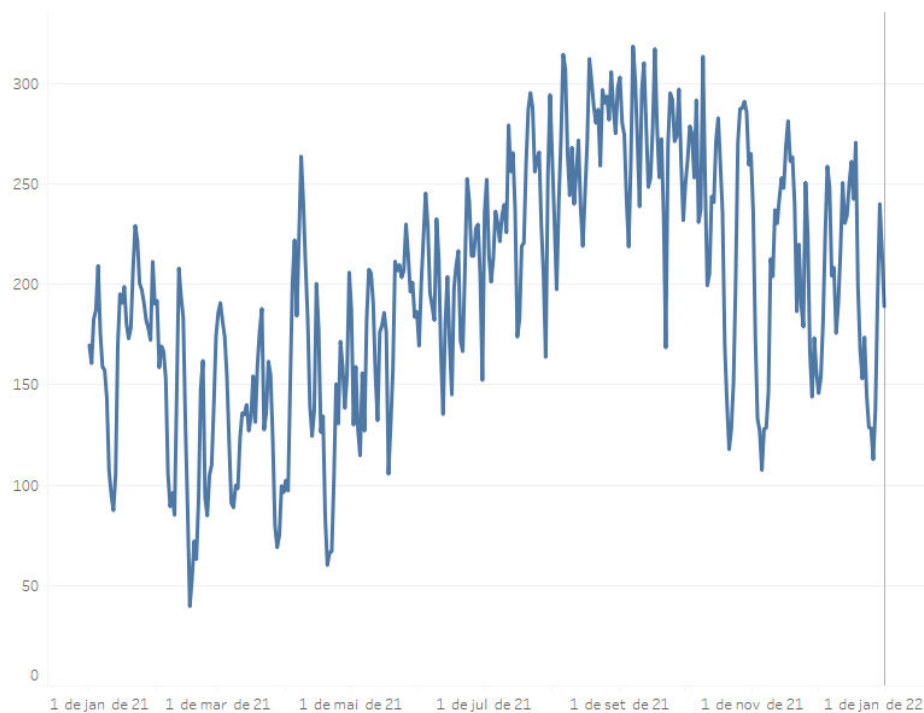
As figuras 1, 2 e 3 mostram os dados da geração de energia elétrica em GWh por meio da fonte de energia eólica no Brasil nos anos de 2020, 2021 e 2022.

Figura 1 - Gráfico da geração de energia elétrica em GWh por meio da fonte de energia eólica no Brasil no ano de 2020.



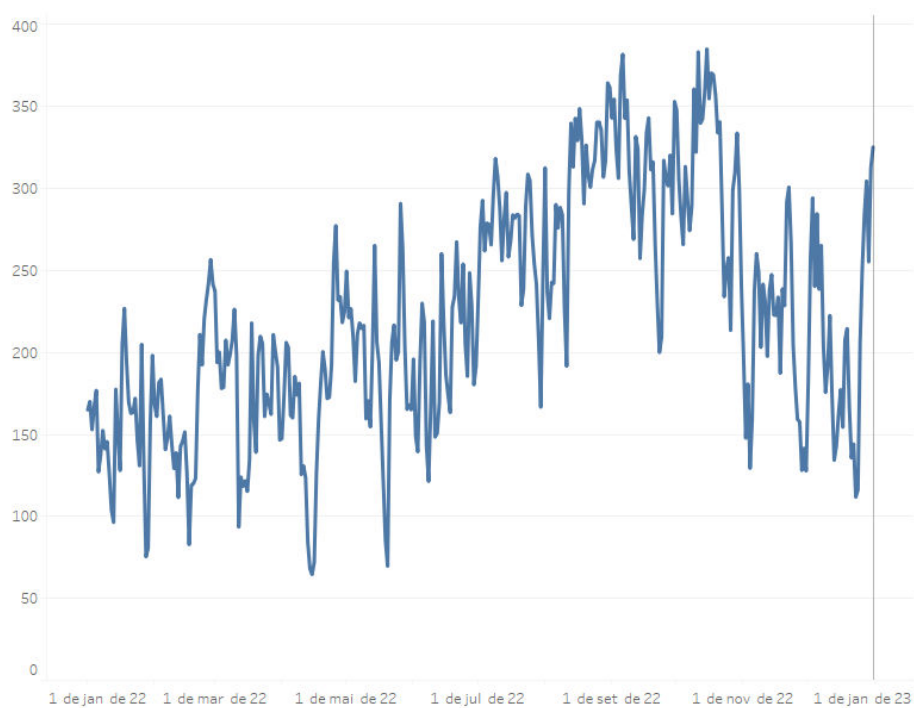
Fonte: (ONS, 2023).

Figura 2 - Gráfico da geração de energia elétrica em GWh por meio da fonte de energia eólica no Brasil no ano de 2021.



Fonte: (ONS, 2023).

Figura 3 - Gráfico da geração de energia elétrica em GWh por meio da fonte de energia eólica no Brasil no ano de 2022.



Fonte: (ONS, 2023).

Como é possível observar nos gráficos, existe uma variação na geração de energia eólica ao decorrer do ano, tornando ela uma fonte de energia variável. Esse fato mostra a importância da existência de instrumentos para o armazenamento desse tipo de geração de energia, com o intuito de obter mais eficiência no sistema.

A utilização das fontes renováveis para a geração de energia elétrica vem sendo cada vez mais desenvolvida nos últimos anos. Pelo fato de que esse tipo de fonte é bastante variável, será preciso que o desenvolvimento no armazenamento desse tipo de energia seja grande. Existem algumas formas para o armazenamento de energia elétrica: meios químicos, mecânicos e térmicos (IBRAHIM; ILINCA; PERRON, 2008).

O armazenamento de energia pode ser dividido em algumas categorias. Um exemplo está na utilização de baixa e média potência em regiões isoladas. O armazenamento pode ser utilizado para a alimentação de terminais de emergência e de transdutores em sistemas de baixa potência e para os sistemas de média potência tem-se o exemplo de redes elétricas municipais e individuais. Para esses sistemas de baixa e média potência a energia pode ser armazenada por meio de energia química, supercapacitores e em sistemas mecânicos, por meio da energia cinética (IBRAHIM; ILINCA; PERRON, 2008).

Para a escala de rede elétrica, os sistemas de armazenamento de energia utilizam tradicionalmente o armazenamento hidráulico bombeado (PSH) e as baterias. Porém, a capacidade de armazenamento das baterias em períodos semanais pode não ser viável em termos econômicos e de sustentabilidade (HUNT *et al.*, 2021).

Em categorias de sistemas de armazenamento de energia em grande escala, como em aplicações do controle da qualidade de energia, a energia pode ser armazenada por meio de baterias, utilizando a energia química, os sistemas hidráulicos que usam a energia potencial gravitacional e a técnica de ar comprimido (IBRAHIM; ILINCA; PERRON, 2008).

Segundo Hunt *et al.* (2021), quando se trata de armazenamento de energia em áreas montanhosas e em regiões aquáticas, não existe um sistema de armazenamento semanal acessível no mercado. O armazenamento de energia de flutuação pode ser uma alternativa viável. Nessa tecnologia, um motor ou gerador é utilizado para baixar um dado recipiente com algum gás comprimido para armazenar energia e o mesmo sistema é utilizado para gerar energia, que acontece quando o recipiente sobe na água, por meio da força de empuxo. O gás utilizado pode ser o ar e o hidrogênio, que possui uma densidade muito baixa.

3.6 FONTES DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DE SISTEMAS MECÂNICOS

3.6.1 Sistema de armazenamento de energia por meio da energia cinética

A tecnologia de energia hidrelétrica bombeada consiste em armazenar energia elétrica através do movimento da água, ou seja, sua energia cinética. Esse movimento ocorre por meio da fluidez do sistema de usinas hidrelétricas tradicionais, isto é, durante o processo de carga a água do reservatório inferior é bombeada para o superior. No processo de descarga ocorre o inverso, além da água fluir por meio das turbinas hidrelétricas, as quais são ligadas a geradores, ocorrendo assim o armazenamento de energia elétrica. Os grandes desafios desse sistema mecânico é a grande quantidade de água demandada e a área geográfica para a sua instalação (ŚWIERCZYŃSKI *et al.*, 2010).

A figura 4 mostra um exemplo desse tipo de sistema.

Figura 4 - Sistema de armazenamento de energia utilizando a energia cinética.



Fonte: adaptado de Aneke e Wang (2016).

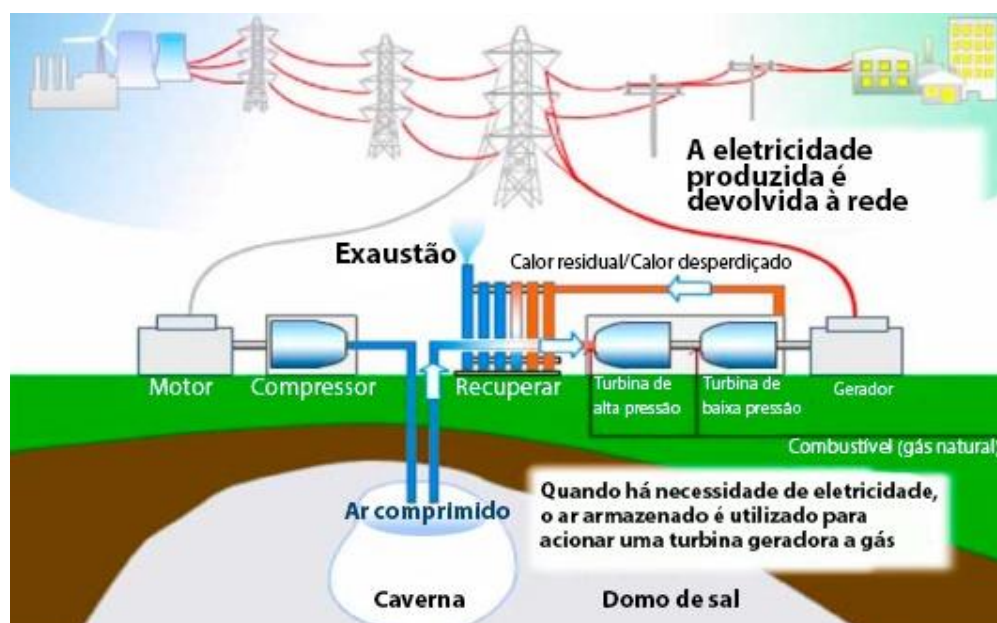
3.6.2 Sistema de armazenamento de energia utilizando ar comprimido

O sistema de armazenamento de energia em ar comprimido é outra tecnologia eficiente no armazenamento de energia elétrica das fontes renováveis. O seu funcionamento se deve pela fase de compressão, de armazenamento do ar e da expansão. Quando é necessário armazenar a energia elétrica das fontes renováveis, o motor elétrico do sistema ativa o compressor, que ao

comprimir o ar do sistema transforma a energia elétrica em energia potencial. Após essa etapa, o ar é armazenado em um reservatório, que geralmente são cavernas, poços subterrâneos ou minas. No momento em que ocorre a necessidade de consumir essa energia, esse ar do reservatório é liberado, aquecido e expandido na turbina ligada no gerador, sendo assim, resultará na geração de energia elétrica (WOLF; BUDT, 2014).

A figura 5 mostra um exemplo desse tipo de sistema.

Figura 5 - Sistema de armazenamento de energia utilizando ar comprimido.



Fonte: adaptado de Aneke e Wang (2016).

Há vantagens e desvantagens que influenciam na utilização desse tipo de sistema a sua grande capacidade de armazenamento, vida útil elevada e a redução de impactos ambientais são pertinentes para a efetivação dessa tecnologia. Porém, apresenta desafios em relação à eficiência energética do sistema e ao seu custo elevado (CHEN *et al.*, 2016).

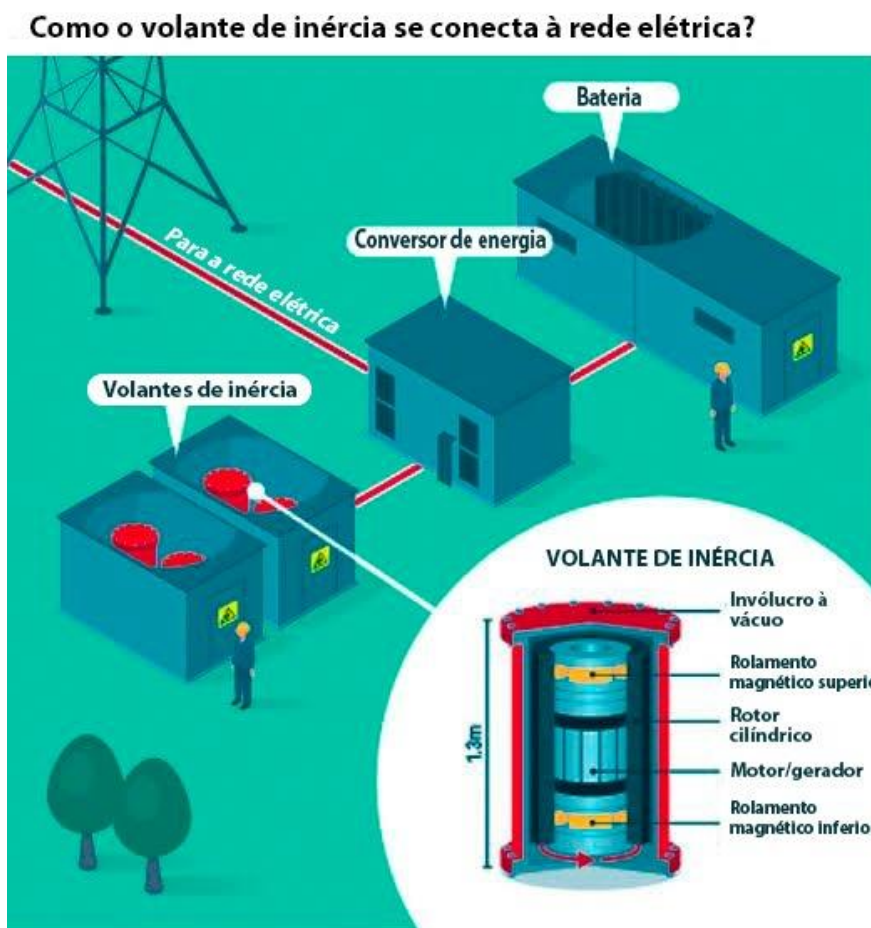
3.6.3 Sistema de armazenamento de energia utilizando volante de inércia

No sistema de armazenamento de volante de inércia é utilizado um volante para armazenar energia elétrica, por intermédio do princípio de massa rotativa. Nesse sistema o volante irá girar em alta velocidade com o intuito de transformar a energia elétrica recebida por um motor em energia mecânica. Quando o sistema precisa devolver essa energia, o inverso ocorre, ou seja, o volante é desacelerado transformando energia mecânica em energia elétrica.

Essa tecnologia mecânica apresenta altas eficiências e vida útil longa. Apesar dessas vantagens, o custo elevado e as altas taxas de auto descarga rodeiam esse sistema (AMIRYAR; PULLEN, 2017).

Um exemplo desse tipo de sistema pode ser observado na figura 6.

Figura 6 - Sistema de armazenamento de energia utilizando um volante.



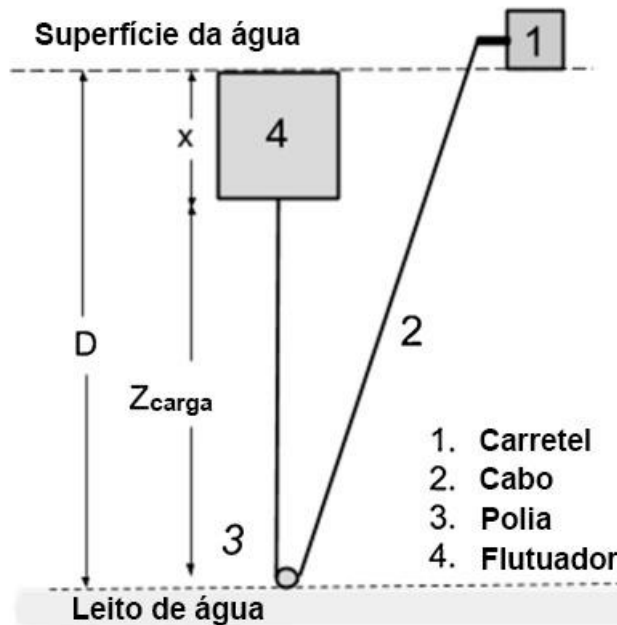
Fonte: adaptado de Porter (2017).

3.7 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DA FORÇA DE EMPUXO

Bassett, Carriveau e Ting (2016) estudaram uma maneira de utilizar o trabalho realizado pela força de empuxo como uma forma de armazenar a energia elétrica. O sistema utiliza um recipiente para flutuar, podendo ser uma boia, polia e carretel. A polia será posicionada no fundo do corpo de água, onde passará o cabo que estará preso à boia. O cabo vai estar preso ao carretel para que, com o auxílio de forças externas, a boia seja afundada até uma distância que

se deseja. A boia só irá subir se a força externa for retirada do sistema. A figura 7 mostra como o sistema pode ser observado.

Figura 7 - Sistema de armazenamento de energia por meio da força de empuxo.



Fonte: adaptado de Bassett, Carriveau e Ting (2016).

O sistema de armazenamento de energia, estudado por Bassett, Carriveau e Ting (2016), mostra que a capacidade de energia que pode ser armazenada vai depender do tamanho do corpo de água. Esse fato mostra que o sistema pode ser utilizado tanto em oceanos como em tanques. O potencial desse sistema de armazenamento de energia, considerando que o fluido é incompressível e o volume de flutuação é constante, pode ser calculado por meio da equação 11.

$$W_E = \int \vec{F}_E \cdot d\vec{r}, \quad (12)$$

onde:

$$\vec{F}_E = \rho g V \hat{k} \text{ e } d\vec{r} = dz \hat{k},$$

substituindo na integral mostrada na equação 11 e resolvendo ela a expressão para o trabalho realizado por uma força de empuxo é mostrado pela equação 12.

$$W_E = \rho g V z, \quad (13)$$

onde W_E é o trabalho realizado pela força de empuxo, que será a energia que é fornecida ao sistema, ρ é a densidade do fluido, V o volume do corpo de flutuação e z é a altura da coluna de água utilizada pelo corpo de flutuação.

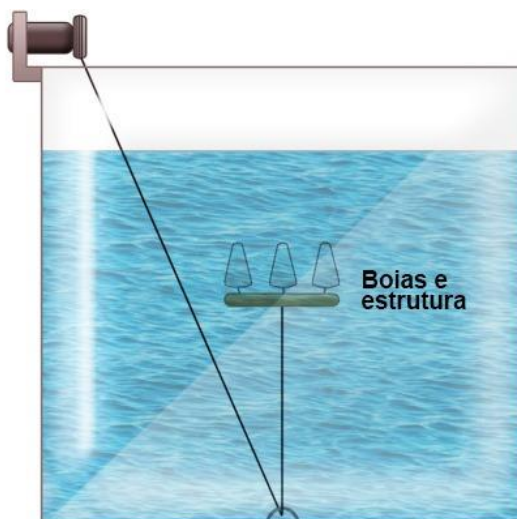
Hunt *et al.* (2021) demonstra um recipiente de armazenamento de balões, que consiste em armazenar a energia elétrica por meio do trabalho realizado pela força de empuxo. A aplicação do sistema se deve por meio de um motor-gerador, o qual irá funcionar debaixo d'água e estará preso à ancoragem e a um dispositivo de armazenamento de cabos. Todo esse aparato irá depender da eficiência do motor-gerador que trabalha debaixo d'água e em pressões muito altas. Caso esse caminho não seja viável, os cabos do sistema poderão ser conectados a um navio flutuando na superfície. Em razão do sistema de polias, o navio irá suportar apenas uma fração da força do sistema. Além disso, um sistema de linha de transmissão será utilizada para conectar o motor-gerador a usina ou à costa. A função da âncora é sustentar forças de flutuação muito altas produzidas pelo sistema. É por essa razão que a âncora deverá ser do tipo aço e parafusada no fundo do oceano. Essa tecnologia armazena energia por meio do consumo da eletricidade em um motor responsável por puxar o recipiente de flutuabilidade para o fundo do mar. Após essa etapa, gera energia elétrica elevando o recipiente de flutuação suportado pelo gerador.

Hunt *et al.* (2021) também menciona que embora eficiente no armazenamento de energia elétrica, esse sistema mecânico apresenta desafios. Entre eles, é que o sistema de armazenamento de balões necessita de áreas com profundidade adequada. Entretanto, essas áreas muitas vezes não são adequadas na instalação de eólicas em alto mar (offshore). Outro fator preocupante no uso dessa tecnologia é o seu risco, pois se as âncoras ou cabos não forem instalados corretamente, o destinatário do armazenamento subirá muito rápido e danificará qualquer estrutura na superfície acima do sistema de balões. Com esse risco, uma alternativa viável é o uso de tubulações capazes de se soltar uma da outra em caso de acidente citado anteriormente.

Alami (2015) explicita um sistema de armazenamento de energia elétrica, por meio da força de empuxo, e utiliza como objeto flutuante uma plataforma com 6 boias de isopor, onde as boias foram feitas em uma máquina com um caminho em espiral por volta da superfície da boia. Além disso, o sistema apresenta um gerador que tem uma polia conectada a ele, na polia

há um fio de nylon para ser conectado a plataforma, o fio passa por uma âncora fixada no fundo do corpo de água. A figura 8 mostra como pode ser observado esse sistema.

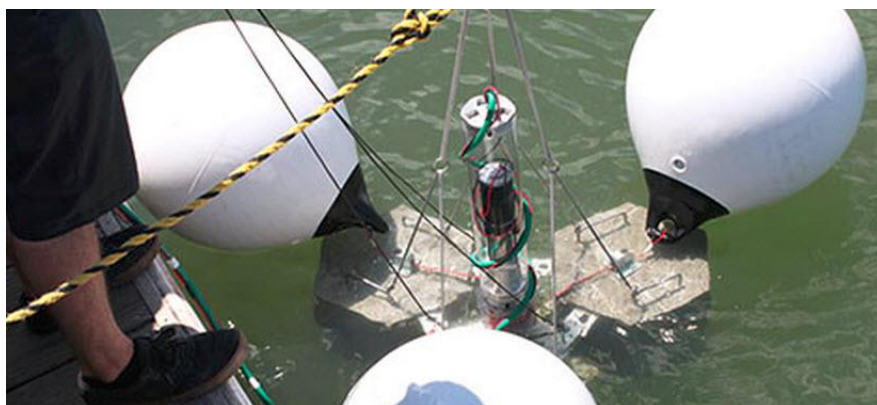
Figura 8 - Armazenamento de energia por meio da força de empuxo com plataforma e boias de isopor cilíndricas.



Fonte: adaptado de Alami (2015).

A empresa Whirl Energy estudou uma maneira de suprir a necessidade das fontes de energia renovável em maximizar a geração da energia elétrica gerada. Para isso, a empresa construiu um modelo na escala de 1:10 de um sistema de armazenamento de energia por meio do trabalho realizado pela força de empuxo. O modelo utiliza boias e as boias serão colocadas na água e levadas a uma profundidade de aproximadamente 100 metros a partir da energia elétrica que está sobrando em um determinado sistema de geração de eletricidade, por meio de fontes renováveis, como a eólica ou solar. Quando há necessidade de energia, as boias são soltas e a força de empuxo é convertida em energia elétrica a medida que as boias sobem até a superfície. A figura 9 mostra o protótipo produzido pela empresa (MÜLLER, 2015).

Figura 9 - Sistema de boias submersas produzido pela Whirl Energy.

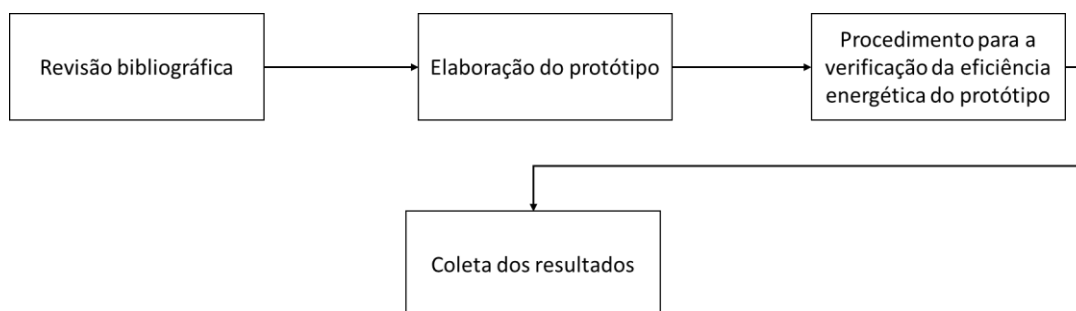


Fonte: adaptado de Müller (2015).

4. METODOLOGIA

Nesta seção será mostrado como o trabalho foi desenvolvido a partir do tema escolhido. A figura 10 exibe as etapas realizadas no decorrer da pesquisa da pesquisa.

Figura 10 - Fluxograma com as etapas realizadas no decorrer da pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2023).

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para conduzir o estudo, realizou-se uma revisão da literatura afim de identificar os estudos mais relevantes na área. Utilizou-se de várias fontes, como base de dados online, publicações governamentais, livros e artigos científicos. As informações obtidas foram organizadas para apoiar o desenvolvimento da pesquisa.

4.2 ELABORAÇÃO DO PROTÓTIPO

Para o desenvolvimento do protótipo foi escolhido um tonel de 1 metro de comprimento para colocar o fluido necessário para realizar a força de empuxo sobre o objeto de flutuação. O fluido utilizado no protótipo foi a água, pela sua disponibilidade em todo o mundo. O objeto de flutuação utilizado foi uma garrafa pet com um volume de 1,55 litros ($0,00155 \text{ m}^3$). Esse volume foi obtido por meio do preenchimento do recipiente com água, utilizando uma proveta para uma medição mais exata. As figuras a seguir mostram, respectivamente, o tonel, a garrafa pet e a proveta utilizada para medir o volume da garrafa pet utilizados no projeto.

Figura 11 - Tonel utilizado no protótipo.



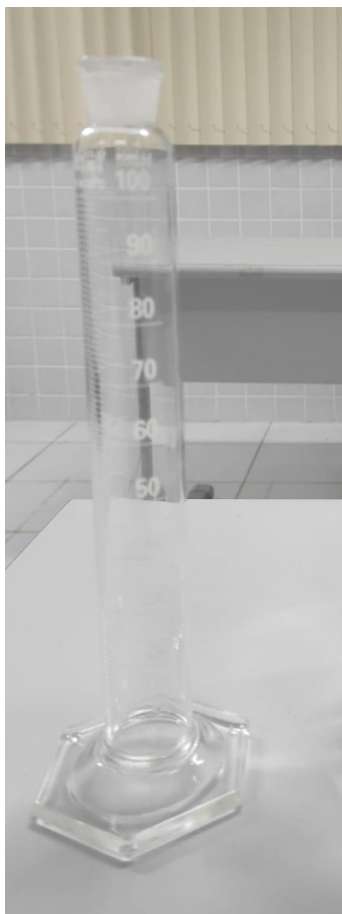
Fonte: autoria própria (2023).

Figura 12 - Objeto de flutuação utilizado no protótipo.



Fonte: autoria própria (2023).

Figura 13 – Proveta utilizada para a medição do volume da garrafa pet.



Fonte: autoria própria (2023).

Para viabilizar a conversão do trabalho realizado pela força de empuxo do sistema em energia elétrica, optou-se pelo uso de um motor de prato de micro-ondas com especificações: 220 Volts (V), 5/6 rotações por minuto (rpm) e 50-60 hertz (Hz). Esse motor está conectado a uma base feita a partir de madeira, que contará com um suporte para uma haste de alumínio utilizada para o sistema de polias. As figuras 14, 15 e 16 apresentam, respectivamente, o motor, a base e a haste.

Figura 14 - Motor de prato de micro-ondas utilizado.



Fonte: autoria própria (2023).

Figura 15 - Base utilizada para acoplar o motor e a haste de alumínio.



Fonte: autoria própria (2023).

Figura 16 - Haste com sistema de polias.



Fonte: autoria própria (2023).

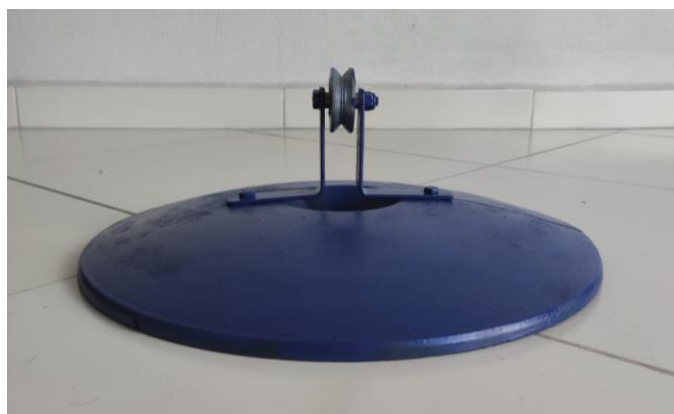
Por meio do sistema de polias, um barbante preso ao objeto de flutuação será movimentado. Para que o objeto alcance uma dada profundidade, uma polia é fixada a uma base de ventilador, que foi doada pelo orientador Mackson, e é colocada no fundo do tonel. O motor será acionado através do barbante que estará preso à polia que será acoplada a ele, sendo que o barbante preso na garrafa pet será passado nessa polia. As figuras a seguir exibem, respectivamente, o barbante utilizado, a base com a polia e a polia que será acoplada ao motor.

Figura 17 - Barbante utilizado para prender o objeto de flutuação.



Fonte: autoria própria (2023).

Figura 18 - Base com a polia.



Fonte: autoria própria (2023).

Figura 19 - Polia que será acoplada ao motor.



Fonte: autoria própria (2023).

As figuras 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19 mostram os objetos que foram usados para a construção do protótipo.

4.3 PROCEDIMENTO PARA A VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO PROTÓTIPO

Para obter a eficiência na conversão de energia que o sistema produzido tem, foram utilizados os materiais a seguir:

- Protótipo produzido pelo autor;
- 2 multímetros;
- Fita métrica;
- Lâmpada de LED 8 W;
- Garrafa pet.

Com os materiais necessários à disposição, a base com a polia foi fixada no fundo do tonel. Em seguida, o barbante foi passado pela polia e a garrafa pet foi presa a uma das extremidades do barbante. E assim, com a ajuda dos técnicos do laboratório, o tonel foi preenchido com água. A figura 20 exhibe o protótipo montado.

Figura 20 - Protótipo montado pelo autor.



Fonte: Autoria própria (2023).

Com a polia acoplada ao motor e a outra extremidade do barbante presa na polia e o sistema de polias presente na haste de alumínio devidamente montado, o objeto de flutuação foi levado até uma profundidade específica, medida com o auxílio de uma fita métrica. A figura 21 exibe a fita métrica utilizada e a figura 22 mostra como a profundidade foi medida.

Figura 21 - Fita métrica utilizada para a medição da profundidade.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 22 - Medição da profundidade em que o objeto de flutuação foi levado.



Fonte: Autoria própria (2023).

Em seguida, a lâmpada foi conectada ao motor e o circuito elétrico foi aberto para que um multímetro na função de amperímetro pudesse ser conectado e a corrente elétrica medida e outro multímetro na função de voltímetro foi conectado aos terminais da lâmpada para a medição da tensão. A lâmpada utilizada, os multímetros e o circuito montado estão mostrados, respectivamente, nas figuras 23, 24 e 25.

Figura 23 - Lâmpada de LED 8 W.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 24 - Multímetro utilizado.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 25 - Circuito montado.



Fonte: Autoria própria (2023).

Com o sistema montado, a garrafa deve iniciar o movimento de subida. Durante esse processo, é necessário registrar a corrente elétrica e a tensão a cada segundo até que o objeto chegue a superfície da água. Esses dados são essenciais para o cálculo da energia consumida pelo sistema. As figuras mostradas anteriormente, 20, 21, 22, 23, 24 e 25, exibem os instrumentos que foram utilizados para o cálculo da eficiência do sistema.

Com os dados coletados durante o experimento, é possível calcular a energia armazenada pelo trabalho realizado pela força de empuxo do sistema. Para realizar esse cálculo, foi levado em consideração a profundidade em que o objeto ficou submerso, a densidade da água, a gravidade e o volume do objeto em metros cúbicos. A expressão necessária para o cálculo da energia fornecida ao sistema será a equação 13.

$$W_E = \rho g V z.$$

Para obter a energia entregue pelo sistema à lâmpada, é necessário calcular a potência que foi fornecida e obter o tempo que o objeto de flutuação levou até subir à superfície. Para calcular a potência, foi feito uma média da corrente e da tensão presentes no circuito durante o

movimento de subida. As equações para obter esses valores estão listadas a seguir, onde a tensão média é expressa pela razão do somatório das tensões pela quantidade de tensões coletadas que é dada por x e a corrente elétrica média é expressa pela razão entre o somatório de correntes e a quantidade de correntes coletadas que é y.

$$V_{média} = \frac{\sum Tensões}{x} \quad (14)$$

$$I_{média} = \frac{\sum Correntes}{y} \quad (15)$$

$$P = V_{média} \cdot I_{média} \quad (16)$$

Em posse desses valores, a energia entregue à lâmpada pode ser calculada pela equação 17.

$$E_U = P \cdot t, \quad (17)$$

onde t é o tempo em que a garrafa pet leva, partindo da profundidade estabelecida, até chegar a superfície.

Para finalizar, conhecendo a energia que foi entregue à lâmpada e a energia armazenada pelo sistema, a eficiência energética deste sistema foi calculada pela equação 18.

$$e = \frac{E_U}{E_A} \cdot 100\% \quad (18)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos dados coletados durante o experimento, esta seção apresentará os resultados e as discussões desses dados.

A tabela 1 mostra os dados coletados para o cálculo da energia que será gerada pelo trabalho realizado pela força de empuxo.

Tabela 1 – Dados utilizados para o cálculo da energia armazenada pela força de empuxo.

Densidade da água (kg/m^3)	Volume da garrafa pet (m^3)	Altura da coluna de água (m)	Aceleração gravitacional (m/s^2)
1000	0,00155	0,79	9,81

Fonte: autoria própria (2023).

Para efetuar o cálculo da energia gerada pelo trabalho realizado pela força de empuxo, os dados coletados foram substituídos na equação 13.

$$E_A = W_E = \rho g V z$$

$$E_A = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,00155 \cdot 0,79$$

$$E_A = 12,01 \text{ J}$$

A energia armazenada nesse sistema, quando comparada a um sistema de maior escala, representa o excedente de energia elétrica disponível em fontes renováveis, tais como a solar e a eólica.

O tempo que o objeto de flutuação levou para chegar a superfície, partindo da profundidade da coluna de água mostrada na tabela 1, foi cronometrado em 25 segundos.

Durante esse processo de subida foram coletados por meio de um voltímetro e um amperímetro, a cada segundo, os valores de tensão e corrente para o cálculo da potência. Esses valores podem ser observados no anexo A. Para realizar uma médias desses valores, foram coletados os valores em um intervalo de 3 segundos. A tabela 2 mostra os valores que foram selecionados para o cálculo da média.

Tabela 2 – Dados coletados para o cálculo da energia entregue à lâmpada.

Tempo (s)	Corrente (mA)	Tensão (V)
3	1,69	50,07
6	1,55	54,90
9	1,56	54,80
12	1,45	54,60
15	1,55	55,00
18	1,43	52,20
21	1,53	54,70
24	1,41	54,10

Fonte: autoria própria (2023).

Como é possível observar, existe uma variação nos valores no decorrer do tempo, isso proporcionou que a lâmpada não ficasse ligada durante todo o processo. Por esse motivo, é feito a média desses valores.

A partir dos dados coletados e com o auxílio das equações 14 e 15 mostradas na seção anterior, a média da corrente e tensão podem ser calculadas.

$$V_{média} = \frac{\sum Tensões}{x}$$

$$V_{média} = \frac{50,07 + 54,9 + 54,8 + 54,6 + 55 + 52,2 + 54,7 + 54,1}{8}$$

$$V_{média} = 53,79 \text{ V}$$

$$I_{média} = \frac{\sum Correntes}{y}$$

$$I_{média} = \frac{1,69 + 1,55 + 1,56 + 1,45 + 1,55 + 1,43 + 1,53 + 1,41}{8}$$

$$I_{média} = 1,52 \text{ mA}$$

Em posse da média da tensão e da corrente, a potência pode ser calculada por meio da equação 16.

$$P = V_{média} \cdot I_{média}$$

$$P = 53,79 \cdot 0,00152$$

$$P = 0,08176 \text{ W}$$

Com a potência calculada, a energia que é entregue à lâmpada pode ser calculada pela equação 17.

$$E_U = P \cdot t$$

$$E_U = 0,08176 \cdot 25$$

$$E_U = 2,044 \text{ J}$$

Assim como demonstrado com a energia armazenada, quando comparada a um sistema em maior escala, a energia fornecida à lâmpada seria equivalente à energia fornecida à rede quando necessária para uso.

Em posse dos valores da energia gerada pelo trabalho que foi realizado pela força de empuxo e da energia entregue à lâmpada, o cálculo da eficiência desse sistema pode ser calculado por meio da expressão mostrada na equação 18.

$$e = \frac{E_U}{E_A} \cdot 100\%$$

$$e = \frac{2,044}{12,01}$$

$$e = 17,02\%$$

A eficiência de um sistema energético está entre 0 e 1, ou em termos percentuais de 0 a 100%, ou seja, quanto mais este valor for próximo de 1, mais eficiente o sistema será.

Como pode ser observado, a eficiência é baixa quando comparamos com outros sistemas, como baterias químicas, mas em compensação a manutenção para o sistema apresentado é mais baixa. Quando comparada com a eficiência encontrada no sistema mecânico confeccionado no trabalho de conclusão de curso do colega Kennedy Dias dos Santos, defendido em 2022.2, que utilizou a energia potencial gravitacional como fonte, a eficiência foi mais baixa. Isso ocorreu devido ao arrasto presente nos sistemas, o meu causado pela água e o dele pelo ar.

Os fatores de resistência não foram minuciosamente detalhados devido ao tempo para a realização do experimento, mas nesse cálculo estão sendo considerados o atrito que as polias causam, a resistência do ar e da água.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, este trabalho teve como objetivo a construção de um protótipo para a análise de um sistema de armazenamento de energia por meio da força de empuxo e a análise de sua eficiência. Foi possível observar que o sistema construído conseguiu um certo aproveitamento de energia, apresentando uma eficiência energética de 17,02%, o que pode ser promissor para aplicações em sistema de energia renovável.

Este estudo contribuiu para a busca por soluções mais sustentáveis e eficientes de armazenamento de energia. Além disso, os resultados podem auxiliar no desenvolvimento de sistemas similares com maior eficiência energética.

Apesar dos resultados positivos, mostrando por meio de um protótipo que a força de empuxo pode ser utilizada como uma fonte alternativa de armazenamento de energia, é importante ressaltar que o sistema construído ainda apresenta algumas limitações. Um exemplo dessas limitações é no objeto que foi utilizado para a geração da força de empuxo, onde antes da garrafa pet foi utilizada uma boia de nível de caixa de água que não conseguiu fazer com que o sistema movimentasse.

Sendo assim, sugere-se que futuros estudos aprofundem nessas questões para uma otimização do tamanho que o objeto de flutuação deve possuir, pois como observado, foi necessário um objeto maior para que o sistema funcionasse, gerando um arrasto maior o que pode ser um problema, pois quanto maior o objeto maior será o arrasto na água.

7. REFERÊNCIAS

- ALAMI, Abdul Hai. Experimental assessment of compressed air energy storage (CAES) system and buoyancy work energy storage (BWES) as cellular wind energy storage options. **Journal of Energy Storage**, v. 1, p. 38-43, 2015.
- ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O.. **Fundamentos de Circuitos elétricos**. São Paulo: Amgh Editora Ltda., 2013.
- AMIRYAR, Mustafa E.; PULLEN, Keith R. A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. **Applied Sciences**, v. 7, n. 3, p. 286, 2017.
- 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.
- BASSETT, Kyle; CARRIVEAU, Rupp; TING, David S.-K. Underwater energy storage through application of Archimedes principle. **Journal of Energy Storage**, v. 8, p. 185-192, 2016.
- BEEBY, S. P.; TORAH, R. N.; TUDOR, M. J. Kinetic energy harvesting. 2008.
- BRASIL, Governo do. **Uso de fontes renováveis no Brasil é três vezes maior que o mundial**. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/07/uso-de-fontes-renovaveis-no-brasil-e-tres-vezes-maior-que-o-mundial>. Acesso em: 5 abr. 2023.
- BRASIL, Governo do. **Energia renovável chega a quase 50% da matriz elétrica brasileira**. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/08/energia-renovavel-chega-a-quase-50-da-matriz-eletrica-brasileira#:~:text=De%20acordo%20com%20o%20Minist%C3%A9rio%20de%20Minas%20e%20Energia,%20nos,fotovoltaica%20cresceu%2066%25%20no%20pa%C3%ADs>. Acesso em: 5 abr. 2023.
- CHEN, Laijun et al. Review and prospect of compressed air energy storage system. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, v. 4, n. 4, p. 529-541, 2016.
- CHEUNG, Brian et al. Distensible air accumulators as a means of adiabatic underwater compressed air energy storage. **International Journal of Environmental Studies**, v. 69, n. 4, p. 566-577, 2012.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: gravitação, ondas e termodinâmica**. Rio de Janeiro: Ltc, 2012.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: mecânica**. Rio de Janeiro: Ltc, 2012.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física: eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Ltc, 2009.

HELERBROCK, Rafael. **Energia potencial gravitacional**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/energia-potencial-gravitacional-elastica.htm>. Acesso em: 6 abr. 2023.

HELERBROCK, Rafael. **Energia potencial elástica**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/energia-potencial-elastica.htm>. Acesso em: 6 abr. 2023.

HUNT, Julian David et al. Buoyancy Energy Storage Technology: An energy storage solution for islands, coastal regions, offshore wind power and hydrogen compression. **Journal of Energy Storage**, v. 40, p. 102746, 2021.

IBRAHIM, Hussein; ILINCA, Adrian; PERRON, Jean. Energy storage systems—Characteristics and comparisons. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 12, n. 5, p. 1221-1250, 2008.

LEITE, Nelson da Costa; DELGADO, Marco Antonio de Paiva; HAGE, Fábio Augusto Santana. Os desafios do armazenamento de energia no setor elétrico. **Revista Boletim da Conjuntura**, 2017.

MARTINS, Wendel Vendregler Araujo; RODRIGUES, Clóves Gonçalves; ANDRADE, E. V. O ensino sobre força de empuxo auxiliado por experimentos de fácil acesso. **Revista Mais Educação**, v. 5, n. 1, p. 1082-1092, 2022.

MÜLLER, Timoteo. **A Primeira Bateria Mecânica Comercial Está Armazenando Energia Eólica Sob o Oceano**. 2015. Disponível em: <https://blogs.solidworks.com/solidworksbrasil/2015/10/a-primeira-bateria-mecanica-comercial-esta-armazenando-energia-eolica-sob-o-oceano.html>. Acesso em: 10 abr. 2023.

ONS. **Histórico de energia eólica**. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx. Acesso em: 3 abr. 2023.

PORTER, Kathryn. **Electricity storage on the fly**. 2017. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/electricity-storage-fly-kathryn-porter>. Acesso em: 8 abr. 2023.

SADIKU, Matthew N. O.. **Elementos de eletromagnetismo**. Porto Alegre: Artmet Editora S.A, 2008.

ŚWIERCZYŃSKI, M. et al. Overview of the energy storage systems for wind power integration enhancement. In: **2010 IEEE international symposium on industrial electronics**. IEEE, 2010. p. 3749-3756.

WOLF, Daniel; BUDT, Marcus. LTA-CAES—a low-temperature approach to adiabatic compressed air energy storage. **Applied Energy**, v. 125, p. 158-164, 2014.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A.. **Física II**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A.. **Física I**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A.. **Física I**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A.. **Física III**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

ANEXO A – VALORES DE TENSÃO E CORRENTE COLETADOS A CADA SEGUNDO DURANTE O MOVIMENTO DE SUBIDA DA GARRAFA PET.

Tempo (s)	Corrente (mA)	Tensão (V)
1	1,68	44,00
2	1,72	46,70
3	1,69	50,07
4	1,82	54,00
5	1,67	55,10
6	1,55	54,90
7	1,52	54,90
8	1,44	54,30
9	1,56	54,80
10	1,57	55,00
11	1,48	54,60
12	1,45	54,60
13	1,38	54,00
14	1,50	54,60
15	1,55	55,00
16	1,37	54,10
17	1,32	53,40
18	1,43	52,20
19	1,99	52,60
20	1,47	53,30
21	1,53	54,70
22	1,58	55,20
23	1,69	55,20
24	1,41	54,10
25	1,04	51,10

Fonte: Autoria própria (2023).