

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**WILLIAN DOS REIS**

**PROVA DE CONCEITO EM BATERIAS GRAVITACIONAIS: UMA ABORDAGEM  
PARA O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SUSTENTÁVEL**

**TOLEDO, PR**

**2023**

**WILLIAN DOS REIS**

**PROVA DE CONCEITO EM BATERIAS GRAVITACIONAIS: UMA ABORDAGEM  
PARA O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SUSTENTÁVEL**

**PROOF OF CONCEPT ON GRAVITATIONAL BATTERIES: AN APPROACH TO  
SUSTAINABLE ENERGY STORAGE**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Processos Químicos (COPEQ) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, câmpus Toledo, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Processos Químicos.

Orientador (a): Professor Dr<sup>o</sup> Marcello Antônio Alves Talarico

**TOLEDO, PR**

**2023**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

WILLIAN DOS REIS

**PROVA DE CONCEITO EM BATERIAS GRAVITACIONAIS: UMA ABORDAGEM  
PARA O ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SUSTENTÁVEL**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Processos Químicos (COPEQ) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, câmpus Toledo, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Processos Químicos.

Aprovado em 27 de novembro de 2023

---

Prof Dr Marcello Antonio Alves Talarico  
UTFPR, câmpus Toledo  
Orientador

---

Prof Dr Clayton Antunes Martin  
UTFPR, câmpus Toledo  
Avaliador

---

Profª Drª Sandra Regina Da Silva Pinela  
UTFPR, câmpus Toledo  
Avaliador

OBS: A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Tecnologia em Processos Químicos.

Dedico este trabalho à memória do saudoso Dr. Prof. Marcelo Fernandes, que desempenhava o papel de professor de física no campus da UTFPR em Toledo. O Dr. Marcelo nos deixou.

Lamentavelmente, não tive a oportunidade de compartilhar e apresentar meu trabalho a ele. O Dr. Marcelo apreciava profundamente ideias inovadoras e um toque de excentricidade. Suas contribuições e entusiasmo deixam saudades eternas. Professor Marcelo, seu legado perdura em nossos corações.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço profundamente à minha família pelo apoio incansável ao longo de todos esses anos de curso. Eles me proporcionaram a oportunidade de sair de casa e construir minha própria trajetória.

Expresso minha gratidão aos dedicados professores do campus, que abriram as portas para um novo mundo de aprendizado, moldando meu caráter e influenciando nas convicções que carrego hoje.

Um agradecimento especial ao meu amigo Igor, cuja colaboração foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho acadêmico. Além disso, agradeço por ser um pilar essencial para a preservação da minha saúde mental durante este período desafiador.

Ao Prof. Dr. Marcello Antonio Alves Talarico, meu orientador, vai meu sincero agradecimento. Sua orientação foi crucial para a elaboração das ideias, direcionamento dos temas e definição de prioridades, além de proporcionar uma liberdade criativa valiosa.

Estendo meus agradecimentos à minha banca de avaliadores, composta pelo Prof. Dr. Clayton Antunes Martin e pela Profa. Dra. Sandra Regina Da Silva Pinela. São excelentes avaliadores e professores extremamente competentes.

Não posso deixar de expressar minha gratidão à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que não só contribuiu para a minha formação acadêmica, mas também desempenhou um papel fundamental na minha formação como indivíduo. Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a pessoa que sou hoje.

"O homem precisa ser superado. Por isso  
necessitas amar as tuas virtudes, porque por elas  
morrerás"  
(NIETZSCHE, **Assim falava Zaratustra**, 1885).

## RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso investiga a viabilidade conceitual e a funcionalidade das baterias gravitacionais, uma tecnologia emergente para o armazenamento de energia elétrica que se vale da energia potencial gravitacional como mecanismo de acumulação. Em contraste com os sistemas de armazenamento convencionais, que utilizam células de chumbo-ácido ou íons de lítio, este sistema baseia-se no princípio de elevação e descida controlada de massas, convertendo a energia potencial gravitacional em eletricidade de forma eficiente. A característica distintiva deste sistema é a sua capacidade de capturar e armazenar energia excedente, que é comumente perdida em situações em que a produção supera a demanda imediata. As baterias gravitacionais apresentam-se como uma solução estratégica para o armazenamento de energia em excesso, especialmente relevante no contexto de fontes renováveis de energia, que são por natureza intermitentes e dependentes de condições naturais cíclicas, como a luz solar diurna e a variabilidade dos ventos. O objetivo deste projeto é demonstrar a prova de conceito da operacionalidade deste sistema, com perspectiva teórica passível de aplicação prática. As baterias gravitacionais oferecem múltiplas vantagens significativas, incluindo eficiência operacional, redução do impacto ambiental e preservação da eficiência energética ao longo dos ciclos de carga e descarga. Este estudo visa ilustrar como essa inovação pode alterar o atual paradigma de armazenamento de energia, promovendo uma transição para métodos mais sustentáveis e eficazes no setor energético. Portanto, as baterias gravitacionais são propostas como uma alternativa viável e ecologicamente correta para satisfazer a crescente demanda por energia, conceitualmente demonstrando um passo significativo em direção a um futuro energético mais limpo e sustentável.

Palavras-chave: eletricidade sustentável; estoque energético; potencial gravitacional; intermitência; projeto mecânico.

## **ABSTRACT**

This undergraduate thesis investigates the conceptual viability and functionality of gravitational batteries, an emerging technology for electrical energy storage that leverages gravitational potential energy as an accumulation mechanism. In contrast to conventional storage systems using lead-acid or lithium-ion cells, this system is based on the principle of controlled lifting and lowering of masses, efficiently converting gravitational potential energy into electricity. The distinctive feature of this system is its ability to capture and store surplus energy, commonly lost in situations where production exceeds immediate demand. Gravitational batteries emerge as a strategic solution for excess energy storage, especially relevant in the context of renewable energy sources, inherently intermittent and dependent on cyclical natural conditions such as daylight and wind variability. The goal of this project is to demonstrate the proof of concept of the operability of this system, with a theoretical perspective capable of practical application. Gravitational batteries offer multiple significant advantages, including operational efficiency, reduced environmental impact, and preservation of energy efficiency over charge and discharge cycles. This study aims to illustrate how this innovation can alter the current energy storage paradigm, promoting a transition to more sustainable and effective methods in the energy sector. Therefore, gravitational batteries are proposed as a viable and environmentally friendly alternative to meet the growing demand for energy, conceptually demonstrating a significant step toward a cleaner and more sustainable energy future.

**Keywords:** sustainable electricity; energy storage; gravitational potential; intermittency; mechanical design.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Roda da Morte de Conan, o Bárbaro: Representação de um Dispositivo de Trabalho Mecânico Acionado por Força Manual.....	30
Figura 2 - Definição e Cavalos Vapor (Horsepower) com Demonstração Prática do Conceito. ....	31
Figura 3 – Dinâmica da Força Eólica em Embarcação à Vela .....	32
Figura 4 – Representação Esquemática de um Aerogerador: Detalhamento Estrutural e Funcional. .	36
Figura 5 - Representação Esquemática de um Gerador Elétrico com Motor de Combustão Interna ..	37
Figura 6 - Representação Esquemática de uma Usina Hidroelétrica: .....	40
Figura 7 – Mapa da Distribuição da Radiação Solar no Território Brasileiro .....	43
Figura 8 - Representação Esquemática do Efeito Fotoelétrico: Ilustração da Emissão de Elétrons por Materiais Semicondutores sob Incidência de Radiação Fótonica .....	44
Figura 9 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.....	46
Figura 10 - Esquema Simplificado de Submarino Durante o Carregamento da Bateria com Motor a Diesel .....	50
Figura 11 - Gráfico Representativo da Degradação de Baterias de Íon-Lítio ao Longo dos Ciclos.....	52
Figura 12 - Relógio de Pêndulo Movido por Energia Potencial Gravitacional .....	54
Figura 13 - Representação Esquemática de Bateria Gravitacional Integrada com Fonte de Energia Fotovoltaica: .....	56
Figura 14 - Comparativo da Dinâmica Diurna entre Coleta e Consumo de Energia: .....	61
Figura 15 - Esquemática de um Projeto para Baterias Gravitacionais Integradas com Energia Fotovoltaica .....	63
Figura 16 - Representação Esquemática de um Projeto para Baterias Gravitacionais com Aplicação de Energia Eólica em Larga Escala .....	64
Figura 17 - Análise Comparativa entre a Curva de Carga do Consumo Residencial Médio no Brasil e o Potencial de Geração Distribuída Solar .....	68
Figura 18 – Consumo Energético em kW Durante as Horas Úteis de Maior Incidência Solar.....	71
Figura 19 - Análise do Preço Médio do Urânio Empobrecido .....	77
Figura 20 - Análise Hidrogeológica de Poços Artesianos: Variação de Níveis de Água e Profundidade em Diferentes Tipos de Solo .....	78
Figura 21 - Estratégias de Revestimento para Poços Artesianos .....	79
Figura 22 - Ilustração Comparativa de Cilindro: Proporção de Diâmetro .....	81
Figura 23 - Estrutura Interna de Cabos de Aço da Empresa IPH.....	84

Figura 24 – Relação de Diâmetros e Resistências de Cabos de Aço Conforme Divulgado pela Empresa IPH .....	85
Figura 25 - Classificação dos Fatores de Segurança para Cabos de Aço .....	86
Figura 26 – Relação de Diâmetros e Resistências de Cabos de Aço Conforme Divulgado pela Empresa IPH .....	87
Figura 27 - Representação da Força de Tensão Aplicada a um Carretel Gerando Torque.....	90
Figura 28 - Estrutura de um Aerogerador com Ênfase na Caixa de Marcha Multiplicadora de Velocidade no Gerador .....	93
Figura 29 - Representação Esquemática das Relações de Velocidade e Rotações por Minuto (RPM) .....	93
Figura 30 - Representação Esquemática de Gerador Elétrico por Indução .....	96
Figura 31 - Representação Esquemática Teórica de um Sistema de Baterias Gravitacionais .....	99
Figura 32 - Esquema Conceitual de Bateria Gravitacional com Elementos Básicos Principais: .....	114
Figura 33 - Representação Esquemática da Casa de Máquinas para Acúmulo de Energia Gravitacional:.....	116
Figura 34 - Esquema de Bateria Gravitacional com Torre Única e Peso Singular Integrado à Geração Fotovoltaica .....	117
Figura 35 - Esquema de Bateria Gravitacional com Poço Único e Peso Singular Integrado à Geração Fotovoltaica .....	119
Figura 36 - Esquema de Bateria Gravitacional Integrando Torre e Poço com Peso Singular e Geração Fotovoltaica .....	121
Figura 37 - Esquema de Bateria Gravitacional com Múltiplos Poços e Pesos Integrados à Geração Fotovoltaica .....	123
Figura 38 - Análise Comparativa do Custo de Armazenamento Energético por MWh.....	126
Figura 39 - Representação Conceitual de Bateria Gravitacional com Auxílio de Força Atmosférica .	128
Figura 40 - Representação Conceitual de Bateria Gravitacional Integrando Força Elástica de Molas .....	129
Fotografia 1 – Primeiros Moinhos de Vento Documentados em Nashtifan, Irã .....	33
Fotografia 2 - Conjunto de Polias, Carretel e Cabos de Aço em Operação de Guindaste.....	88
Fotografia 3 - Transmissão Mecânica: Eixo de Carretel Conectado a um Multiplicador de Velocidade, Integrado a um Motor Elétrico.....	94
Fotografia 4 - Bateria Gravitacional de Grande Escala com Múltiplos Pesos na China.....	137

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa de Consumo Energético Médio Diário em Residências.....	66
Tabela 2 - Geração Fotovoltaica Média por Hora Durante o Período Solar Útil.....	68
Tabela 3 Distribuição do Consumo Energético em kW Durante as Horas do Dia.....	69
Tabela 4 – Consumo energético kW durante as horas uteis de maior incidência solar .....	70
Tabela 5 - Análise Comparativa do Consumo Elétrico Residencial em Diferentes Momentos do Dia.	71
Tabela 6 - Análise Comparativa do Consumo Elétrico Residencial com Proporção Direta para 7kWh	71
Tabela 7 - Definição da Capacidade Teórica de Armazenamento Gravitacional .....	72
Tabela 8 - Estimativa Teórica de acúmulo diário para Armazenamento Gravitacional .....	74
Tabela 9 - Estimativa Teórica de Carregamento para Armazenamento Gravitacional .....	74
Tabela 10 - Densidades Específicas de Materiais Candidatos para Construção de Lastro em Projetos de Baterias Gravitacionais .....	76
Tabela 11 - Dimensões de Diâmetro e Altura de um Cilindro com Proporção 2/3 Pesando 73.469 kg	82
Tabela 12 - Massa do Cabo de Aço em Função do Comprimento do Poço .....	88
Tabela 13 - Acúmulo Gravitacional em Função da Descida do Cabo .....	102
Tabela 14 - Acúmulo Gravitacional em Função da Descida do Cabo .....	103
Tabela 15 - Estimativas de Perda de Eficiência em Diversas Situações .....	109
Tabela 16 – Estimativa de Tempo de Carga e Energia Extra em Dias de Carregamento .....	110
Tabela 17 – Incremento de Massa Requerido para Compensar Perdas Energéticas .....	112
Tabela 18 - Extensão de Distância Requerida em Poços para Compensação de Perdas Energéticas .....	112
Tabela 19- Incremento de Painéis Fotovoltaicos para Compensação de Perdas Energéticas.....	113
Tabela 20 - Especificações da Bateria Gravitacional com Torre Única e Peso Singular .....	118
Tabela 21 - Especificações da Bateria Gravitacional com Torre Único e Peso Singular .....	120
Tabela 22 - Especificações da Bateria Gravitacional Integrando Torre, Poço e Peso Singular.....	122
Tabela 23 - Especificações da Bateria Gravitacional com Quatro Poços e Quatro Pesos .....	124

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Corrente Alternada
ATP	Adenosina Trifosfato
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CV	Cavalo vapor
DC	Corrente Contínua
DM	Número médio de dias do mês
EPG	Energia Potencial Gravitacional
EU ETS	Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia
FS	Fator de Segurança
g	Gramas
GEE	Gases de Efeito Estufa
GW	Gigawatt
J/s	Joule por segundo
Kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
KN	Quilo newtons
KW	Quilowatt
KWh	Quilowatt-Hora
KWp	Quilowatt Pico
L	Litro
m	Metros
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MDL	Protocolo de Quioto
min	Minuto
MW	Megawatt
RPM	Rotações por minuto
Rs	Radiação solar mensal
Rs'	Média da radiação solar diária
s	Segundos
SoH	State of Health
TMR	Taxa Metabólica de Repouso
VCO <sub>2</sub>	Volume de dióxido de carbono
VO <sub>2</sub>	Volume de oxigênio
Wh/kg	Watt-Hora por Quilograma

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	Aceleração
$g$	Aceleração da gravidade
$h$	Altura
$\theta$	Angulo
$A$	Area
$Q$	Calor
$C$	Circunferência Carretel
$\mu$	Coeficiente de atrito
$i$	Corrente elétrica
$I$	Corrente elétrica
$\rho$	Densidade
$d$	Diâmetro
$U$	Energia
$E$	Energia
$F$	Força
$J$	Joule
$m$	Massa
$N$	Newtons
%	Porcentagem
$\pi$	Pi
$P$	Potência
$kg$	Quilograma
$R$	Radiação solar
$r$	Raio
$n$	Rendimento
sin	Seno
$t$	Tempo
$T$	Tensão
$\tau$	Torque
$W$	Trabalho
$\Delta$	Varição
$ds$	Varição da distância
$v$	Velocidade
$\omega$	Velocidade Angular
$V$	Volume

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Principal .....</b>	<b>22</b>
2.1.1	Objetivos Secundários: .....	22
<b>2.2</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>Fator Determinante.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4</b>	<b>Argumentos Relativos .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5</b>	<b>Contribuição Esperada .....</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>25</b>
<b>3.1</b>	<b>Desafios Históricos e Contemporâneos no Armazenamento de Energia .....</b>	<b>25</b>
<b>3.2</b>	<b>Fundamentos e Manifestações da Energia .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3</b>	<b>Princípios da Conservação de Energia: .....</b>	<b>27</b>
3.3.1	Análise da Conversão de Energia Potencial Gravitacional: .....	27
3.3.2	Transformação de Energia no Contexto Cosmológico.....	28
<b>3.4</b>	<b>Organismo Humano como Fonte Energética.....</b>	<b>29</b>
3.4.1	Potência Humana e Comparação Tecnológica .....	30
3.4.2	Conversão de Energia por Fontes Animais.....	31
<b>3.5</b>	<b>Exploração Histórica da Energia Eólica .....</b>	<b>32</b>
3.5.1	Aplicação Antiga da Energia Eólica em Nashtifan .....	33
3.5.2	Transformações Energéticas ao Longo da História Humana .....	33
<b>3.6</b>	<b>Caracterização da Energia Elétrica e Métodos de Geração.....</b>	<b>34</b>

3.6.1	Análise do Quilowatt-hora como Unidade de Medida de Energia: Implicações na Eficiência Energética e Consumo Elétrico .....	34
3.6.2	Avanços e Desafios mundiais da Energia Eólica .....	35
3.6.2.1	<u>Cálculo da Energia Eólica para Aplicações em Moinhos de Vento</u> .....	35
3.6.3	Viabilidade de Fontes Energéticas para Aplicações em Transporte .....	36
3.6.3.1	<u>Geração de Energia e Trabalho em Motores de Combustão Interna</u> .....	37
3.6.4	Geração Hidrelétrica: Perspectivas Globais e Impactos Ambientais .....	39
3.6.4.1	<u>Conversão Energética em Centrais Hidroelétricas</u> .....	40
3.6.5	Fundamentos Científicos da Energia Solar .....	42
3.6.5.1	<u>Dinâmica da Energia Solar:</u> .....	42
3.6.5.2	<u>Ascensão da Energia Solar na Era Moderna</u> .....	43
3.6.5.3	<u>Captação de Energia Solar Fotovoltaica:</u> .....	44
3.6.5.4	<u>Características dos Fótons na Geração de Energia Fotovoltaica</u> .....	44
3.6.5.5	<u>Processo de Conversão Fotovoltaica:</u> .....	45
<b>3.7</b>	<b>Quantificação e Compreensão das Ineficiências em Sistemas Energéticos.....</b>	<b>47</b>
<b>3.8</b>	<b>Energia Renovável: Definições e Distinções em Relação a Outras Formas de Geração de Energia.....</b>	<b>47</b>
3.8.1	Transição Energética e o Desafio da Intermitência das Fontes Renováveis .....	48
3.8.2	Armazenamento de Energia Durante Superávit e Mitigação da Instabilidade em Fontes Renováveis.....	49
<b>3.9</b>	<b>Desafios Históricos no Armazenamento de Energia em Aplicações Militares:.....</b>	<b>49</b>
3.9.1	Degradação em Baterias de Íon-Lítio:.....	51
3.9.2	Extração de Lítio: Implicações Ambientais e Hidrológicas .....	52
3.9.3	Impactos Ambientais da Extração de Chumbo e Enxofre .....	52
3.9.4	Desafios Ambientais no Descarte de Baterias .....	53
<b>3.10</b>	<b>Alternativa das Baterias Gravitacionais .....</b>	<b>53</b>
3.10.1	Armazenamento de Energia Durante Períodos de Escassez.....	53

3.10.2	<u>Densidade Energética: Comparação entre Baterias e Combustíveis Fósseis</u>	55
3.10.2.1	<u>Baterias de Chumbo-Ácido e Íon-Lítio</u>	55
3.10.2.2	<u>Combustíveis Fósseis: Gasolina e Diesel</u>	55
3.10.2.3	<u>Baterias Gravitacionais</u>	55
<b>3.11</b>	<b>Incentivos no Armazenamento Gravitacional: Viabilidade Ambiental e Créditos de Carbono</b>	<b>56</b>
3.11.1	Créditos de Carbono e Incentivos Econômicos	57
3.11.2	Potencial de Mercado e Avanços Tecnológicos	57
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>58</b>
<b>4.1</b>	<b>Parâmetros Científicos para a Elaboração de um Sistema de Armazenamento Gravitacional de Energia:</b>	<b>59</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelagem Teórica do Funcionamento e Descarga de uma Bateria Gravitacional</b>	<b>60</b>
<b>4.3</b>	<b>Seleção de Projetos de Energia Renovável para Armazenamento Gravitacional</b>	<b>62</b>
4.3.1	Projeto Solar para Armazenamento Gravitacional	62
4.3.2	Projetos de Armazenamento de Energia Eólica	63
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>65</b>
<b>5.1</b>	<b>Seleção de um Projeto Solar para Análise Acadêmica com Foco em Armazenamento Gravitacional</b>	<b>65</b>
<b>5.2</b>	<b>Cálculos e Dimensões</b>	<b>65</b>
5.2.1	Análise do Consumo Residencial de Energia Elétrica no Brasil	65
5.2.1.1	<u>Análise da Eficiência de Placas Solares em Ciclos Diurnos e Noturnos</u>	66
5.2.1.2	<u>Sincronização da Geração Fotovoltaica com o Padrão de Consumo Residencial</u>	67
5.2.2	Distribuição Temporal do Consumo Residencial de Energia	69

5.2.3	Estimando a área de captação e armazenamento da energia solar em sistema fechado: .....	71
5.2.4	Armazenamento para um sistema elétrico fechado autossustentável .....	72
5.2.5	Análise da Eficiência de Captação e Armazenamento de Energia em Sistemas Fotovoltaicos Residencial .....	72
5.2.5.1	<u>Dimensionamento e Eficiência de Painéis Fotovoltaicos para Armazenamento Energético em Sistemas Residenciais Isolados</u> .....	73
5.2.6	Desenvolvimento e Dimensionamento de Baterias Gravitacionais para Armazenamento de Energia em Sistemas Autônomos .....	75
5.2.7	Seleção e Caracterização de Materiais para Lastro em Baterias Gravitacionais: Análise de Densidade e Aplicações Práticas .....	76
5.2.8	Estimativa de Profundidade de Poço para Projetos de Armazenamento Gravitacional: Considerações Hidrogeológicas e Mecânicas .....	78
5.2.8.1	<u>Dimensionamento e Análise de Poços para Armazenamento de Energia Gravitacional: Profundidades e Estratégias de Implementação</u> .....	78
5.2.9	Modelagem e Dimensionamento de Cilindros de Lastro em Aço para Armazenamento Energético Gravitacional .....	80
5.2.10	Dimensionamento e Seleção de Cabos de Aço para Sistemas de Armazenamento Energético Gravitacional: Análise de Resistência e Fatores de Segurança .....	83
5.2.11	Dimensionamento e Análise de Resistência de Carretel de Enrolamento para Sistemas de Içamento em Baterias Gravitacionais .....	87
5.2.11.1	<u>Dimensionamento e Análise do Volume de Cabos em Carretéis</u> .....	89
5.2.12	Otimização de Conversão de Torque em Sistemas de Geração de Energia Gravitacional: Aplicação de Multiplicadores de Rotação .....	90
5.2.13	Implementação de Geradores de Velocidade Variável em Sistemas de Armazenamento de Energia Gravitacional: Adaptação Dinâmica à Demanda Energética .....	95
5.2.14	Gestão Otimizada de Energia em Sistemas de Armazenamento Gravitacional: O Papel Central da Central de Controle .....	97
<b>5.3</b>	<b>Resumo do Desenvolvimento do Sistema de Armazenamento de Energia Gravitacional .....</b>	<b>99</b>

5.3.1	Etapas Operacionais do Sistema de Armazenamento de Energia	
	Gravitacional .....	100
<b>6</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÕES .....</b>	<b>101</b>
<b>6.1</b>	<b>Avaliação de Projetos Teóricos em Pequena Escala para Baterias</b>	
	<b>Gravitacionais.....</b>	<b>101</b>
<b>6.2</b>	<b>Contraste entre Cenários Ideais e Realistas em Projetos de</b>	
	<b>Armazenamento Gravitacional:.....</b>	<b>101</b>
<b>6.3</b>	<b>Incorporação da Massa do Cabo no Cálculo da Energia Potencial</b>	
	<b>Gravitacional em Sistemas de Armazenamento de Energia.....</b>	<b>101</b>
<b>6.4</b>	<b>Análise das Perdas de Eficiência em Sistemas de Geração de Energia</b>	
	<b>Gravitacional.....</b>	<b>103</b>
6.4.1	Perdas por Atrito .....	103
6.4.2	Perdas no Processo de Conversão Energética .....	104
6.4.2.1	<u>Perda Térmica no Motor e Gerador</u> .....	105
6.4.2.2	<u>Perda Térmica dos Fios de Eletricidade</u> .....	105
6.4.3	Perda por Desgaste Mecânico e de Materiais .....	106
6.4.4	Perda por Vento .....	106
6.4.5	Perda de Inércia.....	106
6.4.6	Perda na elasticidade do Cabo .....	107
6.4.7	Perda por Expansão Térmica .....	107
6.4.8	Perda por Frenagem do Peso.....	107
6.4.9	Perda de Controle .....	108
6.4.10	Perdas por Motivos Gerais .....	108
<b>6.5</b>	<b>Análise Comparativa entre Estimativas Otimistas e Pessimistas.....</b>	<b>108</b>
6.5.1	Estimativa otimista: .....	109
6.5.2	Estimativa pessimista.....	109
<b>6.6</b>	<b>Tempos de carga e descarga da bateria gravitacional: .....</b>	<b>110</b>
<b>6.7</b>	<b>Produção Necessária em Função da Eficiência Operacional.....</b>	<b>110</b>

<b>6.8</b>	<b>Estratégias de Mitigação para Ineficiências Sistêmicas:</b> .....	<b>111</b>
6.8.1	Incremento da Massa:.....	111
6.8.2	Extensão da Distância de Queda:.....	112
6.8.3	Acréscimo no Número de Painéis Fotovoltaicos:.....	113
<b>6.9</b>	<b>Elaboração e Modelagem de Projetos para Baterias Gravitacionais: Análise Detalhada Através de Desenhos Técnicos e Representações Modelísticas</b> .....	<b>113</b>
6.9.1	Configuração e Funcionalidade da Casa de Máquinas em Sistemas de Armazenamento de Energia Gravitacional.....	115
<b>6.10</b>	<b>Modelagem Tridimensional de Projetos: Análise Dimensional e Seleção de Materiais</b> .....	<b>116</b>
<b>6.11</b>	<b>Possíveis Benefícios e Aplicações das Baterias Gravitacionais no Contexto do Armazenamento de Energia Renovável:</b> .....	<b>125</b>
<b>6.12</b>	<b>Abordagens Alternativas para Redução de Massa no Sistema:</b> .....	<b>126</b>
<b>6.13</b>	<b>Desafios de Viabilidade técnica na Implementação de Baterias Gravitacionais: Análise da Massa do Sistema e Dimensionamento Estrutural</b> .....	<b>129</b>
<b>6.14</b>	<b>Desafios e Soluções em Baterias Gravitacionais</b> .....	<b>130</b>
<b>6.15</b>	<b>Aproveitando Construções e Explorando Hipóteses para Baterias Gravitacionais</b> .....	<b>132</b>
<b>6.16</b>	<b>Viabilidade Econômica para a Construção de um Projeto de Armazenamento Gravitacional</b> .....	<b>133</b>
<b>6.17</b>	<b>Integração de Projetos de Armazenamento de Energia Gravitacional no Mercado de Carbono:</b> .....	<b>134</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>136</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>139</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A distribuição de energia elétrica é um processo que requer a manutenção de um fluxo energético constante e resiliente para prevenir falhas no fornecimento. Tradicionalmente, centrais elétricas com capacidade de geração ininterrupta, tais como hidrelétricas, nucleares, termelétricas a gás e a carvão, são empregadas para assegurar a estabilidade da rede elétrica devido à sua habilidade de fornecer eletricidade de maneira contínua e confiável, mitigando assim a incidência de flutuações na distribuição de energia (VASCONCELOS, 2017).

Fontes renováveis de energia, como a solar e a eólica, estão intrinsecamente sujeitas a variações climáticas e ambientais, como a intensidade do vento e a radiação solar. Estas fontes são caracterizadas por uma produção energética variável, o que pode resultar em intermitências na rede elétrica, manifestando-se através de oscilações e flutuações na potência fornecida. No contexto da energia solar, é crucial destacar que a produção cessa durante o período noturno (WEBER, 2022).

Nos sistemas energéticos interconectados que dependem exclusivamente de fontes renováveis, a ausência de uma fonte de energia convencional de suporte durante períodos de baixa produção renovável pode comprometer a estabilidade do fornecimento energético. A dependência exclusiva em fontes renováveis sem um sistema de reserva confiável necessita de uma análise criteriosa e de estratégias de mitigação de riscos para assegurar a continuidade e a confiabilidade do suprimento energético (BERMANN, 2008).

A conversão da energia de fontes renováveis em uma forma mais estável e previsível, sem depender unicamente de centrais de geração convencionais, implica na necessidade de armazenar o excedente energético. Durante períodos de alta incidência solar ou ventos fortes, é possível capturar e armazenar a energia excedente. Este armazenamento é possibilitado através de baterias projetadas para acumular o excesso de energia durante estes períodos favoráveis. Em momentos de demanda elevada ou condições climáticas adversas para a geração renovável, esta energia armazenada pode ser utilizada para suprir a rede elétrica (CAMPOS, 2022).

O armazenamento energético é uma estratégia eficaz para superar os desafios de intermitência e inconstância das fontes renováveis, evitando falhas no fornecimento de energia que seriam prováveis em sistemas que dependem exclusivamente de fontes renováveis sem capacidade de armazenamento. Além

disso, o uso da energia armazenada durante períodos de superávit permite manter um fornecimento energético estável e contínuo, mesmo sob condições desfavoráveis, desempenhando um papel vital na transição para um sistema energético sustentável e na estabilização da oferta de energia elétrica (CAMPOS, 2022).

No panorama energético contemporâneo, a acumulação de energia é essencial na busca por fontes de eletricidade sustentáveis e eficientes. As baterias, dispositivos centrais para este propósito, operam com base em mecanismos físico-químicos que envolvem processos de oxidação e redução (AMARAL, 1995).

Apesar da ampla utilização de baterias químicas tradicionais, como as de chumbo-ácido, níquel-cádmio e íon-lítio, elas apresentam limitações, incluindo capacidade de armazenamento restrita, longos períodos de recarga, ciclos de vida limitados e impactos ambientais adversos associados à extração de metais (AMARAL, 1995).

Frente a esses desafios, emergiu uma nova metodologia de armazenamento de energia: as baterias gravitacionais. Diferenciando-se das baterias químicas, estes sistemas não se baseiam em reações químicas para a geração e armazenamento de energia elétrica, mas sim na utilização da gravidade como meio de acumulação de energia potencial gravitacional (ROCHA, 2022).

As baterias gravitacionais, ou baterias mecânicas, são estruturas estacionárias que armazenam energia potencial gravitacional por meio de métodos diversos, como elevação de massas, usinas hidroelétricas reversíveis ou controle de descida de pesos em cavidades subterrâneas. Estes sistemas têm potencial para armazenar grandes quantidades de energia e oferecem vantagens como simplicidade construtiva, viabilidade econômica em diversas escalas e longevidade operacional sem degradação cíclica. Seu maior benefício é a sustentabilidade ambiental, uma vez que não requerem extração intensiva de metais (CHATURVEDI, 2022).

Globalmente, o conceito de baterias gravitacionais tem sido aplicado em larga escala desde a década de 70, especialmente através de usinas hidroelétricas reversas. Neste modelo, a água é utilizada como massa para armazenamento energético, sendo bombeada para altitudes superiores para converter sua posição em energia potencial gravitacional (EIA, 2020).

Este método tem sido implementado por diversas nações, incluindo Estados Unidos, Japão, Alemanha, Espanha, China, Itália, Noruega e França, como parte de suas estratégias de gestão e distribuição de energia elétrica (CBIE, 2020).

No âmbito das pesquisas atuais sobre baterias gravitacionais, surge a proposta de substituir o uso da água por um método alternativo que envolve o içamento de pesos densos e o uso de sistemas mecânicos. Esta abordagem busca minimizar os impactos ambientais associados às hidrelétricas tradicionais e às preocupações com a extração de minerais, como o lítio, que estão ligados a danos ambientais significativos (FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL, 2022).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Principal**

Investigar o desempenho operacional dos sistemas mecânicos de armazenamento de energia, com a utilização da força gravitacional como mecanismo de retenção energética.

#### **2.1.1 Objetivos Secundários:**

1. Conceber e implementar um sistema de armazenamento de energia que otimize a captura e retenção de energia durante períodos de superávit e permita a sua utilização efetiva em momentos de déficit energético.
2. Avaliar e comparar a densidade energética e os custos associados a estes sistemas mecânicos em contraste com as abordagens convencionais de armazenamento de energia.
3. Corroborar a viabilidade conceitual dos sistemas mecânicos de armazenamento como alternativas sustentáveis e eficientes para a retenção de energia limpa.
4. Levantar aspectos de sustentabilidade que incentivem a adoção mais ampla de tecnologias de energia renovável, com ênfase em soluções de armazenamento mecânico.

### **2.2 Justificativa**

Em face das crises climáticas e energéticas iminentes, as baterias gravitacionais, fundamentadas na exploração da energia potencial gravitacional, surgem como um elemento necessário para o futuro energético. Com a crescente acessibilidade das fontes renovável de energia, essas baterias assumem um papel fundamental. Elas não apenas possuem uma capacidade de armazenamento teoricamente comparável às baterias eletroquímicas, mas também exibem vantagens notáveis em termos de custo, eficiência e durabilidade. Sua aplicabilidade abrange desde pequenas propriedades rurais até grandes indústrias e, potencialmente, áreas urbanas densamente habitadas.

### 2.3 Fator Determinante

A seleção dessas baterias para esse trabalho acadêmico foi impulsionada por considerações fundamentais:

1. Substituição de Baterias Convencionais: As baterias de íon-lítio, apesar de prevalentes, enfrentam limitações significativas, incluindo capacidade de armazenamento restrita e degradação ao longo do tempo. As baterias gravitacionais prometem superar essas barreiras, oferecendo armazenamento eficiente para energia intermitente.
2. Crescimento da Energia Solar no Brasil: A experiência com sistemas que utilizam energia solar ilustra os desafios da intermitência energética, necessitando de soluções inovadoras.
3. Conexão com Disciplinas Científicas: O projeto interliga-se com múltiplas áreas da física, abrangendo temas como energia potencial gravitacional, dinâmica de massas, eletroquímica, operações unitárias, desenho técnico, materiais e utilidades, e cálculo, auxiliando o compreendimentos dessas áreas.

### 2.4 Argumentos Relativos

A relevância desta pesquisa é considerável:

1. Novidade da Pesquisa: As baterias gravitacionais constituem um campo de estudo emergente, com escassa literatura sobre aplicações em pequena escala. O interesse por armazenamento de energia limpa está em ascensão, tornando esta área de pesquisa altamente pertinente.
2. Perspectiva Teórica: Estas baterias possuem uma densidade energética teoricamente comparável às baterias de íon-lítio, cuja eficácia será determinada por testes de desempenho.
3. Perspectiva Metodológica: O impacto ambiental destas baterias é mínimo, especialmente quando comparado à extração de metais raros como o lítio. Sua construção pode ser customizada para locais específicos.

## 2.5 Contribuição Esperada

Este estudo visa contribuir de várias formas:

1. Proporcionar autonomia energética para propriedades de variados portes.
2. Fomentar o armazenamento de energia limpa, em consonância com metas de sustentabilidade e redução de emissões.
3. Solucionar a intermitência energética das fontes renováveis, apresentando alternativas viáveis.
4. Evidenciar a durabilidade das baterias gravitacionais, que mantêm eficiência ao longo dos ciclos de carga e descarga.
5. Minimizar o impacto ambiental do armazenamento de energia, evitando a exploração intensiva de metais raros.

Em resumo, este estudo tem o potencial de auxiliar na mudança do paradigma no armazenamento e uso de energia, promovendo a transição para fontes de energia mais ecológicas e sustentáveis. Ademais, pode indicar o advento de soluções economicamente favoráveis e duradouras, estabelecendo-se como um marco no campo da exploração de alternativas energéticas eficientes e ambientalmente responsáveis.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Desafios Históricos e Contemporâneos no Armazenamento de Energia

A imperiosa demanda por métodos eficientes de armazenamento energético constitui uma constante histórica que desafia a civilização humana. A questão central reside em como preservar uma commodity tão essencial à subsistência e ao progresso humano. Inúmeras estratégias sugeridas para tal fim encontram-se frequentemente obstaculizadas por consideráveis impedimentos econômicos e ecológicos. Cabe destacar que esta inquietação não é um fenômeno contemporâneo, mas sim um aspecto recorrente e persistente ao longo do desenvolvimento humano (LEITE, 2017).

A problemática do armazenamento energético transcende a contemporaneidade, estendendo-se ao alvorecer da civilização humana. Os antigos hominídeos empreenderam esforços para obter e reter energia, embora o entendimento teórico subjacente fosse incipiente. Para esses predecessores, a energia era intrinsecamente associada à capacidade de executar trabalho, fosse através da força laboral humana, de dispositivos mecânicos rudimentares ou do emprego da potência animal (FARIAS, 2013).

É imperativo reconhecer que o termo 'energia', embora frequentemente correlacionado exclusivamente com eletricidade no discurso leigo, possui uma definição mais abrangente no contexto da física. Energia é definida como a propriedade de um sistema interagir com outrem, isso lhe confere a capacidade de realizar trabalho ou induzir movimento. A quantificação do trabalho necessário para deslocar um objeto contra uma força resistente é determinada pelo produto da magnitude da força aplicada e o deslocamento no espaço, conforme a relação matemática: (ATKINS, 2018).

A equação do trabalho se apresenta como:

$$W = \int_a^b F \cdot ds$$

- $W$  – Trabalho realizado em Joules (J);
- $F$  – Força no sistema em Newtons (N);
- $ds$  – Variação da distância percorrida em metros (m).

A unidade do trabalho é o joule, J, e, portanto, da energia:

$$U = 1J = 1N \cdot m = 1kg \cdot m^2/s^2$$

### 3.2 Fundamentos e Manifestações da Energia

Energia é definida, em termos científicos, como a propriedade intrínseca de um sistema que lhe confere a capacidade de realizar trabalho ou induzir ação. Esta definição abrangente encapsula a versatilidade da energia, que se manifesta em múltiplas formas e aplicações, desde a liberação de energia por adenosina trifosfato (ATP) para a contração de miofibrilas musculares, até a energia cinética necessária para a propulsão de um veículo lançador espacial em trajetória orbital. A energia é, portanto, um conceito fundamental associado a qualquer processo que envolva transformação de movimento ou alteração de estado físico (ASSIS, 2002).

A energia manifesta-se sob múltiplas facetas, cada uma obedecendo a princípios físicos rigorosos que regem o cosmos. A geração de energia não é isenta de custos, exigindo invariavelmente uma transmutação de uma forma energética para outra. Dentre as categorias de energia, enumeram-se a energia potencial elástica, energia potencial gravitacional, energia térmica, energia elétrica, energia química e energia nuclear. Cada uma dessas modalidades de energia possui a capacidade intrínseca de realizar trabalho ou de induzir movimento em objetos, sendo passíveis de conversão entre si através de processos específicos e interações (BUCUSSI, 2006).

No contexto da termodinâmica em relação a mecânica, o símbolo  $W$  é adotado para denotar a quantidade de energia transferida para um sistema através do trabalho executado sobre ele, conforme descrito na literatura científica (ATKINS, 2018)

A equação da variação de energia se apresenta como:

$$\Delta U = -W$$

- $\Delta U$  – Variação de energia interna (cal ou J);
- $W$  – Energia transferida (cal ou J);

### 3.3 Princípios da Conservação de Energia:

No âmbito da físico-química, o princípio da conservação de energia, que ressoa com o antigo adágio alquímico "nada se obtém sem que algo de igual valor seja perdido", postula que a energia dentro de um sistema isolado permanece constante, sujeita apenas à transmutação de uma forma para outra, e não à criação ou aniquilação. Em essência, a energia possui a propriedade de induzir movimento, e reciprocamente, o movimento pode ser convertido em energia. Esta interconversão ocorre de maneira eficiente sob condições sistêmicas apropriadas (BUCUSSI, 2006).

#### 3.3.1 Análise da Conversão de Energia Potencial Gravitacional:

Considere-se, hipoteticamente, a elevação de um peso de 5 quilogramas a uma altura significativa e sua subsequente liberação, permitindo que este caia livremente. Durante a queda, a energia potencial gravitacional acumulada é convertida em energia cinética, que, ao impactar o solo, é parcialmente dissipada sob a forma de calor e trabalho mecânico, resultando na deformação do substrato e na formação de uma depressão superficial no ponto de contato (HALLIDAY, 2016)

A equação da energia potencial gravitacional se apresenta como:

$$EPG = \int_a^b F dh = \int_a^b mg dh$$

$$EPG = mgh$$

- $EPG$  – Energia potencial gravitacional (J);
- $F$  – Força gravitacional (N);
- $m$  – Massa (kg);
- $g$  – Aceleração devido à gravidade ( $m/s^2$ );
- $h$  – Altura (m).

É imperativo reconhecer que a energia requerida para a execução deste experimento não é gerada do absoluto nada. Originária do esforço humano, a energia é empregada no transporte do peso até o ápice da estrutura. Este esforço é viabilizado

pela oxidação metabólica dos carboidratos no organismo. Analogamente, os carboidratos são sintetizados através da energia luminosa assimilada durante o processo de fotossíntese vegetal, e sua subsequente colheita e distribuição implicam em cadeias de transformações energéticas adicionais. Este ciclo de eventos corrobora a Primeira Lei da Termodinâmica, que postula a conservação da energia, indicando que a energia não pode ser criada nem destruída, mas apenas transformada de uma forma para outra (ATKINS, 2018).

A equação da Variação de Energia Interna se apresenta como:

$$Q = \Delta U + W$$

- $Q$  – Variação de Energia Interna (J);
- $W$  – Trabalho Realizado (J);
- $\Delta U$  – Variação de Energia Interna (J).

### 3.3.2 Transformação de Energia no Contexto Cosmológico

Dentro do vasto espectro cosmológico, a energia se manifesta de forma onipresente e multifacetada. Observações empíricas do firmamento diurno desvendam a incidência de quantidades substanciais de energia fotônica solar, estimadas em milhões de gigawatts, permeando a estratosfera terrestre em frações temporais extremamente breves. Além disso, os sistemas fluviais e marítimos exibem uma energia potencial considerável nas quedas d'água e ondas oceânicas, enquanto as placas tectônicas liberam energia sísmica de magnitude significativa. Fenômenos atmosféricos como ventos, tempestades, tornados e descargas elétricas atmosféricas (raios) evidenciam a intensidade da energia e a dinâmica das interações entre sistemas terrestres. A questão premente, portanto, não é a disponibilidade de energia no planeta, mas sim a captura e a subsequente conversão dessa energia em formas utilitárias. Essa transmutação energética representa um desafio considerável nas disciplinas de engenharia e física aplicada, exigindo inovações e soluções técnicas para a efetiva utilização desses recursos energéticos. (CARLOS 2013)

### 3.4 Organismo Humano como Fonte Energética

Historicamente, a energia bioquímica intrínseca ao organismo humano, manifestada pela conversão de energia química em energia cinética via contrações musculares, figura entre as primordiais modalidades de energia mobilizadas pela espécie humana. Sob uma perspectiva comparativa contemporânea, esta forma de energia, embora fundamental, é caracterizada por uma magnitude de potência modesta quando cotejada com as capacidades energéticas disponíveis e operacionalizadas por meio de tecnologias modernas (FONSECA, 2007).

Na esfera da bioenergética humana, a quantificação do consumo energético basal pode ser efetivamente realizada por meio da aplicação da Equação da Taxa Metabólica de Repouso (TMR) não proteica, conforme estabelecido por Weir em 1949. Esta equação representa um método rigoroso para aferir a taxa na qual o organismo humano consome energia em estado de repouso, excluindo os efeitos metabólicos atribuíveis ao catabolismo proteico.

A fórmula da taxa metabólica por minuto se apresenta como:

$$TMR(Kcal/min) = 3.942 \times VO2(L/min) + 1.106 \times VCO2(L/min)$$

- $TMR(Kcal/min)$ : Taxa Metabólica por Minuto, (Kcal/min);
- $VO2(L/min)$ : Volume de Oxigênio Consumido por Minuto, (L/min);
- $VCO2(L/min)$ : Volume de Dióxido de Carbono Produzido por Minuto,(L/min);

A fórmula da taxa metabólica por dia se apresenta como:

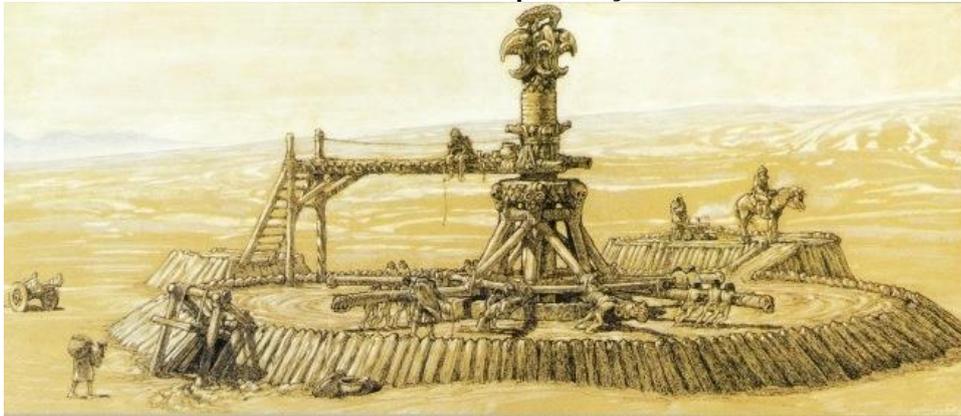
$$TMR(Kcal/dia) = TMR(Kcal/min) \times 1440$$

- $TMR(Kcal/dia)$ ;
- $TMR(Kcal/min)$ ;
- 1440 é o número de minutos em um dia.

Por exemplo, a operação de um moinho manual, sob condições históricas, exigiria a aplicação sinérgica de esforços físicos de múltiplos indivíduos. Em

contrapartida, a adoção de métodos mais eficientes liberaria o potencial humano para o engajamento em outras atividades produtivas (FONTANA, 2021).

**Figura 1 - Roda da Morte de Conan, o Bárbaro: Representação de um Dispositivo de Trabalho Mecânico Acionado por Força Manual**



Fonte: RON COBB (1982)

#### 3.4.1 Potência Humana e Comparação Tecnológica

Dentro dos parâmetros fisiológicos, um indivíduo humano em condições ótimas de saúde pode sustentar uma produção de potência mecânica da ordem de 75 watts de maneira contínua ao longo de um período laboral de oito horas. Esta magnitude de potência é modesta quando colocada em perspectiva com a capacidade de um eletrodoméstico padrão, como um liquidificador, que pode operar a uma potência nominal de aproximadamente 350 watts. A potência, definida como a taxa de realização de trabalho por unidade de tempo, é um indicador crítico da eficiência energética em processos mecânicos e elétricos. (EUGENE, 2007).

A Equação do Cálculo de potência se apresenta como:

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

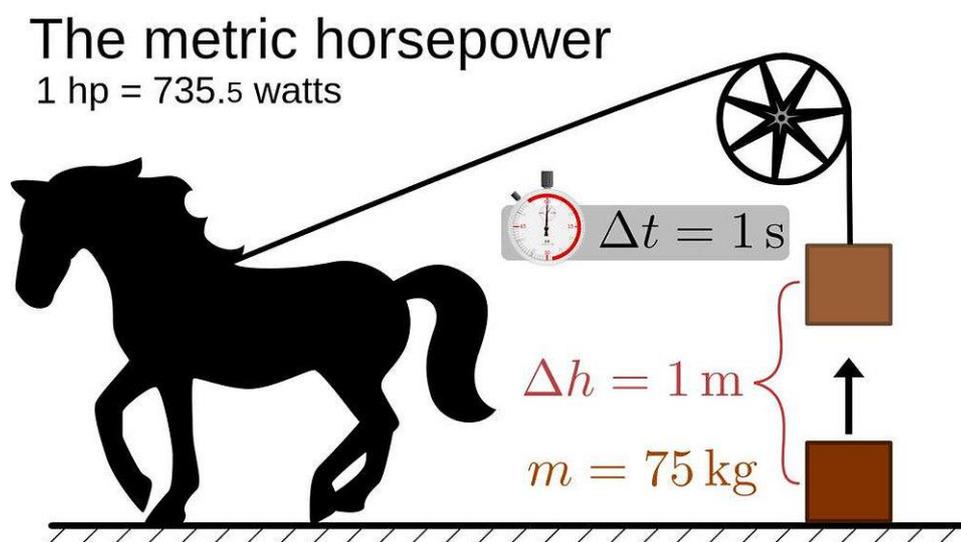
- $P$  – Potência, Watts (W);
- $W$  – Trabalho Joules (J);
- $\Delta t$  – Variação do tempo em segundos (s).

$$1W = 1 \text{ J/s}$$

### 3.4.2 Conversão de Energia por Fontes Animais

Historicamente, a humanidade tem explorado a conversão de energia biológica em trabalho mecânico, com a força animal sendo uma das primeiras fontes exógenas de energia utilizadas. Um exemplar equino, por exemplo, é capaz de produzir uma potência aproximada de 735,5 watts, valor este que corresponde à unidade de medida de potência denominada cavalo-vapor (CV). A unidade cavalo-vapor é uma medida de potência que era tradicionalmente usada para quantificar a potência de motores a vapor e ainda é usada em alguns contextos. Um cavalo-vapor é definido como a potência necessária para elevar verticalmente um peso de 75 quilogramas à velocidade de um metro por segundo

Figura 2 - Definição e Cavalo Vapor (Horsepower) com Demonstração Prática do Conceito.



Fonte: (COCKPIT 2021)

Esta unidade é tradicionalmente empregada como referência para quantificar a capacidade de trabalho de motores de combustão interna. (FARIAS,2013)

A conversão da potência gerada em CV para W se apresenta como:

$$1\text{CV} = 735,499 \text{ W (watt)}.$$

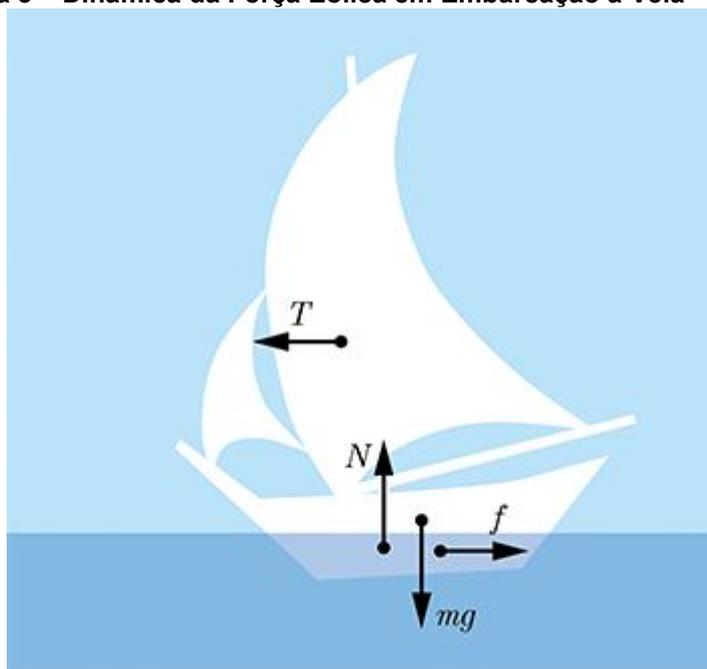
Embora a força animal tenha sido uma das primeiras formas de energia aproveitada pela humanidade, ela apresenta restrições inerentes, tais como a

necessidade de sustento e repouso periódico dos animais, o que compromete a robustez e a constância dessa fonte energética (FARIAS,2013).

### 3.5 Exploração Histórica da Energia Eólica

A documentação histórica revela a exploração da energia eólica para propulsão naval, com evidências que remontam a cerca de 800 anos antes da era comum. Neste contexto, as embarcações à vela captavam a energia cinética do vento para navegação. Com a progressão tecnológica ao longo dos séculos, a energia eólica foi reconfigurada para aplicações terrestres, notavelmente na operacionalização de moinhos de vento. Este desenvolvimento ilustra a trajetória de inovação no uso de fontes de energia renováveis e sua conversão em trabalho mecânico efetivo (HÉMERY 1993).

Figura 3 – Dinâmica da Força Eólica em Embarcação à Vela



Fonte: (WANG 2023)

- $T$  – Tração do vento aproveitada pela vela (N);
- $N$  – Força normal (N);
- $mg$  – Peso do barco (N);
- $f$  – Força de arrasto do barco na água (N).

### 3.5.1 Aplicação Antiga da Energia Eólica em Nashtifan

Em Nashtifan, localidade situada no Irã, persistem moinhos de vento que datam de mais de um milênio e que ainda se mantêm operacionais. Estas construções verticais, primordialmente edificadas em madeira, tinham como finalidade primária a moagem de cereais. Embora, sob uma ótica contemporânea, possam ser percebidos como rudimentares em eficiência, no contexto de sua invenção, representavam uma inovação tecnológica significativa, demonstrando a habilidade humana precoce de harnessar a força da natureza para fins energéticos produtivos (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2017).

**Fotografia 1 – Primeiros Moinhos de Vento Documentados em Nashtifan, Irã**



**Fonte: (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2017)**

### 3.5.2 Transformações Energéticas ao Longo da História Humana

Historicamente, a humanidade tem demonstrado uma capacidade progressiva de converter diversas modalidades de energia para satisfazer suas exigências vitais e tecnológicas. Na contemporaneidade, observa-se que a eletricidade acendeu ao status de modalidade energética preeminente, particularmente em contextos de aplicações estacionárias, refletindo uma transição significativa nos paradigmas de consumo e geração de energia (FLORENTINO, 2016).

### 3.6 Caracterização da Energia Elétrica e Métodos de Geração

A energia elétrica caracteriza-se pelo movimento direcionado de elétrons através de um meio condutor, o qual é capaz de converter essa energia em trabalho útil com elevada eficácia. A eficiência na transmissão de energia elétrica é atribuída à capacidade dos condutores metálicos de conduzir corrente elétrica com resistividade minimamente impactante. A geração de eletricidade é realizada por meio de uma diversidade de tecnologias, que incluem, mas não se limitam a, centrais hidroelétricas, usinas termoelétricas que utilizam combustíveis fósseis ou biomassa, reatores nucleares, e instalações de captação de energia solar fotovoltaica e turbinas eólicas, cada uma com seus respectivos princípios operacionais e impactos ambientais (SILVA, 2021).

#### 3.6.1 Análise do Quilowatt-hora como Unidade de Medida de Energia: Implicações na Eficiência Energética e Consumo Elétrico

O quilowatt-hora (kWh) é uma unidade de medida de energia amplamente utilizada no contexto da geração, transmissão e consumo de energia elétrica. Essencialmente, representa a quantidade de energia consumida ou produzida por um dispositivo que opera a uma potência de um quilowatt (kW) durante uma hora. Esta unidade é fundamental para entender a eficiência energética, o consumo de energia e a capacidade de geração de sistemas de energia.

Do ponto de vista físico, o kWh é uma unidade derivada que combina a unidade de potência, o watt (W), com a unidade de tempo, a hora (h). Um watt é definido como um joule por segundo (J/s), portanto, um quilowatt é igual a mil watts. Assim, um kWh equivale a 3.600.000 joules (3,6 megajoules), refletindo a energia transferida ou utilizada em uma hora por um processo que ocorre a uma taxa constante de um quilowatt (BERGMAN, 2011)

Na prática, o kWh é utilizado para quantificar o consumo de energia elétrica em residências, indústrias e outros estabelecimentos. As companhias de energia elétrica utilizam esta unidade para medir e cobrar o consumo de seus clientes. Por exemplo, um aparelho de 100 watts operando por 10 horas consumirá 1 kWh de energia (100 watts x 10 horas = 1.000 watt-horas = 1 kWh) (SMITH, 2018)

Além disso, o kWh é uma unidade crucial no contexto das energias renováveis. Por exemplo, a capacidade de geração de um painel solar é frequentemente expressa em termos de kWh, indicando a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada sob condições ideais durante um determinado período (JONES, 2016)

### 3.6.2 Avanços e Desafios mundiais da Energia Eólica

Globalmente, a energia eólica tem experimentado um crescimento exponencial, impulsionado por avanços tecnológicos, redução de custos e políticas favoráveis, a capacidade instalada de energia eólica em todo o mundo ultrapassou 650 GW (Gigawatts) até o final de 2020, com a China e os Estados Unidos liderando em termos de capacidade instalada (GWEC, 2021).

No Brasil, a energia eólica também tem se destacado como um dos setores de energia renovável de mais rápido crescimento, o Brasil alcançou uma capacidade instalada de mais de 17 GW até o final de 2020, posicionando-se entre os maiores produtores de energia eólica do mundo. Este crescimento é atribuído à abundância de recursos eólicos, especialmente no Nordeste do país, e a um ambiente regulatório favorável (ABEEólica, 2021).

Além disso, a energia eólica desempenha um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas. Ao substituir fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, a energia eólica reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa. Estudos indicam que cada MW (megawatt) de energia eólica instalada pode economizar aproximadamente 2.000 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano (IPCC, 2018).

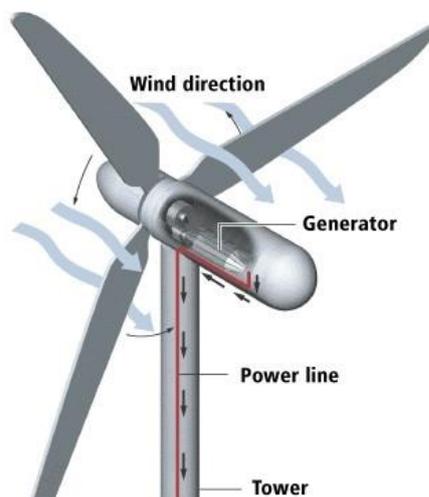
Em termos de desafios, a energia eólica enfrenta questões como a variabilidade da produção de energia e a necessidade de integração com outras fontes de energia e sistemas de armazenamento para garantir uma oferta constante e confiável de eletricidade. Além disso, questões ambientais e sociais, como o impacto sobre a fauna local e a aceitação pública, também são considerações importantes no desenvolvimento de projetos eólicos (IEA, 2020).

#### 3.6.2.1 Cálculo da Energia Eólica para Aplicações em Moinhos de Vento

A quantificação da energia eólica capturada por moinhos de vento é determinada por uma equação específica que leva em consideração variáveis como

a velocidade do vento, a área varrida pelas pás do rotor e a densidade do ar. (FLORENTINO, 2016):

**Figura 4 – Representação Esquemática de um Aerogerador: Detalhamento Estrutural e Funcional.**



Fonte:(REIS 2016)

A equação da potência para moinhos de vento se apresenta como:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

- $P$  – Potência do vento (W);
- $\rho$  – Massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ );
- $A$  – área da seção transversal ( $\text{m}^2$ );
- $v$  – Velocidade do vento (m/s).

### 3.6.3 Viabilidade de Fontes Energéticas para Aplicações em Transporte

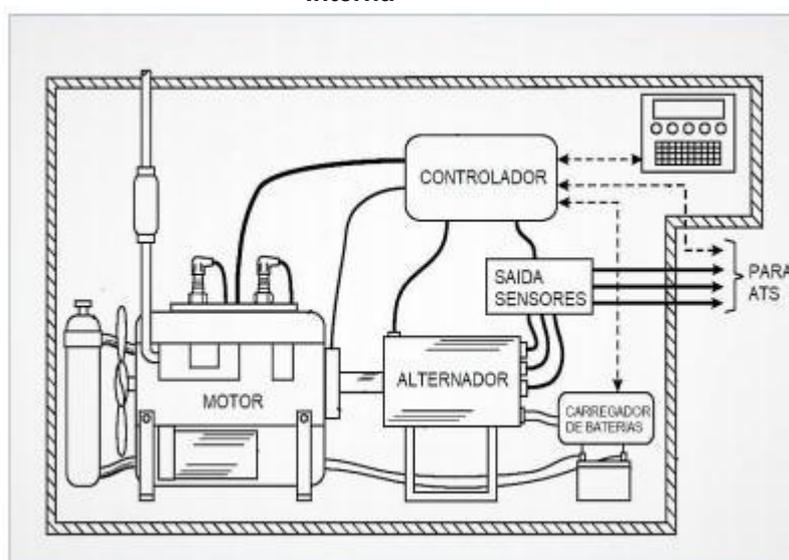
No âmbito do transporte e da movimentação de cargas, a predominância da energia térmica e química derivada da combustão de combustíveis fósseis persiste devido à sua alta densidade energética e facilidade de transporte. Contudo, a eletrificação do transporte tem ganhado terreno com o advento e aperfeiçoamento de veículos elétricos. Apesar disso, a transição para a eletricidade como vetor energético primário em veículos enfrenta desafios relacionados à infraestrutura de recarga, densidade energética das baterias e cadeias de suprimento para componentes

críticos, o que atualmente limita sua aplicabilidade em comparação com os combustíveis fósseis (SILVA, 2021).

### 3.6.3.1 Geração de Energia e Trabalho em Motores de Combustão Interna

Os motores de combustão interna emergiram como elementos fundamentais no avanço da sociedade contemporânea, atuando como pilares primários na geração de energia para uma ampla gama de aplicações industriais e cotidianas. Desde o advento do século XX, esses motores revolucionaram setores críticos como transporte, manufatura e agricultura, fornecendo fontes de energia altamente confiáveis e eficientes. A eficácia operacional dos motores, aprimorada significativamente por avanços tecnológicos recentes, os estabeleceu como componentes indispensáveis em diversos segmentos industriais. Estes motores demonstram a capacidade de converter mais de 30% da energia contida em combustíveis fósseis em trabalho mecânico útil, um marco impressionante dado a intrincada natureza dos processos termodinâmicos envolvidos (HEYWOOD, 1988)

**Figura 5 - Representação Esquemática de um Gerador Elétrico com Motor de Combustão Interna**



Fonte: (OLIVEIRA 2021)

Motores de combustão interna são sistemas que convertem energia química, oriunda de combustíveis fósseis, em energia mecânica. Este processo de conversão é regido pela Primeira Lei da Termodinâmica, que postula a conservação de energia

no sistema, assegurando que a energia total do motor se mantém constante ao longo do tempo. (FERGUSON 2015).

A equação da eficiência térmica de um motor a combustão interna se apresenta como:

$$\eta = 1 - (Q_{out}/Q_{in})$$

- $\eta$  – Eficiência termodinâmica, (0-1);
- $Q_{in}$  – Calor adicionado ao sistema, (J);
- $Q_{out}$  – Calor rejeitado pelo sistema, (J).

No ciclo de Otto, composto por quatro tempos: admissão, compressão, expansão e escape. característico de motores a gasolina, durante o ciclo, o pistão realiza movimentos alternados, aspirando a mistura ar-combustível, comprimindo-a, detonando a mistura para gerar a explosão e, finalmente, expelindo os gases resultantes. Esse processo converte a energia liberada pela combustão em movimento linear do pistão, alimentando o sistema com trabalho mecânico realizado em um ciclo, esse trabalho é quantificado pela diferença entre o calor absorvido durante a combustão e o calor expelido durante a exaustão (FERGUSON 2015).

A equação do trabalho realizado de um motor a combustão interna se apresenta como:

$$W = Q_{out} - Q_{in}$$

- $W$  – Representa o trabalho realizado, medido em Joules (J);
- $Q_{in}$  – Calor adicionado ao sistema, (J);
- $Q_{out}$  – Calor rejeitado pelo sistema, (J).

Este ciclo compreende quatro etapas: admissão isotérmica, compressão adiabática, expansão adiabática (também conhecida como "power stroke") e exaustão isotérmica (FERGUSON 2015).

Adicionalmente, a adaptabilidade dos combustíveis fósseis, como a gasolina e o diesel, juntamente com a infraestrutura estabelecida para sua distribuição e consumo, consolidou a posição dos motores a combustão como uma coluna vertebral na produção de energia. Mesmo diante do crescimento exponencial de tecnologias

voltadas para energias renováveis e da ascensão dos veículos elétricos, os motores de combustão interna mantêm-se como elementos centrais na composição da matriz energética global, evidenciando sua resiliência e capacidade de adaptação ao longo das décadas (HEYWOOD, 1988)

### 3.6.4 Geração Hidrelétrica: Perspectivas Globais e Impactos Ambientais

A geração hidrelétrica, uma das formas mais estabelecidas de produção de energia renovável, desempenha um papel crucial no mix energético global. As usinas hidrelétricas, que convertem a energia potencial da água armazenada em energia elétrica, são responsáveis por uma parcela significativa da eletricidade gerada em todo o mundo. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), a energia hidrelétrica contribuiu com cerca de 16% da geração total de eletricidade mundial em 2019, tornando-se a maior fonte de energia renovável em termos de geração (IEA, 2020).

A eficiência das usinas hidrelétricas, combinada com sua capacidade de fornecer energia de base e de pico, as torna componentes valiosos para a estabilidade das redes elétricas. Além disso, a flexibilidade operacional das hidrelétricas permite que elas se ajustem rapidamente às flutuações na demanda de energia, o que é especialmente importante em sistemas que integram fontes de energia intermitentes, como a solar e a eólica (SAMPAIO 2005).

Globalmente, a implementação de projetos hidrelétricos continua a crescer, embora a um ritmo mais lento em comparação com outras fontes renováveis. Países com vastos recursos hídricos, como o Canadá, o Brasil, a China e a Rússia, são líderes na geração de energia hidrelétrica. A China, em particular, tem investido fortemente em hidrelétricas, com projetos emblemáticos como a Barragem das Três Gargantas, a maior usina hidrelétrica do mundo em termos de capacidade instalada (WORLD ENERGY COUNCIL. 2021).

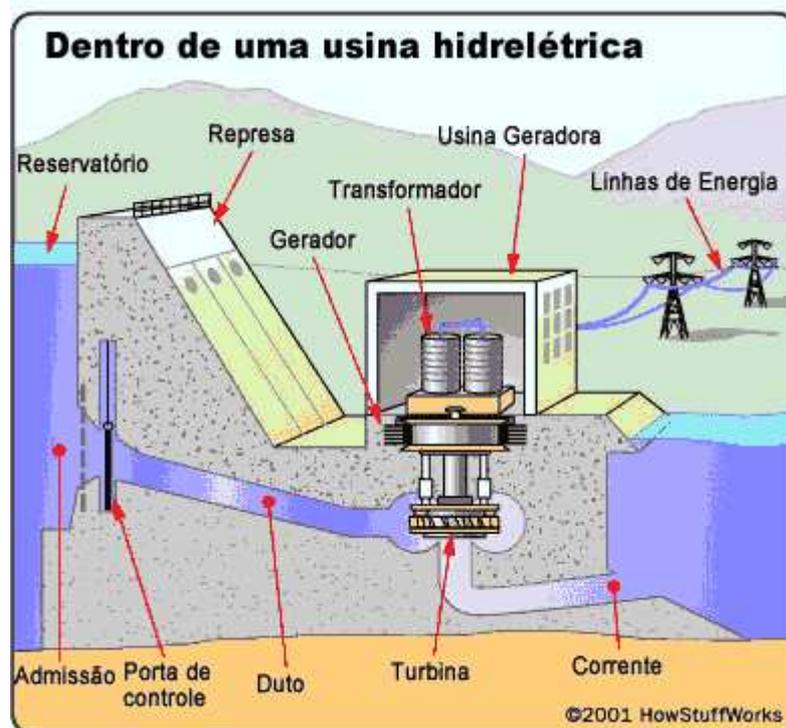
No entanto, a expansão da energia hidrelétrica enfrenta desafios significativos. Questões ambientais, como o impacto sobre ecossistemas aquáticos e terrestres, deslocamento de comunidades locais e alterações no regime de rios, são preocupações crescentes. Além disso, as mudanças climáticas podem afetar a disponibilidade de recursos hídricos, impactando a confiabilidade das usinas hidrelétricas. Esses fatores têm levado a um escrutínio mais rigoroso dos projetos

hidrelétricos e à busca por abordagens mais sustentáveis e integradas de gestão de recursos hídricos (WORLD COMMISSION ON DAMS. 2020).

### 3.6.4.1 Conversão Energética em Centrais Hidroelétricas

As centrais hidroelétricas são instalações que efetuam a transdução de energia potencial gravitacional em energia elétrica. A dinâmica operacional dessas usinas envolve a utilização da pressão exercida pela coluna de água acumulada em reservatórios elevados, que, ao ser liberada, impulsiona turbinas acopladas a geradores. A rotação das turbinas induzida pela passagem da água converte-se em energia elétrica, que é subsequente e distribuída para consumo. Ademais, as hidrelétricas estão inseridas em um ciclo de transformação energética mais amplo, que compreende a energia solar responsável pela evaporação da água, e a energia cinética das precipitações atmosféricas que reabastecem mananciais, rios e bacias hidrográficas, criando o potencial gravitacional que será explorado na geração de energia elétrica (ENERGÊS, 2020)

Figura 6 - Representação Esquemática de uma Usina Hidroelétrica:



Fonte: (BONSOR, 2001)

A equação da potência para geradores de turbinas hidroelétricos se apresenta como:

$$P = p \cdot g \cdot H \cdot Q \cdot n$$

- $P$  – Potência da água (W);
- $p$  – Densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ );
- $g$  – Aceleração devido à gravidade ( $9,8 \text{ m/s}^2$ );
- $H$  – Desnível (m);
- $Q$  – Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- $n$  – Rendimento do gerador (%).

A eletricidade, notoriamente eficiente para transporte em regimes de alta tensão e corrente alternada, enfrenta, contudo, barreiras substanciais no que concerne ao armazenamento. A problemática do confinamento de energia elétrica em dispositivos de acumulação, como baterias, para utilização subsequente, representa um desafio técnico que se estende por mais de dois séculos. Para contextualizar tal desafio, pode-se referir a um contexto histórico onde a prontidão de energia elétrica era de suma importância, entretanto, a infraestrutura necessária para a transmissão efetiva por meio de condutores metálicos não estava disponível ou era inviável (VASCONCELOS 2017).

A equação da transmissão de energia elétrica por fios se apresenta como:

$$P = \int_a^b R * i(t)^2 dt$$

- $P$  – Potência dissipada (W);
- $R$  – Resistência do cabo em Ohms ( $\Omega$ );
- $i$  – Corrente elétrica em amperes (A);
- $t$  – Tempo (s).

### 3.6.5 Fundamentos Científicos da Energia Solar

A energia solar representa uma modalidade de energia radiante originária do Sol, desempenhando um papel crucial em diversos processos terrestres. Esta forma de energia é constituída por um espectro de radiação eletromagnética, abrangendo a luz visível, a radiação ultravioleta e a infravermelha. A energia solar é fundamental para o desenvolvimento e a operacionalização de diversas tecnologias de energia renovável, com destaque para os sistemas fotovoltaicos e as aplicações de energia solar térmica. (BRAGA 2008)

#### 3.6.5.1 Dinâmica da Energia Solar:

A geração de energia solar é um resultado direto das reações de fusão nuclear ocorrendo no núcleo solar, onde átomos de hidrogênio são fundidos para formar hélio, liberando energia em forma de radiação eletromagnética. Embora apenas uma fração desta energia alcance a Terra, ela é suficiente para exercer influência significativa sobre o clima, sustentar a vida e ser aproveitada em aplicações como a geração de eletricidade e sistemas de aquecimento. (LOPES 2023)

O Brasil apresenta condições altamente favoráveis para a exploração da energia solar, destacando-se pelo fato de o país experimentar grande parte do ano com uma exposição solar intensa. Essa característica é ampliada ainda mais pela vasta extensão territorial do Brasil, que se estende por paralelos próximos à linha do Equador, otimizando ainda mais o potencial de geração de energia solar (BRAGA 2008).

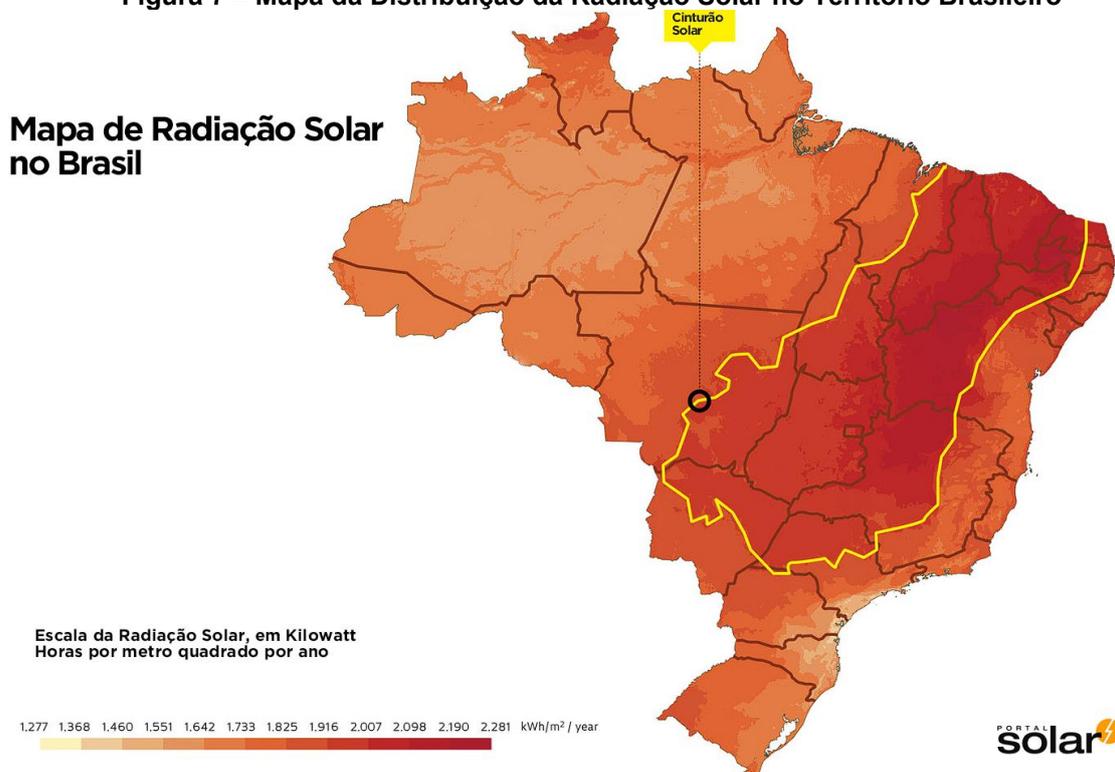
Ao examinarmos o mapa do solarímetro do território brasileiro, é possível identificar a presença de uma região designada como o "cinturão solar". Nessa área, observa-se uma notável intensidade na incidência solar, caracterizada por uma maior concentração de radiação solar. Esse fenômeno ressalta a relevância do Brasil como um local propício para a captação eficiente de energia solar, beneficiando-se da abundância de recursos naturais e das condições geográficas favoráveis. (SOLAR, 2019)

### 3.6.5.2 Ascensão da Energia Solar na Era Moderna

A trajetória ascendente da energia solar nas últimas décadas representa um marco significativo na evolução da geração de energia. Esta tendência ascendente é catalisada por avanços substanciais na tecnologia fotovoltaica, uma diminuição notável nos custos de implementação e uma consciência ambiental em ascensão. De acordo com o relatório da International Energy Agency (2021), a energia solar tem vivenciado uma expansão sem precedentes, caracterizada por um aumento exponencial na capacidade instalada globalmente.

Este avanço é predominantemente atribuído a melhorias na eficiência dos painéis fotovoltaicos, juntamente com políticas governamentais propícias, incluindo incentivos fiscais e subsídios voltados para a promoção de energia limpa. Adicionalmente, a demanda crescente por fontes de energia sustentáveis, em resposta às alterações climáticas e à urgência em diminuir as emissões de gases de efeito estufa, tem sido um impulsionador crítico. A energia solar não somente está na vanguarda da transição para as energias renováveis, mas também desempenha um papel crucial na atenuação dos impactos ambientais associados ao setor energético (MURDOCK, 2021).

**Figura 7 – Mapa da Distribuição da Radiação Solar no Território Brasileiro**



Fonte: (SOLAR, 2019)

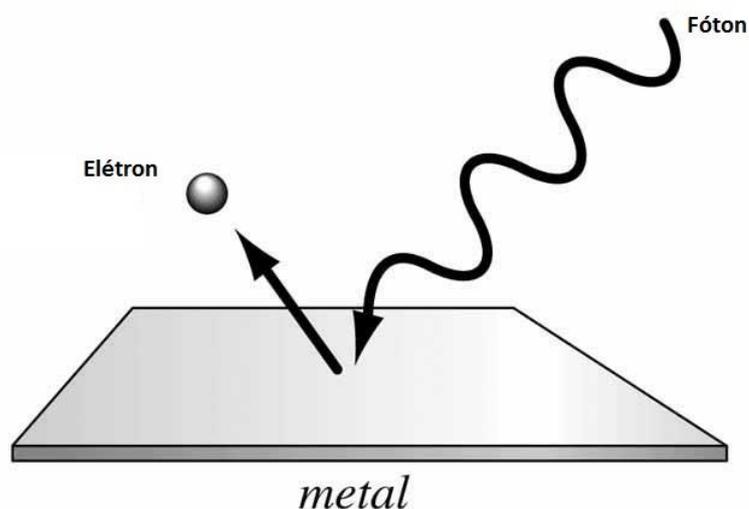
### 3.6.5.3 Captação de Energia Solar Fotovoltaica:

O processo de captação de energia solar é fundamentalmente regido pela interação dos fótons de luz com as células fotovoltaicas das placas solares. Esse fenômeno resulta na geração de uma corrente elétrica no sistema, conferindo a esse tipo de captação o nome de energia fotovoltaica (FADIGAS, 2000).

### 3.6.5.4 Características dos Fótons na Geração de Energia Fotovoltaica

Os fótons são partículas elementares que constituem a luz e todas as formas de radiação eletromagnética. Cada fóton carrega uma quantidade de energia específica, que é inversamente proporcional ao seu comprimento de onda, significando que fótons de maior frequência possuem maior energia (EINSTEIN 1905).

**Figura 8 - Representação Esquemática do Efeito Fotoelétrico: Ilustração da Emissão de Elétrons por Materiais Semicondutores sob Incidência de Radiação Fótonica**



(FÍSICA MODERNA, 2018)

No contexto da energia solar, os fótons emitidos pelo Sol têm a capacidade de excitar elétrons em materiais semicondutores, como os empregados em células fotovoltaicas, induzindo a geração de corrente elétrica por meio do efeito fotovoltaico. (BRAGA, 2008)

### 3.6.5.5 Processo de Conversão Fotovoltaica:

A conversão mais prevalente de energia solar em eletricidade ocorre através de painéis fotovoltaicos. Estes dispositivos são compostos por células solares feitas de materiais semicondutores, como o silício. Quando fótons solares incidem sobre essas células, eles podem provocar o deslocamento de elétrons, gerando assim um fluxo de corrente elétrica. Este processo é conhecido como efeito fotovoltaico, inicialmente descrito por Albert Einstein, que foi laureado com o Prêmio Nobel de Física em 1921 por seu trabalho pioneiro sobre o efeito fotoelétrico (EINSTEIN 1905) A equação que descreve a captação de energia fotovoltaica apresenta como:

$$Potf = \frac{E}{n \cdot Rs}$$

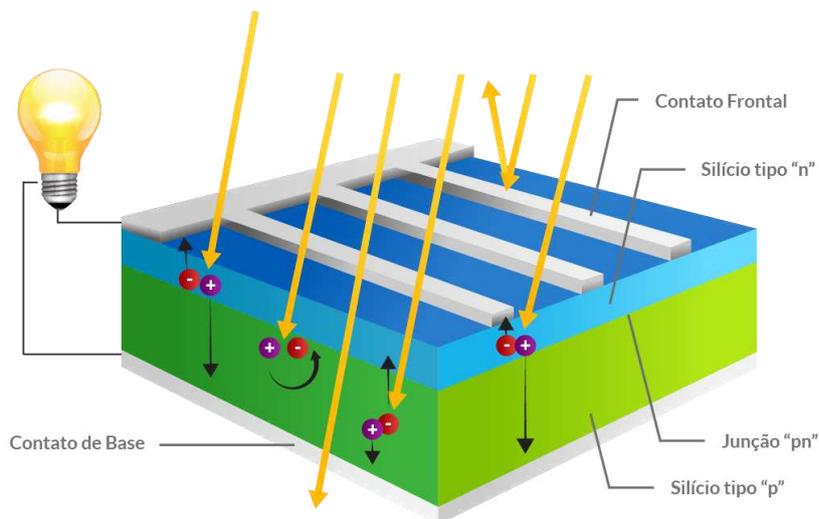
- *Potf* – Potência fotovoltaica em Quilowatt-pico (kWp);
- *E* – Consumo Residencial por mês (kWh/mês);
- *Rs* – Radiação solar mensal (kWh/m<sup>2</sup>);
- *n* – Eficiência das células (%)

As placas solares operam por meio de um processo intrincado de conversão direta da energia contida nos fótons da luz solar em eletricidade. Essas placas são constituídas principalmente de materiais semicondutores, comuns entre os quais estão o silício cristalino e o fósforo. Quando expostos à luz solar, esses semicondutores sofrem excitação, levando os elétrons a se movimentarem. Esse movimento eletrônico resulta na geração de uma corrente elétrica, como observado em experimentos conduzidos por Fadigas, (2000).

O silício, em particular, é o material semicondutor mais amplamente utilizado. Suas propriedades advêm do fato de seus átomos possuírem quatro elétrons de ligação, que estabelecem ligações com átomos vizinhos, criando uma sólida rede cristalina. Quando átomos de outro elemento, como o fósforo, que tem cinco elétrons de ligação, são adicionados a essa estrutura, um elétron fica "sobrando" e fracamente ligado ao seu átomo de origem. Essa característica permite que, com uma quantidade mínima de energia térmica, o elétron se liberte e migre para a chamada banda de condução. Esse processo, conforme investigado por Fadigas (2000), é crucial para a

geração de corrente elétrica nas placas solares e é fundamental para o funcionamento desses dispositivos. (BRAGA, 2008)

**Figura 9 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica**



Fonte: (BRAGA, 2008)

A equação da potência gerada pela célula fotovoltaica se apresenta como:

$$P_p = Q_t \cdot P_m$$

- $P_p$  = Potência máxima: (kWp);
- $Q_t$  = Número de módulos fotovoltaicos
- $P_m$  = Potência de módulo fotovoltaico (kWp);

### 3.7 Quantificação e Compreensão das Ineficiências em Sistemas Energéticos

Em conformidade com o axioma termodinâmico que postula a inexistência de processos com eficiência absoluta, manifesta-se a exigência de mensurar e elucidar as perdas intrínsecas aos sistemas energéticos em variados estados operacionais (ATKINS, 2018).

A equação do rendimento de sistemas energéticos se apresenta como:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} = \frac{U}{E}$$

- $\eta$  = Rendimento (0-1);
- $P_u$  = Potência útil (W);
- $P_t$  = Potência total (W);
- $U$  = Diferença de potencial em volts (V);
- $E$  = Energia elétrica (Wh).

### 3.8 Energia Renovável: Definições e Distinções em Relação a Outras Formas de Geração de Energia

A energia renovável, refere-se à energia gerada a partir de recursos naturais que são inesgotáveis em escala humana, como sol, vento, água e biomassa. Diferentemente dos combustíveis fósseis, que são limitados e geram significativos impactos ambientais, as fontes de energia renovável são caracterizadas pela sua capacidade de regeneração contínua e por um perfil ambiental consideravelmente mais sustentável (PEAKE, 2018).

Uma das principais distinções entre a energia renovável e as formas convencionais de geração de energia, como os combustíveis fósseis, reside na sustentabilidade e impacto ambiental. Enquanto os combustíveis fósseis liberam grandes quantidades de gases de efeito estufa e outros poluentes, contribuindo para as mudanças climáticas e problemas de saúde, as fontes renováveis oferecem uma alternativa mais limpa e com menor emissão de carbono (JACOBSON 2020)

As energias renováveis abrangem uma variedade de tecnologias e fontes, cada uma com suas características e aplicações específicas. A energia solar, por exemplo, captura a luz do sol usando painéis fotovoltaicos ou concentradores solares,

enquanto a energia eólica aproveita o poder dos ventos. A energia hidrelétrica, por sua vez, utiliza o fluxo de água para gerar eletricidade, e a biomassa é derivada de material orgânico. Cada uma dessas fontes tem seu próprio conjunto de vantagens, desafios e aplicações (TWIDELL, 2015)

### 3.8.1 Transição Energética e o Desafio da Intermitência das Fontes Renováveis

No contexto contemporâneo, observa-se uma evolução paradigmática nas matrizes energéticas globais, caracterizada pela progressiva substituição de combustíveis fósseis, especificamente carvão, petróleo e gás natural por alternativas de energia renovável, notadamente eólica e solar. Contudo, essas fontes renováveis são confrontadas com uma problemática substancial conhecida como intermitência. A intermitência refere-se à flutuação na geração de energia, influenciada por condições ambientais variáveis, desafiando a capacidade de fornecimento contínuo e confiável de energia. O termo "energia firme" é empregado para descrever a habilidade de uma fonte energética de assegurar um suprimento ininterrupto, mesmo durante períodos de demanda elevada ou de produção reduzida, uma propriedade frequentemente associada a usinas hidrelétricas devido à sua capacidade de armazenamento e regulação de fluxo energético (GALBIATTI-SILVEIRA, 2018).

Instalações termoelétricas movidas a carvão possuem a capacidade de gerar eletricidade de maneira contínua, independentemente das variações climáticas ou das condições diurnas, assegurando assim um suprimento energético estável e previsível. Em contrapartida, a geração fotovoltaica, implementada em usinas solares, está intrinsecamente limitada ao ciclo diurno e é otimizada sob condições de irradiância solar direta e ausência de cobertura nublada. A produção de energia por meio de tais instalações sofre atenuação significativa durante períodos de obstrução solar por nuvens. Analogamente, a geração eólica é condicionada pela variabilidade dos padrões de vento, que são suscetíveis a flutuações tanto sazonais quanto diárias em termos de intensidade e constância, resultando em uma natureza intermitente da energia produzida por turbinas eólicas (OSMARI, 2022).

A intermitência inerente às fontes de energia renovável, como a solar e eólica, impõe a necessidade de implementar estratégias eficazes de armazenamento energético. Isso permite a retenção do excedente energético gerado em períodos de alta produtividade, caracterizados por condições meteorológicas ótimas, como dias

com alta insolação ou com ventos fortes. O objetivo é disponibilizar essa energia acumulada em momentos de déficit produtivo, que ocorrem durante a noite ou em dias com condições climáticas adversas, assegurando assim uma oferta contínua de energia independentemente das flutuações ambientais (OSMARI, 2022).

### 3.8.2 Armazenamento de Energia Durante Superávit e Mitigação da Instabilidade em Fontes Renováveis

O armazenamento de energia em períodos de superávit energético emerge como uma solução estratégica para contrabalançar a intermitência inerente às fontes de energia renováveis. A natureza flutuante da geração de energia a partir de fontes como solar e eólica, sujeitas a variações diurnas e sazonais, impõe desafios significativos à estabilidade da rede elétrica. O armazenamento de energia durante períodos de excesso de produção permite a criação de um reservatório energético, que pode ser posteriormente mobilizado para suprir a demanda durante períodos de baixa geração. Esta abordagem não apenas melhora a confiabilidade do fornecimento de energia, mas também otimiza a eficiência do uso de recursos renováveis. (KALDELLIS 2011)

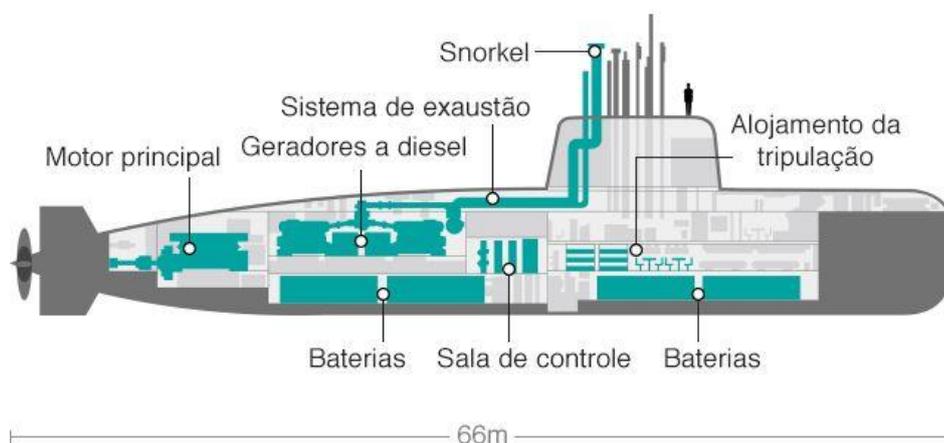
Além disso, a implementação de sistemas de armazenamento de energia robustos e eficientes contribui para a mitigação de flutuações na rede elétrica, proporcionando uma resposta rápida às variações de demanda. Esta capacidade de resposta rápida é crucial para manter a estabilidade da rede, especialmente em cenários onde a geração de energia é altamente dependente de condições ambientais variáveis. A integração de tecnologias de armazenamento de energia, como baterias de íons de lítio e sistemas de armazenamento gravitacional, tem demonstrado ser eficaz na harmonização do fornecimento de energia renovável com as demandas de consumo, contribuindo para a transição para um sistema energético mais sustentável e resiliente (EIA 2020)

### **3.9 Desafios Históricos no Armazenamento de Energia em Aplicações Militares:**

Em 1914, durante o auge da Primeira Guerra Mundial, a Marinha Imperial Alemã inovou com a introdução dos primeiros submarinos operados por motores a diesel quando navegavam na superfície. Estes submarinos, contudo, eram equipados

com baterias que desempenhavam um papel crucial durante as operações subaquáticas. A necessidade de submergir impunha a dependência da energia previamente armazenada nas baterias, visto que a captação de ar para os motores era inviável em profundidades oceânicas. Apesar da presença de múltiplas baterias, a capacidade de permanência submersa desses submarinos era notavelmente restrita, limitando-se a não mais do que uma hora devido à rápida depleção da carga das baterias. A recarga destas, por sua vez, demandava um dia inteiro de operação contínua dos motores a diesel na superfície, representando uma significativa ineficiência para as operações militares da época (CABRAL, 2022).

**Figura 10 - Esquema Simplificado de Submarino Durante o Carregamento da Bateria com Motor a Diesel**



**Fonte: (BBC, 2017)**

A equação referente ao tempo de carga de uma bateria se apresenta como:

$$E = P \cdot \Delta t$$

- $E$  - Energia elétrica em watts-hora (Wh) ou joules (J);
- $P$  - Potência da fonte de recarga “motor” (W);
- $\Delta t$  - Tempo que a bateria está sendo recarregada em horas (h).

A eficácia de um sistema de armazenamento energético não se limita apenas à sua capacidade de armazenar energia de maneira eficiente, mas também engloba aspectos cruciais como durabilidade, longevidade operacional e rapidez no processo

de recarga. Idealmente, tais sistemas devem exibir uma elevada flexibilidade operacional, acessibilidade e facilidade de manutenção, além de serem eficientes em termos energéticos e economicamente viáveis. Estes critérios são fundamentais para garantir a implementação bem-sucedida e sustentável de soluções de armazenamento energético em diversos contextos (SILVA, 2021).

### 3.9.1 Degradação em Baterias de Íon-Lítio:

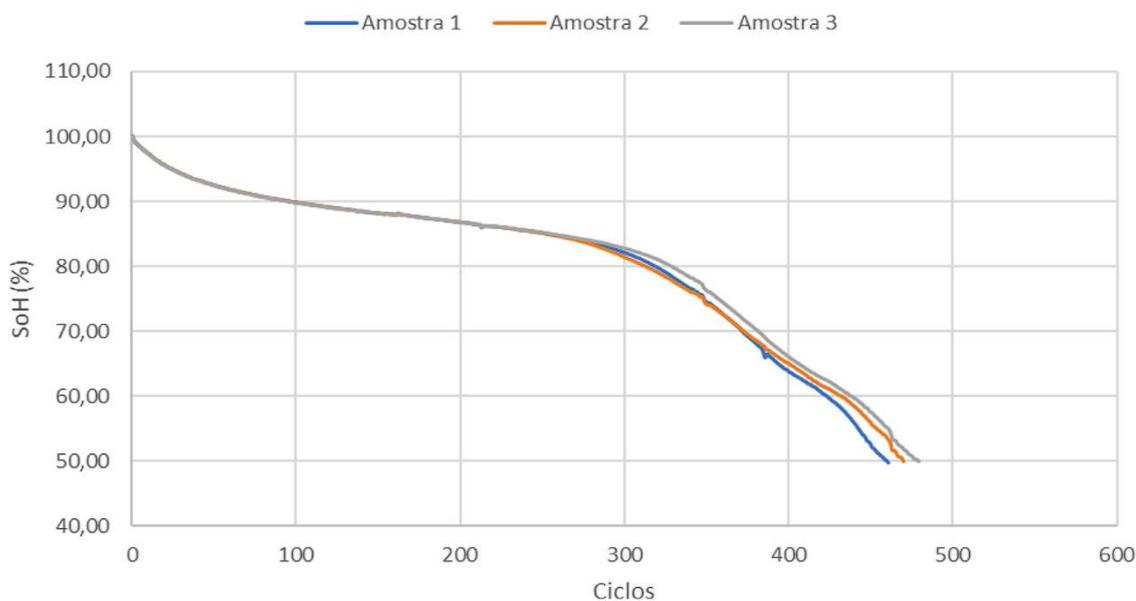
O mecanismo de ação das baterias é fundamentado na operação de células galvânicas, que funcionam através de pares redox compostos por cátodos e ânodos. Durante a operação de descarga, o ânodo libera elétrons, enquanto o cátodo os aceita. A corrente elétrica gerada quando um circuito é completado por um condutor de baixa resistência pode ser utilizada como energia elétrica. Este é o princípio operacional das baterias químicas convencionais (ATKINS, 2018).

O método predominante de armazenamento de energia na atualidade é o eletroquímico, notoriamente implementado nas baterias de íon-lítio devido à sua alta eficiência energética. Contudo, esses dispositivos de armazenamento apresentam limitações significativas. As baterias de íon-lítio possuem uma capacidade de carga finita e estão associadas a custos econômicos consideráveis. Ademais, sua vida útil operacional é limitada, com uma expectativa de 300 a 500 ciclos de carga e descarga. A durabilidade de uma bateria, tal como as utilizadas em dispositivos móveis, pode variar substancialmente em função do regime de uso. Em aplicações de grande envergadura, a viabilidade econômica do uso de baterias de íon-lítio pode ser comprometida devido a essas restrições (OSMARI, 2022).

No âmbito do Congresso Brasileiro de Energia Solar, foi relatado um estudo que executou procedimentos experimentais em três células de acumuladores de íons de lítio, todas oriundas do mesmo fabricante. Estas células foram submetidas a uma série de ciclos completos de carga e descarga, oscilando entre a capacidade máxima de carga e o esgotamento total da energia armazenada. O propósito era avaliar o estado de saúde das células, frequentemente abreviado como SoH (State of Health). A análise dos dados obtidos indicou que, após a realização de aproximadamente 380 ciclos, as células preservaram cerca de 70% da capacidade de carga original. Notavelmente, a inspeção do gráfico de degradação revelou que, subseqüentemente ao marco onde as células atingiram 80% de sua eficiência inicial, foi observada uma

declinação pronunciada e progressiva em seu desempenho, o que sinaliza a aproximação do fim do ciclo de vida útil das células (ROSOLEM, 2018).

**Figura 11 - Gráfico Representativo da Degradação de Baterias de Íon-Lítio ao Longo dos Ciclos**  
Fabricante A



Fonte: (ROSOLEM, 2018)

### 3.9.2 Extração de Lítio: Implicações Ambientais e Hidrológicas

A extração de lítio, um elemento crucial nas baterias de íon-lítio, representa um desafio ambiental significativo, particularmente em termos de gestão de recursos hídricos. As operações de mineração de lítio, notavelmente no Salar de Atacama, Chile, têm sido vinculadas à diminuição dos níveis de água subterrânea, com consequências adversas para a biodiversidade local e comunidades dependentes desses ecossistemas aquáticos. A intensa utilização de água nesses processos de mineração levanta preocupações sobre a sustentabilidade hídrica e a preservação ecológica (SOVACOOOL, 2020)

### 3.9.3 Impactos Ambientais da Extração de Chumbo e Enxofre

A extração e processamento de chumbo, essencial para a produção de baterias de chumbo-ácido, é uma fonte notória de poluição ambiental. Esta atividade libera substâncias tóxicas, incluindo chumbo, arsênico e mercúrio, no ambiente,

levando à contaminação de solos, corpos d'água e atmosfera. Estes contaminantes representam riscos substanciais à saúde humana e à integridade ecológica. Paralelamente, a extração de enxofre, embora menos enfatizada, contribui para problemas ambientais, principalmente através das emissões de dióxido de enxofre, que são precursores da chuva ácida e poluentes atmosféricos (TCHOUNWOU,2012).

#### 3.9.4 Desafios Ambientais no Descarte de Baterias

O descarte inadequado de baterias de íon-lítio e chumbo-ácido constitui uma ameaça ambiental significativa. O descarte em aterros sanitários ou de forma imprópria pode resultar na liberação de metais pesados e outras substâncias tóxicas no solo e águas subterrâneas. Adicionalmente, as baterias de íon-lítio carregam riscos de incêndio e explosão quando danificadas ou descartadas de maneira inadequada, representando um perigo tanto ambiental quanto de segurança (KANG, 2019).

### 3.10 Alternativa das Baterias Gravitacionais

Investigações emergentes indicam uma abordagem promissora para o armazenamento eficiente de grandes quantidades de energia, que se desvia das convencionais baterias de íon-lítio e emprega conceitos relativamente simples, ainda não amplamente explorados. Para elucidar este conceito, retomemos o exemplo da sessão *“Análise da Conversão de Energia Potencial Gravitacional”* nela um objeto de 5 quilogramas lançado de um edifício. Imaginando uma corda controlando a descida desse objeto, conectada a um gerador elétrico, a descida controlada poderia gerar energia elétrica. Contudo, para reiniciar esse processo, seria necessário elevar o objeto de volta à posição inicial na corda. Este princípio fundamenta as baterias mecânicas que exploram a energia potencial gravitacional, um tópico central neste estudo acadêmico.

#### 3.10.1 Armazenamento de Energia Durante Períodos de Escassez

A conversão do excedente de energia elétrica em energia eletroquímica para armazenamento em baterias de íon-lítio, que possuem limitações de vida útil e capacidade de armazenamento, pode ser substituída pela transformação desse excedente em energia potencial gravitacional. Esta abordagem é historicamente

evidenciada em aplicações como os relógios de pêndulo, que operavam com base na energia potencial gravitacional. Nesses dispositivos, a energia necessária para o funcionamento era gerada pela descida controlada de um peso, previamente elevado por meio de uma corda. Esse processo ilustra a viabilidade de sistemas de armazenamento gravitacional em contextos em que a regularidade e a previsibilidade do fornecimento de energia são cruciais (ALONSO, 1999).

**Figura 12 - Relógio de Pêndulo Movido por Energia Potencial Gravitacional**



(ALONSO, 1999)

No mecanismo do relógio de pêndulo, o peso atua como um depósito de energia, cuja liberação gradual é essencial para manter a operação do relógio. Durante o processo de elevação do peso, ocorre o armazenamento de energia potencial gravitacional. Posteriormente, à medida que o peso desce, essa energia potencial é convertida em energia cinética, que é então utilizada para impulsionar as engrenagens do relógio, garantindo sua funcionalidade contínua (ALONSO, 1999).

### 3.10.2 Densidade Energética: Comparação entre Baterias e Combustíveis Fósseis

A densidade energética, medida em termos de energia por unidade de massa (como joules por quilograma), é um parâmetro crucial na avaliação e comparação de diferentes fontes e métodos de armazenamento de energia. Esta métrica é particularmente importante ao considerar a eficiência e a viabilidade de baterias e combustíveis fósseis para diversas aplicações.

#### 3.10.2.1 Baterias de Chumbo-Ácido e Íon-Lítio

As baterias de chumbo-ácido, uma tecnologia amplamente utilizada em aplicações automotivas e de armazenamento de energia, apresentam uma densidade energética relativamente baixa, geralmente em torno de 30-40 Wh/kg (Watt-hora por quilograma). Em contraste, as baterias de íon-lítio, que são predominantes em dispositivos eletrônicos portáteis e veículos elétricos, oferecem uma densidade energética significativamente maior, tipicamente variando de 150 a 250 Wh/kg. Esta diferença substancial reflete o avanço tecnológico e a eficiência aprimorada das baterias de íon-lítio (TARASCON, 2001)

#### 3.10.2.2 Combustíveis Fósseis: Gasolina e Diesel

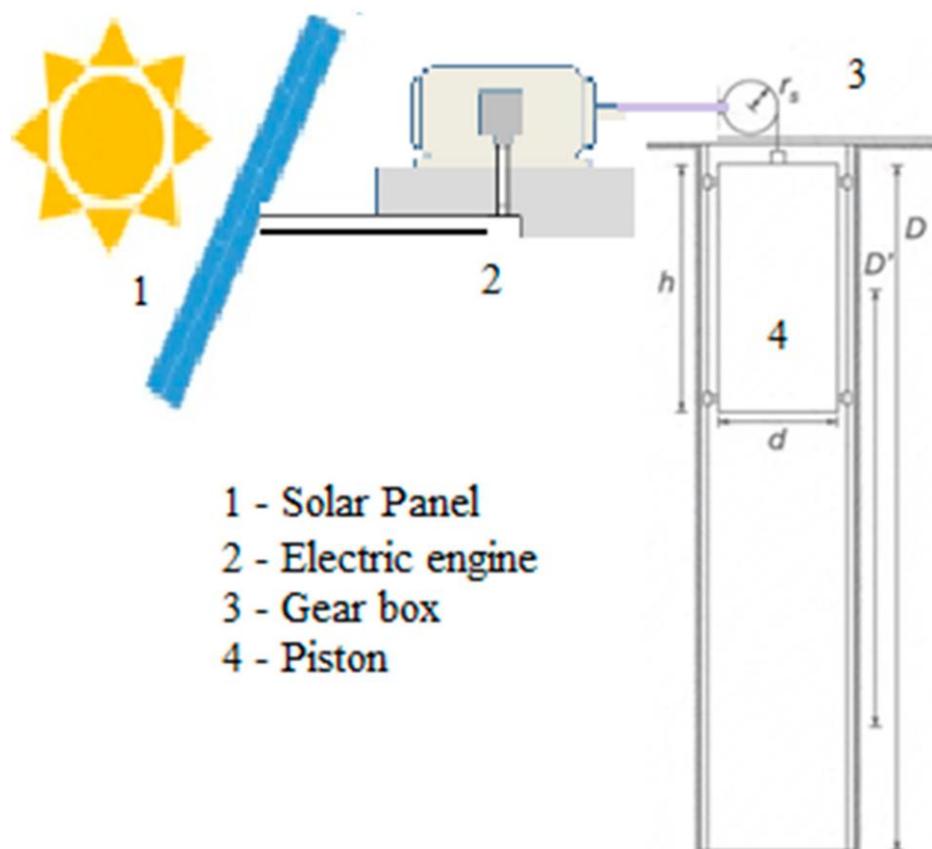
Os combustíveis fósseis, como a gasolina e o diesel, possuem densidades energéticas excepcionalmente altas. A gasolina tem uma densidade energética de aproximadamente 9.700 Wh/kg, enquanto o diesel está em torno de 10.700 Wh/kg. Esses valores elevados explicam a predominância dos combustíveis fósseis em aplicações de transporte e geração de energia, onde a alta densidade energética é essencial para o desempenho e a autonomia (SPEIGHT, 2017).

#### 3.10.2.3 Baterias Gravitacionais

A densidade energética desses sistemas depende de fatores como a altura da queda e a massa movida. Embora a densidade energética específica possa ser menor em comparação com as baterias químicas e combustíveis fósseis, as baterias gravitacionais oferecem vantagens como longevidade, sustentabilidade e baixo custo operacional. A comparação da densidade energética entre baterias gravitacionais e

outras formas de armazenamento é fundamental para avaliar sua aplicabilidade e eficiência em diferentes cenários (SILVA 2023)

**Figura 13 - Representação Esquemática de Bateria Gravitacional Integrada com Fonte de Energia Fotovoltaica:**



Fonte: (RUOSO 2019)

### 3.11 Incentivos no Armazenamento Gravitacional: Viabilidade Ambiental e Créditos de Carbono

Diferenciando-se significativamente dos métodos convencionais de armazenamento energético baseados em combustíveis fósseis, o armazenamento gravitacional é isento da emissão de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos durante sua operação. Esta característica harmoniza-se com as metas globais de diminuição das emissões de carbono e o combate às mudanças climáticas. Adicionalmente, em contraste com as baterias químicas, o armazenamento gravitacional não depende de materiais potencialmente prejudiciais ou desafiadores

em termos de reciclagem, mitigando os impactos ambientais associados à extração e descarte desses materiais (BARNHART, 2013)

### 3.11.1 Créditos de Carbono e Incentivos Econômicos

Projetos baseados em armazenamento gravitacional podem ser aptos a receber créditos de carbono através de programas como o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS) ou o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Quioto. Estes créditos são adquiridos mediante a demonstração de redução nas emissões de gases de efeito estufa em comparação com as alternativas que utilizam combustíveis fósseis. Governos e organizações internacionais podem também oferecer incentivos financeiros, tais como subsídios ou empréstimos a taxas de juros reduzidas, para fomentar o desenvolvimento e implementação de tecnologias de armazenamento gravitacional (STEFFEN, 2020).

### 3.11.2 Potencial de Mercado e Avanços Tecnológicos

O mercado potencial para o armazenamento gravitacional é notável, particularmente em regiões com elevada demanda por soluções de armazenamento de energia renovável e em áreas onde outras formas de armazenamento energético são menos viáveis. O desenvolvimento contínuo desta tecnologia, impulsionado por incentivos governamentais e interesse de mercado, pode resultar em aprimoramentos de eficiência e redução de custos, elevando sua atratividade para o armazenamento de energia em grande escala (IRENA, 2019)

Em suma, o armazenamento gravitacional de energia representa uma solução promissora e ecologicamente sustentável para o armazenamento de energia, com potencial para se beneficiar de incentivos relacionados a créditos de carbono e suporte financeiro, contribuindo assim para a transição global em direção a um futuro energético mais limpo e sustentável.

## 4 METODOLOGIA

O projeto proposto tem como objetivo demonstrar a viabilidade conceitual de um sistema de armazenamento de energia baseado na conversão de energia potencial gravitacional em energia elétrica. Esta etapa é necessária para garantir que o sistema seja capaz de operar de acordo com as especificações necessárias

A proposta visa estimar um sistema de armazenamento de energia direcionado para aplicações de pequena escala, priorizando a energia solar como principal fonte, com a implementação de um sistema de reserva para suprir demandas de energia quando necessário “backup”. Este projeto terá como base as atuais pesquisas científicas e práticas empresariais, incluindo o estudo de projetos de baterias gravitacionais desenvolvidos por empresas, embora a disponibilidade de informações seja limitada devido às considerações de sigilo comercial.

Neste estudo de caso, será realizada uma análise em uma residência operando com um sistema elétrico autossuficiente, desprovido de qualquer abastecimento elétrico externo. A principal fonte de energia para este sistema é a radiação solar, cuja energia é captada e acumulada ao longo do dia. Posteriormente, esta energia acumulada é utilizada para alimentar um sistema de armazenamento baseado na energia potencial gravitacional, que será empregado como fonte primária de energia durante o período noturno.

O cerne do projeto teórico é armazenar energia quando há um excesso disponível, para ser usada posteriormente, evitando desperdício energético e transformando fontes intermitentes em fontes mais estáveis e constantes. Independentemente do tipo de fonte energética utilizada, quando há um excedente de energia, o sistema projetado buscará formas de armazenar essa energia excedente.

A metodologia de execução deste projeto compreende a utilização de energia solar como a principal fonte de abastecimento, com a implementação de um sistema de armazenamento de energia baseado na elevação e descida de pesos em um poço, a fim de servir como reserva de energia para períodos de escassez ou redução na geração de energia fotovoltaica. Durante os períodos de pico na produção solar, os pesos serão elevados, acumulando energia potencial gravitacional. Em momentos de déficit na geração energética, como durante à noite, a liberação controlada dos pesos acionará geradores, convertendo a energia potencial em corrente elétrica.

#### **4.1 Parâmetros Científicos para a Elaboração de um Sistema de Armazenamento Gravitacional de Energia:**

Na concepção teórica e desenvolvimento de uma bateria gravitacional, diversos elementos fundamentais são considerados. Estes incluem:

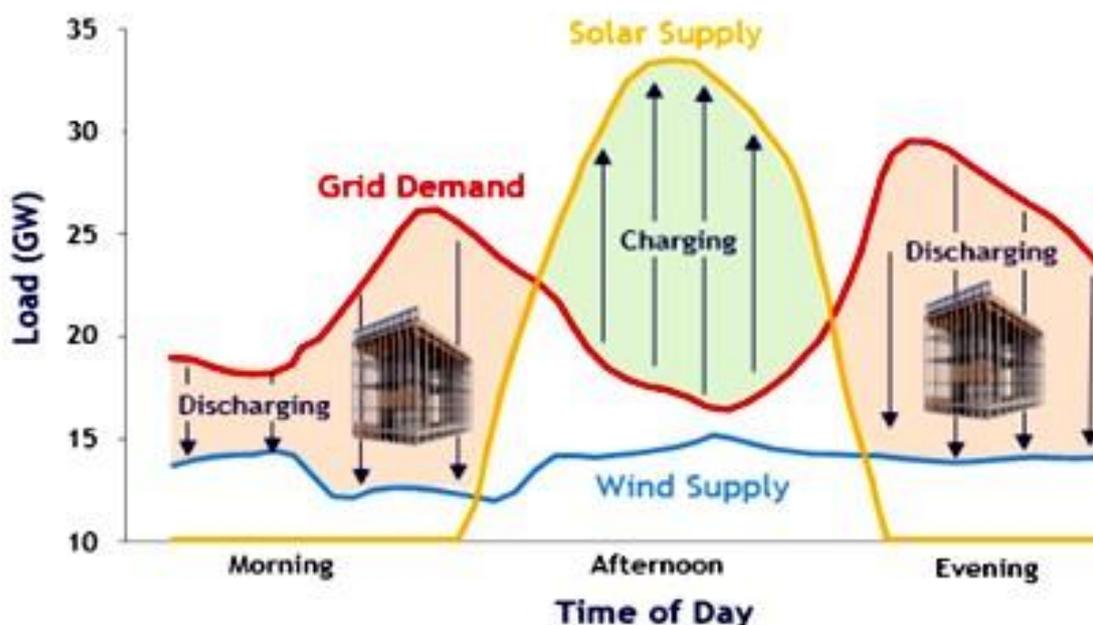
1. **Fonte de Energia Renovável:** O sistema será alimentado por energia solar, capturada através de painéis fotovoltaicos. A escolha desta fonte de energia baseia-se nas características específicas da região geográfica, otimizando a eficiência energética e sustentabilidade do sistema.
2. **Massa para Armazenamento de Energia:** O sistema requer uma massa com densidade significativa, que pode ser composta por materiais como blocos de concreto, metais de alta densidade ou grandes reservatórios de água. Esta escolha é fundamental para maximizar a energia potencial gravitacional armazenada.
3. **Altura Estrutural:** O projeto necessita de uma altura pré-determinada, adequada para uma instalação de pequena escala. Possíveis soluções incluem edifícios de baixa altura, poços desativados ou aproveitamento do relevo natural, como minas ou vales.
4. **Multiplicadores de Rotação:** Para transferir a energia potencial gravitacional para o motor, sistemas de multiplicação de rotação, como cabos e polias, engrenagens, caixas de câmbio, correias ou conversores de torque, serão implementados. Estes sistemas são essenciais para otimizar a conversão de energia.
5. **Motor e Gerador:** Um motor elétrico será utilizado para converter a energia mecânica da descida da massa em energia elétrica. Este motor pode também funcionar como um gerador, invertendo a corrente para controlar a elevação da massa. A eficiência do sistema será avaliada para determinar a necessidade de dispositivos separados para motor e gerador.
6. **Sistema de Polias:** O uso de polias é considerado para ajustar a velocidade de descida e elevação da massa, além de garantir a centralização e o alinhamento adequado do cabo.

7. Cabos de Tração: Cabos resistentes são fundamentais para o controle da descida e elevação da massa. A seleção do cabo dependerá da escala do projeto, variando de cabos finos para sistemas de pequena escala a cabos de aço para sistemas de grande escala.
8. Carretel: Um carretel robusto será necessário para enrolar o cabo, garantindo a resistência à tensão e evitando rupturas.
9. Sistema de Controle Central: Um sistema centralizado será responsável por gerenciar a descida e elevação da massa, de acordo com a demanda energética. Este sistema incluirá software, conversores, geradores, transformadores e inversores de tensão, funcionando como uma bateria gravitacional.
10. Consumo Elétrico: Para validar a viabilidade do projeto, será realizada uma estimativa do consumo elétrico diário de uma residência média brasileira, considerando o consumo durante o dia e a noite.
11. Análise Econômica: Uma avaliação econômica incipiente será conduzida para determinar a viabilidade do sistema em diferentes contextos. Esta análise incluirá fatores locais, dimensionais, estruturais, custos de materiais e a potencial obtenção de incentivos ambientais e de redução de emissões de carbono.

#### **4.2 Modelagem Teórica do Funcionamento e Descarga de uma Bateria Gravitacional**

A representação gráfica teórica subsequente demonstra a correlação entre a demanda energética e a necessidade de carga da bateria gravitacional. Esta representação é crucial para compreender o ciclo diário de acumulação e utilização de energia, onde a energia é coletada durante o dia, tipicamente através de fontes renováveis como painéis solares, e posteriormente consumida durante a noite. A figura 14 ilustra a variação temporal da demanda energética, destacando os períodos de pico de consumo e de geração de energia.

Figura 14 - Comparativo da Dinâmica Diurna entre Coleta e Consumo de Energia:



Fonte: (OZIN, 2023)

A fase seguinte envolve a aplicação de algoritmos avançados e programação específica no sistema de controle central. Este processo de otimização é essencial para sincronizar a descarga da bateria gravitacional com as necessidades energéticas, garantindo uma distribuição eficiente da energia armazenada. A programação deve ser suficientemente adaptável para responder a variações na demanda de energia, bem como a flutuações na geração de energia a partir de fontes renováveis.

Durante fases de produção excedente de energia, o sistema de armazenamento gravitacional acumula energia excedente elevando massas ponderadas. Este processo transforma energia elétrica em energia potencial gravitacional. Inversamente, em períodos de demanda energética, a energia é recuperada através da descida controlada dessas massas, reconvertendo a energia potencial gravitacional em energia elétrica, que é então reintegrada ao sistema. Esta metodologia representa um avanço significativo no campo do armazenamento de energias renováveis, oferecendo uma solução potencial para os desafios associados à intermitência na geração de energia renovável. A implementação deste sistema de armazenamento gravitacional pode ser considerada uma contribuição valiosa para o

desenvolvimento de estratégias eficazes de armazenamento energético no contexto das energias renováveis.

Este modelo teórico serve como um guia para o desenvolvimento e aprimoramento de sistemas de armazenamento gravitacional de energia, permitindo uma gestão mais eficaz e sustentável dos recursos energéticos. A análise detalhada dos padrões de consumo e geração de energia, aliada à otimização do sistema de controle, é fundamental para maximizar a eficiência e a eficácia do armazenamento e distribuição de energia em um contexto de crescente demanda por soluções energéticas sustentáveis.

### **4.3 Seleção de Projetos de Energia Renovável para Armazenamento Gravitacional**

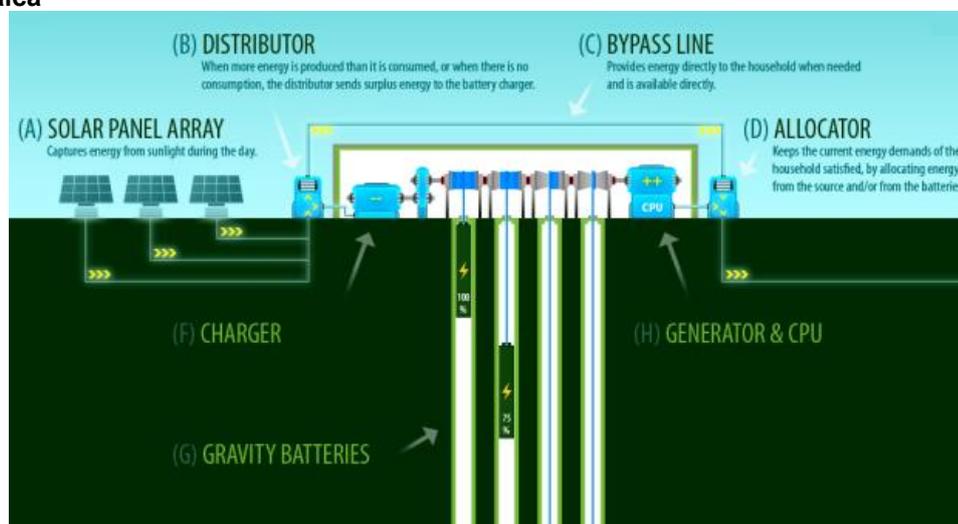
Dentro do espectro das fontes de energia renovável, a energia solar e eólica emerge como candidatas ideais para a implementação de sistemas de armazenamento gravitacional. Estas fontes exibem padrões de produção cíclicos distintos, marcados por fases de alta e baixa geração. Especificamente, a energia solar apresenta um ciclo de produção intrinsecamente ligado às variações diurnas, com picos durante o dia e redução à noite. Por outro lado, a energia eólica é condicionada pela variabilidade e presença de ventos adequados. A integração de um sistema de armazenamento gravitacional com estas fontes renováveis pode mitigar os desafios impostos pela intermitência, assegurando um fornecimento de energia mais estável e confiável.

#### **4.3.1 Projeto Solar para Armazenamento Gravitacional**

A concepção de um projeto de armazenamento gravitacional baseado em energia solar representa uma estratégia promissora, destacando-se pela sua eficiência de implementação e pela previsibilidade inerente ao ciclo solar. A regularidade dos ciclos solares, caracterizados por uma média constante de aproximadamente 12 horas de luz diurna, oferece uma base previsível para o planejamento e operação do sistema de armazenamento. Adicionalmente, a instalação de painéis solares é notável pela sua relativa simplicidade e baixa complexidade técnica. A efetiva implementação de um projeto solar requer uma análise detalhada e a coleta de dados precisos sobre a capacidade de geração de

energia dos painéis fotovoltaicos, considerando fatores como a intensidade da radiação solar, a eficiência dos painéis e as condições ambientais locais

**Figura 15 - Esquemática de um Projeto para Baterias Gravitacionais Integradas com Energia Fotovoltaica**



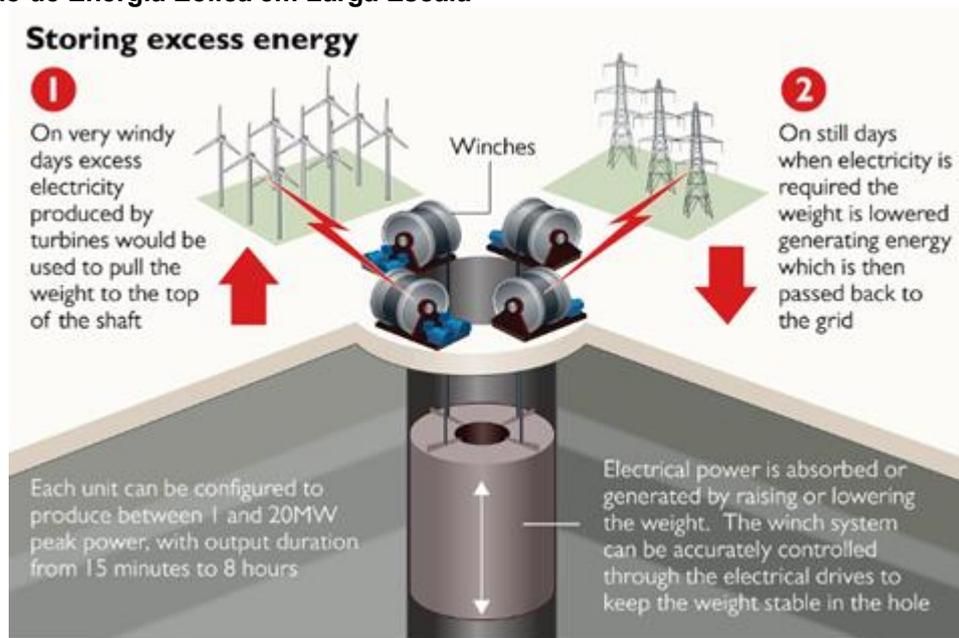
Fonte: (WORDPRESS, 2015)

#### 4.3.2 Projetos de Armazenamento de Energia Eólica

No domínio do armazenamento de energia, os projetos eólicos representam uma área de interesse crescente, especialmente devido aos desafios inerentes à variabilidade e capacidade de armazenamento desta forma de energia. A energia eólica, apesar de ser uma fonte renovável inesgotável e de alto potencial, enfrenta desafios significativos devido à sua natureza intermitente e à imprevisibilidade sazonal, o que pode comprometer a continuidade do fornecimento de eletricidade. Neste contexto, a integração de sistemas de armazenamento gravitacional em projetos eólicos emerge como uma solução potencialmente valiosa.

A premissa central deste enfoque é a transformação da energia cinética gerada pelo vento em energia potencial gravitacional. Este processo permite a acumulação e o armazenamento de energia durante períodos de alta produção eólica. Em momentos em que as condições de vento são subótimas e insuficientes para atender à demanda energética, a energia potencial gravitacional armazenada pode ser convertida de volta em eletricidade, contribuindo para a estabilização do fornecimento de energia.

Figura 16 - Representação Esquemática de um Projeto para Baterias Gravitacionais com Aplicação de Energia Eólica em Larga Escala



Fonte:(CAMERON, 2018)

## **5 DESENVOLVIMENTO**

### **5.1 Seleção de um Projeto Solar para Análise Acadêmica com Foco em Armazenamento Gravitacional**

No contexto deste estudo acadêmico, foi selecionado um projeto teórico que envolve a análise de um sistema de energia solar acoplado a um mecanismo de armazenamento elétrico baseado em bateria gravitacional. Esta escolha metodológica permite uma avaliação comparativa entre as características operacionais da bateria gravitacional e as de uma bateria convencional íon de lítio. A análise proposta fundamenta-se em estimativas quantitativas elaboradas pelo pesquisador.

A predileção pelo sistema de energia solar neste estudo decorre da natureza previsível dos ciclos de intermitência solar, que apresentam uma demarcação clara entre os períodos diurnos e noturnos. Esta característica contrasta com a variabilidade mais imprevisível dos ciclos de geração eólica. Adicionalmente, a implementação de painéis solares, que tem experimentado uma adoção crescente em diversas regiões do Brasil, oferece uma plataforma viável para a avaliação rápida e eficaz de parâmetros críticos como desempenho, eficiência energética e taxa de degradação do sistema, em comparação com alternativas baseadas na energia eólica.

Este enfoque no sistema solar, portanto, não apenas alinha-se com as tendências atuais de adoção de energias renováveis, mas também proporciona uma base sólida para a investigação das potencialidades e limitações do armazenamento de energia via baterias gravitacionais, um campo de estudo emergente com implicações significativas para o futuro do armazenamento de energia renovável.

### **5.2 Cálculos e Dimensões**

#### **5.2.1 Análise do Consumo Residencial de Energia Elétrica no Brasil**

De acordo com os dados fornecidos pelo PROCEL/Eletrobrás, o consumo médio de energia mensal em residências brasileiras é quantificado em 152,2 kWh/mês (quilowatt-hora, uma medida de consumo de energia elétrica). A análise das diversas regiões geográficas do país revelou variações notáveis no consumo residencial de energia. A região Sul do Brasil se destacou pelo consumo mais elevado, com médias de 273,1 kWh/mês no verão e 261,3 kWh/mês no inverno. Em contraste, a região

Norte registrou o menor consumo, com médias de 96,5 kWh/mês no verão e 81,0 kWh/mês no inverno. Essa disparidade regional evidencia a influência de fatores climáticos e geográficos na demanda por energia elétrica em residências brasileiras.

Embora haja variações geográficas nesses valores, optaremos por uma estimativa conservadora de 200 kWh/mês como consumo residencial padrão. É fundamental salientar que esses números estão sujeitos a flutuações, dependendo das peculiaridades de cada cenário e dos padrões de consumo específicos.

Através da divisão dessa estimativa pelo número médio de dias em um mês (30), obtemos um consumo diário de aproximadamente 6,6 kWh. Por questões de segurança e para acomodar possíveis momentos de consumo imprevistos, será aproximado esse valor para 7 kWh por dia, o equivalente a 0,30 kW por hora

**Tabela 1 - Estimativa de Consumo Energético Médio Diário em Residências**

<i>E /dia</i>	-7 kWh
---------------	--------

Fonte: (Autor)

#### 5.2.1.1 Análise da Eficiência de Placas Solares em Ciclos Diurnos e Noturnos

Estas desempenham um papel fundamental na demonstração prática do conceito de armazenamento de energia durante as horas diurnas e sua subsequente utilização durante a noite. O projeto objetiva simular e analisar os ciclos de excesso e escassez de energia inerentes às fontes renováveis, bem como a efetiva geração de eletricidade por meio desse processo.

Conforme dados do SOLAR (2019), a região de Toledo, localizada no oeste do Paraná, apresenta uma média anual de 1,825 kWh por metro quadrado. Isso implica em uma média mensal de 152 kWh por metro quadrado, desconsiderando os efeitos dos solstícios. Ao dividirmos essa média mensal pelo número de dias, podemos deduzir que a irradiação solar de 1 metro quadrado tem a capacidade de gerar 5 kWh em um dia.

A equação da radiação solar mensal apresenta como:

$$R_s = R_s' \cdot DM$$

- $R_s$  = Radiação solar mensal (kWh m<sup>2</sup> mês<sup>-1</sup>);
- $R_s'$  = Média da radiação solar diária (Wh m<sup>2</sup> dia<sup>-1</sup>);
- $DM$  = Número médio de dias do mês (dias)

Seguindo a fórmula da eficiência das placas solares, observa-se que a eficiência máxima disponível no mercado atinge 22%. Tomaremos esse valor como referência, considerando o cenário ideal (ABDULGAFAR, 2014).

A equação da eficiência de um painel solar apresenta como:

$$Q_t = P_{otf} P_m$$

- $Q_t$  = Quantidade de módulos fotovoltaicos (1);
- $P_{otf}$  = potência máxima (kWp);
- $P_m$  = Potência do módulo fotovoltaico (kWp).

Em relação a 1 metro quadrado de placa, atingindo a eficiência máxima de 22%, podemos projetar uma produção diária estimada de cerca de 1 kWh ao longo do dia, equivalente a 0,04 kW por hora. No entanto, é fundamental ressaltar que a irradiação solar não é uniforme ao longo do período diurno.

#### 5.2.1.2 Sincronização da Geração Fotovoltaica com o Padrão de Consumo Residencial

É fundamental salientar que, como previamente destacado, um metro quadrado de painel solar opera durante o período de maior incidência solar, que varia de 6 a 8 horas. Conseqüentemente, a produção de 1 kWh ocorrerá, em média, ao longo de aproximadamente 7 horas, compreendendo o intervalo das 9 às 16 horas, desconsiderando variações de intensidade solar associadas a solstícios. Nesse

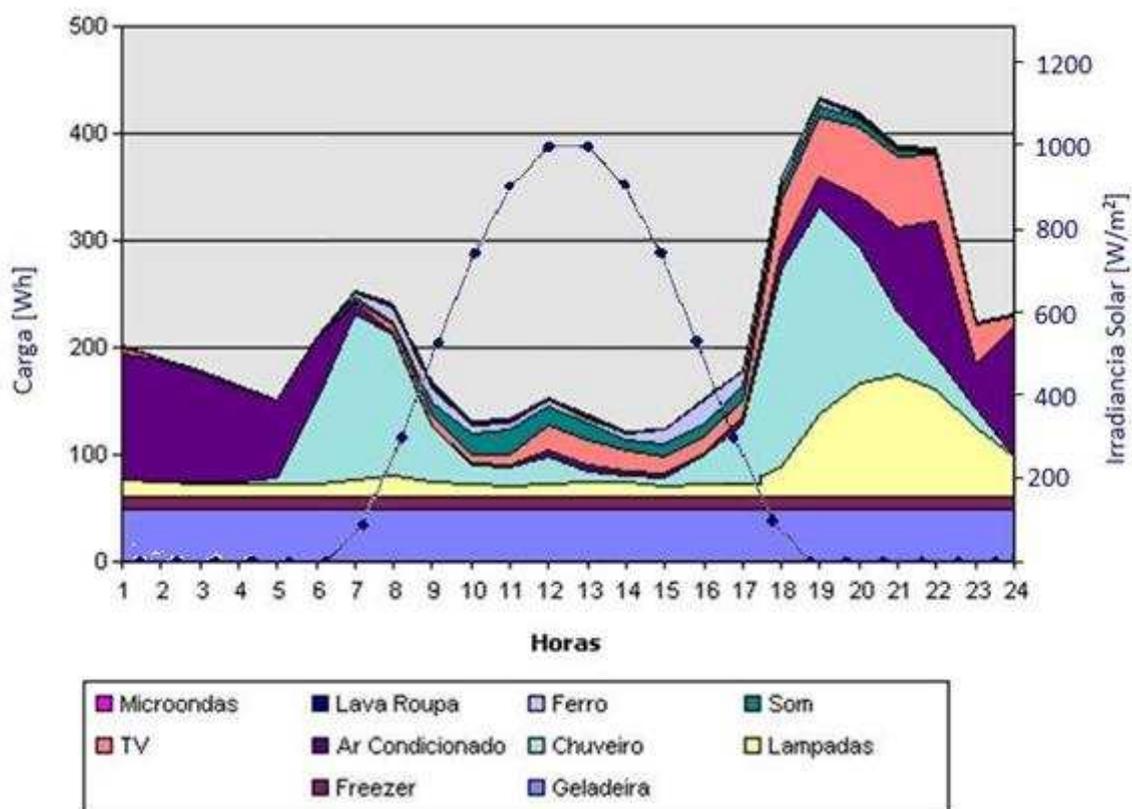
contexto, pode-se afirmar que 1 metro quadrado de painel gera aproximadamente 0,142 kW por hora durante esse intervalo.

**Tabela 2 - Geração Fotovoltaica Média por Hora Durante o Período Solar Útil**

$E \text{ m}^2/\text{dia (9-16)}$	$E \text{ m}^2/\text{hora}$
1kWh	0,142 kW

Fonte: (Autor)

**Figura 17 - Análise Comparativa entre a Curva de Carga do Consumo Residencial Médio no Brasil e o Potencial de Geração Distribuída Solar**



(JANNUZZI, 2018)

Com base na figura 17, constata-se que o período efetivo de irradiação solar coincide com um momento em que o consumo residencial de eletricidade tende a ser menos expressivo devido às atividades diurnas, como trabalho, entre outras.

Ao longo de um período médio de 7 horas de incidência solar, conforme a projeção, um painel solar gerará 1 kWh. Considerando o consumo diário de uma residência estimado em 7 kWh, ao desmembrar essa quantidade por hora, obtém-se uma taxa de consumo de 0,30 kWh por hora. No entanto, a análise do gráfico revela que essa demanda não se distribui uniformemente ao longo das horas do dia.

Isso implica que a demanda energética será mais acentuada durante as horas noturnas, como demonstrado na figura 17, no gráfico diário de consumo elétrico. Pode-se observar que as horas de maior incidência solar ocorrem ao longo de um período de 7 horas, das 9h00 às 16h00, como evidenciado.

Conseqüentemente, a capacidade de armazenar essa energia para utilização posterior se revela vantajosa, uma vez que se alinha com os picos de demanda energética previstos para a residência, os quais ocorrem em alta durante a ausência de irradiação solar e diminuem durante os períodos de exposição à luz solar.

### 5.2.2 Distribuição Temporal do Consumo Residencial de Energia

De acordo com a figura 17, é possível estimar uma tabela de consumo diária de energia elétrica para uma residência média brasileira.

**Tabela 3 Distribuição do Consumo Energético em kW Durante as Horas do Dia**

Horas (h)	Consumo (kW)
1	0,200
2	0,190
3	0,180
4	0,160
5	0,150
6	0,200
7	0,250
8	0,230
9	0,200
10	0,130
11	0,130
12	0,150
13	0,140
14	0,120
15	0,125
16	0,150
17	0,170
18	0,350
19	0,430
20	0,415
21	0,380
22	0,380

23	0,220
24	0,260
<b>Consumo total diário</b>	<b>5,310 kWh</b>

**Fonte: (Autor)**

É factível afirmar que o valor médio de consumo, conforme representado na figura 17, equivale a 5,310 kWh, uma estimativa próxima ao consumo médio reportado pela PROCEL/Eletróbrás, 2005.

Durante o intervalo compreendido entre as 9 e 16 horas, o consumo residencial totaliza 1,145 kWh, equivalente a uma taxa de 0,16 kW por hora. Isso deixa o remanescente de 4,165 kWh para o consumo restante da residência.

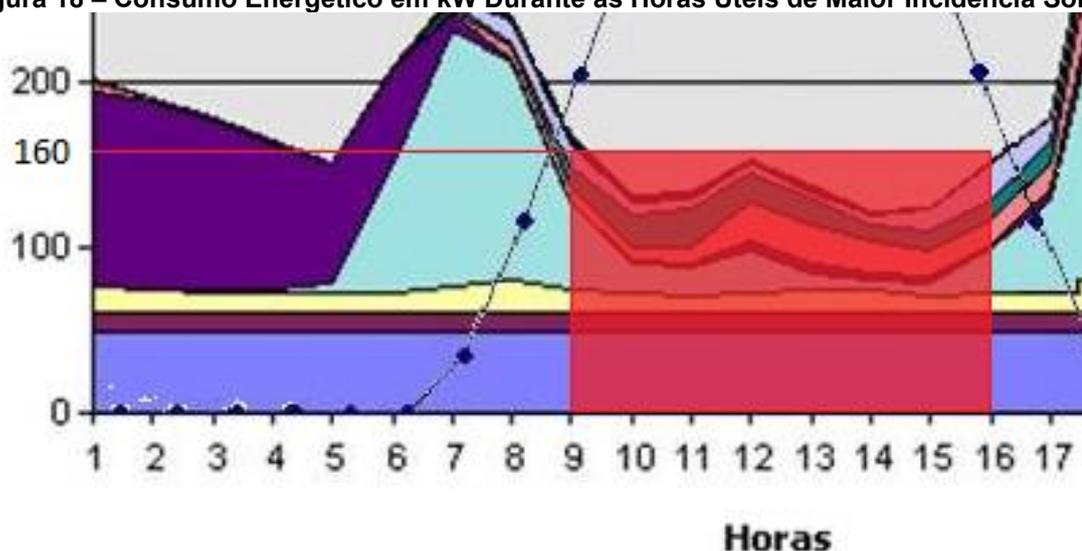
**Tabela 4 – Consumo energético kW durante as horas uteis de maior incidência solar**

<b>Horas (h)</b>	<b>Consumo (kW)</b>
9	0,200
10	0,130
11	0,130
12	0,150
13	0,140
14	0,120
15	0,125
16	0,150
<b>Consumo total em relação ao tempo</b>	<b>1,145kWh</b>

**Fonte: (Autor)**

Essa constatação se respalda mediante a análise da figura 18, como explicitado na aproximação da figura 17

**Figura 18 – Consumo Energético em kW Durante as Horas Úteis de Maior Incidência Solar**



Fonte: (JANNUZZI, 2018)

**Tabela 5 - Análise Comparativa do Consumo Elétrico Residencial em Diferentes Momentos do Dia**

Consumo Diurno	Consumo Noturno	Consumo Total
-1,145 kWh	-4,165 kWh	-5,310 kWh

Fonte: (Autor)

Dado que o consumo diário previsto de 7 kWh para a habitação selecionada excede ligeiramente a média diária das atividades cotidianas no Brasil, é apropriado utilizar os valores apresentados na tabela para estimar o consumo na faixa de 7 kWh.

Ao empregar um cálculo de proporção direta, verificamos que em uma residência com consumo diário de 7 kWh, 1,51 kWh são consumidos das 9 às 16 horas, enquanto os restantes 5,49 kWh são utilizados durante o restante do dia.

**Tabela 6 - Análise Comparativa do Consumo Elétrico Residencial com Proporção Direta para 7kWh**

Consumo Diurno	Consumo Noturno	Consumo Total
-1,51 kWh	-5,49 kWh	-7 kWh

Fonte: (Autor)

5.2.3 Estimando a área de captação e armazenamento da energia solar em sistema fechado:

Com base nos cálculos realizados, 1 metro quadrado de painel solar demonstrou a capacidade de gerar 1 kWh diário, equivalente a uma taxa de 0,14 kW por hora, dentro do período efetivo de exposição solar. Em contrapartida, a hipótese

de um consumo diário de 7 kWh. para uma residência, isso implica que uma área mínima de 7 metros quadrados de painéis solares é necessária para atender às exigências energéticas residenciais.

O propósito central do estudo é direcionado para a capacidade de armazenamento de energia, considerando cenários desafiadores, tais como picos de demanda, condições climáticas desfavoráveis, uso intensivo e outros fatores adversos. Com base em uma premissa conservadora e abrangente, a capacidade teórica da bateria no caso é estimada em 10 quilowatt-hora (kWh). Essa estimativa visa assegurar um armazenamento robusto e confiável.

**Tabela 7 - Definição da Capacidade Teórica de Armazenamento Gravitacional**

<i>EPG</i>	10 kWh
------------	--------

Fonte: (Própria)

#### 5.2.4 Armazenamento para um sistema elétrico fechado autossustentável

Um sistema elétrico fechado representa um conjunto intrinsecamente autônomo, que dispensa a necessidade de energia elétrica externa, visto que é capaz de gerar e utilizar sua própria energia, mantendo seu funcionamento de modo independente.

Cumprir destacar que a grande maioria, praticamente a totalidade dos sistemas elétricos residenciais, repousa sobre um suprimento contínuo de energia proveniente de redes externas. A presente proposta se configura como uma prova de conceito e, por sua vez, ilustra que tais sistemas fechados podem ser encontrados em contextos específicos. Estes contextos englobam, por exemplo, propriedades rurais isoladas, moradias em regiões ribeirinhas, comunidades remotas, que possam estar localizadas em desertos, regiões polares ou ilhas, ou ainda em áreas de difícil acesso à infraestrutura de rede elétrica convencional.

#### 5.2.5 Análise da Eficiência de Captação e Armazenamento de Energia em Sistemas Fotovoltaicos Residencial

Para armazenar 10 kWh, é preciso estabelecer teoricamente um sistema fechado, para fins de estudo, sem acesso à energia elétrica por rede de abastecimento. Nessa situação, para armazenagem de energia, será necessário

estabelecer a energia que a placa gera, subtraído da energia consumida no mesmo período de coleta solar.

A Equação do Potência fotovoltaica se apresenta como:

$$E = E_p - E$$

- $E$  – Diferença de energia gerada e consumida (kWh);
- $E_p$  – Potência fotovoltaica (kWh);
- $E$  – Consumo Residencial de Energia (kWh).

Baseado nos parâmetros estabelecidos, é factível argumentar que durante o intervalo efetivo de exposição à radiação solar, a residência consome 1,51 kWh para atender às suas necessidades energéticas, o que demanda um mínimo de 1,5 m<sup>2</sup> de área de captação de energia solar para a manutenção do consumo durante as horas de luz solar. No entanto, dado que a finalidade fundamental do sistema é a acumulação de energia, durante esse mesmo período, a geração de 1 kWh por 1 m<sup>2</sup> de placa solar pressupõe a necessidade de um excedente de energia para a recarga da bateria proposta.

Para atender integralmente à demanda residencial estimada, que corresponde a 7 kWh durante um ciclo completo de dia, seriam necessários 7 m<sup>2</sup> de painéis solares, presumindo condições ideais e uma geração constante de energia. Estes 7 m<sup>2</sup> teriam a capacidade de gerar 7 kWh, o suficiente para suprir o consumo diurno de 1,51 kWh. Isso implica que, durante o período de incidência solar, em que a geração e o consumo de energia coincidem, restariam 5,49 kWh disponíveis para utilização até o próximo ciclo solar.

#### 5.2.5.1 Dimensionamento e Eficiência de Painéis Fotovoltaicos para Armazenamento Energético em Sistemas Residenciais Isolados

Com a finalidade de armazenar energia em um sistema elétrico fechado, independente de uma rede externa de fornecimento de energia, será necessário empregar uma área de 10 m<sup>2</sup> de painéis solares. Esta superfície produzirá uma

quantidade de 8,49 kWh de energia durante o período efetivo de incidência solar, após descontar o consumo no mesmo intervalo de tempo.

**Tabela 8 - Estimativa Teórica de acúmulo diário para Armazenamento Gravitacional**

<b>Area painéis</b>	<b>Geração área completa</b>	<b>Consumo residencial durante o período de geração</b>	<b>Energia acumulada durante o dia</b>
10 m <sup>2</sup>	10kWh	-1,51kWh	8,49kWh

**Fonte: (Própria)**

A energia gerada será armazenada em uma bateria projetada com uma capacidade estimada de 10 kWh. Durante o período noturno, quando a demanda residencial é de 5,49 kWh, restarão 3 kWh disponíveis para armazenamento de segurança, a fim de atender a possíveis situações de contingência e excedentes de consumo.

**Tabela 9 - Estimativa Teórica de Carregamento para Armazenamento Gravitacional**

<b>Energia gerada durante o dia</b>	<b>Consumo Noturno</b>	<b>Energia acumulada</b>
8,49kWh	-5,49 kWh	3 kWh

**Fonte: (Própria)**

Um painel fotovoltaico disponível no mercado, como o modelo Half-Cel de 550W, com uma eficiência de aproximadamente 22%, possui dimensões de cerca de 1,14 m x 2,28 m, totalizando uma área de aproximadamente 2,6 m<sup>2</sup>. Isso resulta em uma geração de potência máxima de 550W, equivalente a 0,55 kWh em uma hora de operação. Portanto, a geração média é de aproximadamente 0,212 kWh por hora em 1 m<sup>2</sup>, ou teoricamente 1,48 kWh por m<sup>2</sup> durante o período de máxima incidência solar suportado pela placa.

No entanto, como mencionado anteriormente, uma análise da figura 17 revela que o período de máxima incidência solar não é constante e atinge seu pico próximo ao meio-dia. Consequentemente, a placa não mantém uma geração constante de 550W e, portanto, uma estimativa conservadora seria de 1 kWh por m<sup>2</sup> por dia.

Com base no cálculo da geração de energia teórica de 1 kWh por m<sup>2</sup> de placa solar, é necessário um total de 10 m<sup>2</sup> de painéis solares para atender a essa demanda. Considerando que os painéis solares Half-Cel possuem uma área de 2,6 m<sup>2</sup> cada, podemos utilizar 4 desses painéis, cada um gerando 2,6 kWh por dia. Coletivamente,

durante o período de máxima incidência solar, eles produzirão 10 kWh, enquanto a residência consumirá 1,51 kWh durante esse período. Isso resulta em um excedente de 8,49 kWh disponíveis para armazenamento noturno, sendo que a residência consumirá 5,49 kWh durante a noite.

#### 5.2.6 Desenvolvimento e Dimensionamento de Baterias Gravitacionais para Armazenamento de Energia em Sistemas Autônomos

Para desenvolver uma bateria gravitacional, é imperativo conceber a edificação de um poço de profundidade específica, resultando em um deslocamento total do pistão relacionado à massa selecionada e à quantidade de energia a ser armazenada.

A equação da energia potencial gravitacional se apresenta como:

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h$$

- $E_{pg}$  – Energia potencial gravitacional (J);
- $m$  – Massa (kg);
- $g$  – Aceleração gravitacional (9,8 m/s<sup>2</sup>);
- $h$  – Altura (m).

A abordagem mais eficiente consiste em empregar um sistema de poço, que neutraliza a influência da variação do vento, evitando oscilações indesejadas no peso, como poderia ocorrer em uma torre, o que poderia prejudicar o desempenho do sistema.

A bateria gravitacional necessita de uma capacidade de armazenamento de 10 kWh, conforme estipulado previamente, visando garantir um funcionamento contínuo e seguro. Isso representa um equivalente energético de 36.000 kJ. Para determinar a profundidade ideal do poço, é necessário realizar uma estimativa da massa a ser utilizada.

### 5.2.7 Seleção e Caracterização de Materiais para Lastro em Baterias Gravitacionais: Análise de Densidade e Aplicações Práticas

No mercado, existem diversos materiais disponíveis para o uso como lastro, cada um com densidades distintas. A preferência recai sobre materiais de alta densidade, visto que ocupam menos espaço durante a escavação do solo durante a construção do poço. Isso pode ser avaliado por meio de uma comparação das densidades desses materiais.

A equação da densidade dos materiais se apresenta como:

$$\rho = m/V$$

- $\rho$  – Densidade (kg/m<sup>3</sup>)
- $m$  – massa (kg)
- $V$  – Volume (m<sup>3</sup>)

**Tabela 10 - Densidades Específicas de Materiais Candidatos para Construção de Lastro em Projetos de Baterias Gravitacionais**

<b>Materiais</b>	<b>Densidade [kg/m<sup>3</sup>]</b>
Água	1.000
Cimento	1.400
Arenito	2.220
Mármore	2.600
Aço	7.800
Bronze	8.730
Chumbo	11.300
Uranio (empobrecido)	19.050
tungstênio	19.250

**Fonte: (Autor)**

Dado que uma densidade mais elevada está correlacionada com um menor volume, a opção ideal seria a utilização de materiais de alta densidade, como urânio empobrecido ou tungstênio.

O urânio empobrecido, caracterizado por seu baixo teor de urânio-235, é derivado do resíduo nuclear e possui uma baixa taxa de radiação. O urânio natural encontrado na natureza normalmente contém cerca de 0,7% de urânio-235, o isótopo

radioativo, enquanto o urânio empobrecido contém menos de 0,3% e, portanto, é inadequado para uso em usinas de geração de energia.

Contudo, sua aplicação é predominante na fabricação de projéteis para armamento pesado, devido à sua densidade elevada e à capacidade de transferir considerável energia ao alvo. Sua densidade compacta permite exercer maior pressão, facilitando a penetração em alvos blindados.

Conforme o U.S. Department of Energy (2021), o custo do Urânio Empobrecido é de 2,98 dólares para um lote de 75 gramas, equivalendo a aproximadamente 0,42 dólares por grama, ou, na taxa de câmbio atual, cerca de 2,12 reais por grama.

**Figura 19 - Análise do Preço Médio do Urânio Empobrecido**

			
CRM ID	Description (nominal values)	Size/Unit	Price
C115 (75g)	Uranium (Depleted) Metal (0.99977 g U/g) 75 g*	75 g U	\$2,980

**Fonte (US, 2021)**

Entretanto, o Urânio Empobrecido, apesar de apresentar baixa radiação, continua emitindo quantidades mínimas de radiação ionizante. Portanto, a aplicação prática desse material requer o desenvolvimento de um sistema de isolamento para o lastro. Além disso, sua utilização não se mostra viável em pequenos projetos, sendo mais apropriada para considerações teóricas e projetos futuros de maior envergadura.

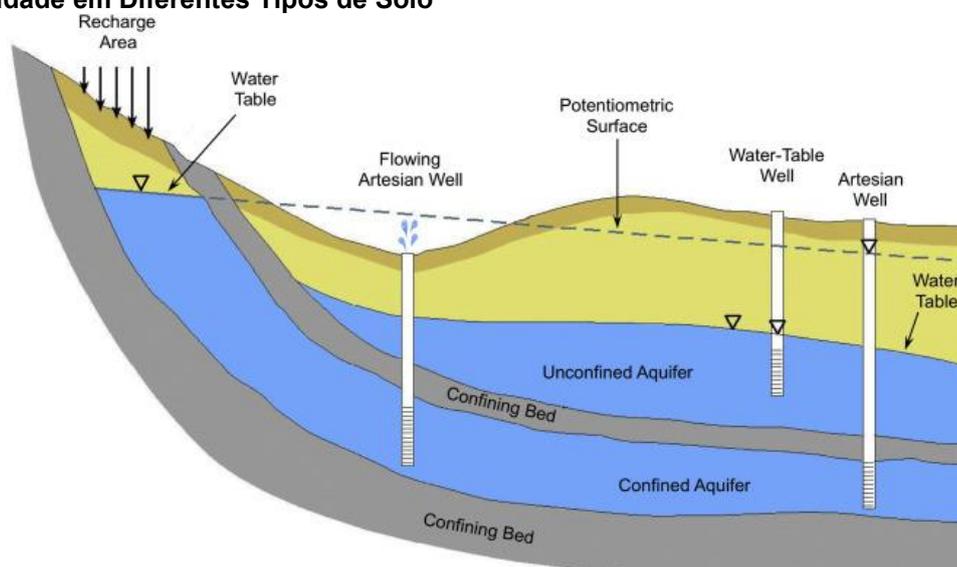
O material mais apropriado para a condução deste estudo será o aço. Materiais com densidade inferior ao aço apresentam volumes substanciais, resultando em maior quantidade de material necessário e na eventual necessidade de perfuração de um poço de maior largura. Devido ao volume maior, o diâmetro de um potencial cilindro de lastro seria ampliado, exigindo a perfuração de poços mais largos em comparação com materiais mais densos. Além disso, materiais mais densos frequentemente possuem custo por quilograma superior ao do aço. O aço destaca-se como um material amplamente utilizado como lastro em diversas aplicações devido à sua disponibilidade e características. Possui resistência a tensões, alta tenacidade, não se rompendo sob forças ascendentes ou descendentes. Adicionalmente, a corrosão do aço em contato com o oxigênio pode ser facilmente prevenida por meio

de revestimentos como tintas e vernizes. Utilizar aço reciclado ou proveniente de sucata, destinado apenas para função de peso, pode resultar em custos mais econômicos na fabricação de grandes lastros em comparação com materiais mais densos e dispendiosos.

#### 5.2.8 Estimativa de Profundidade de Poço para Projetos de Armazenamento Gravitacional: Considerações Hidrogeológicas e Mecânicas

Para calcular a massa requerida para o projeto, o primeiro passo envolve a estimativa da profundidade do poço escavado. Esta profundidade pode ser aproximada com base na profundidade típica para atingir o lençol freático, levando em consideração que a presença de água não é benéfica para este estudo, uma vez que o poço não pode estar localizado em uma área suscetível a inundações ou infiltrações, o que prejudicaria a movimentação do peso.

**Figura 20 - Análise Hidrogeológica de Poços Artesianos: Variação de Níveis de Água e Profundidade em Diferentes Tipos de Solo**



Fonte: (ROUMASSET, 2013)

#### 5.2.8.1 Dimensionamento e Análise de Poços para Armazenamento de Energia Gravitacional: Profundidades e Estratégias de Implementação

Os poços de maior profundidade, denominados poços artesianos, exibem variações que abrangem entre 60 e 200 metros de profundidade, com uma média aproximada de 150 metros. Esses poços são caracterizados por um revestimento

tubular. Em contraste, em poços escavados convencionais, a água pode ser encontrada mais próximo da superfície, tipicamente entre 25 e 30 metros, e não possuem revestimento lateral. (HIRATA, 2019).

**Figura 21 - Estratégias de Revestimento para Poços Artesianos**



**Fonte: (MANDAGUAI,2015)**

A profundidade apropriada dependerá da análise do solo, uma vez que solos característicos de cerrados e regiões mais áridas geralmente apresentam o lençol freático em camadas mais profundas. Por outro lado, em áreas com solos propensos a mananciais, próximos a rios e com elevada precipitação pluviométrica, a água pode ser encontrada nos primeiros metros, refletindo a considerável variabilidade do solo brasileiro.

É evidente que, com os avanços tecnológicos na construção de poços artesianos, é possível perfurar poços com profundidades superiores a 250 metros. No entanto, nesses casos, é necessário aplicar medidas de isolamento, frequentemente por meio de tubulações de aço, a fim de prevenir a infiltração de água. Vale ressaltar que a disponibilidade de água pode variar consideravelmente, dependendo das características do solo; em algumas situações, água pode ser encontrada a apenas alguns metros de profundidade, enquanto em outras, pode ser necessário cavar significativamente mais fundo antes de encontrá-la.

Para fins de comparação teórica, a suposição ideal para este experimento seria considerar um poço com uma profundidade de 50 metros. Caso a profundidade real do poço não atinja os 50 metros devido a fatores anteriores mencionados, como

a presença de lençóis freáticos, uma estrutura auxiliar, como uma pequena torre, poderia ser adicionada para alcançar a distância desejada de 50 metros.

Com 50 metros para trabalhar a subida e descida do peso, temos então:

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h$$

$E_{pg}$  – Energia potencial gravitacional 10kWh, ou 36000 kJ,

- $m$  – Massa? (kg);
- $g$  – Aceleração gravitacional (9,8 m/s<sup>2</sup>);
- $h$  – Altura 50 (m).

Nessa estimativa, em que  $3,6 \times 10^7$  joules são necessários, aplicando a equação para calcular a massa requerida para realizar esse trabalho em joules, obtém-se o valor de 73.469 kg. Essa quantidade de massa é comparável a de um caminhão bitrem de 9 eixos, e vale ressaltar que essa estimativa não incluiu as possíveis perdas de eficiência.

Uma abordagem alternativa para reduzir a massa do lastro envolve o aumento da distância de trabalho para içar o peso, o que pode ser alcançado através do aumento da profundidade do poço ou da altura da torre. Aumentar a profundidade do poço, por exemplo, reduziria a massa do sistema. No entanto, para fins de estimativa, será mantido a profundidade do poço em 50 metros.

#### 5.2.9 Modelagem e Dimensionamento de Cilindros de Lastro em Aço para Armazenamento Energético Gravitacional

A forma mais eficiente de acomodar o lastro de 73.469 kg é utilizar um cilindro feito de aço, considerando que a densidade do aço é de 7800 kg por m<sup>3</sup>. Seria necessário cerca de 9,41 m<sup>3</sup> de lastro.

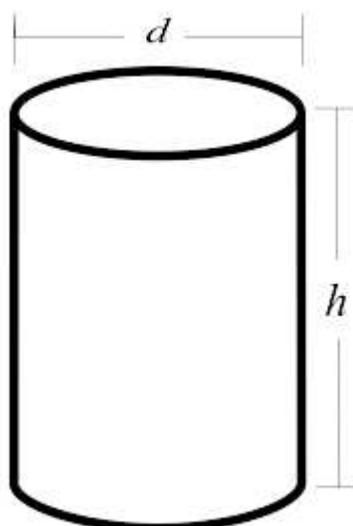
A equação do volume do cilindro se apresenta como:

$$V = \pi r^2 h$$

- $V$  – Volume do cilindro ( $m^3$ );
- $r^2$  – Raio do cilindro (m);
- $h$  – Altura do cilindro (m);
- $\pi$  – (pi).

Ao estimar o diâmetro mínimo viável para a largura do poço, é possível propor a proporção do cilindro de 2/3, com a base menor e mais estreita. Com essa proporção, podemos calcular as dimensões do cilindro, visando evitar que o poço seja excessivamente largo. Realizando os cálculos, obteríamos um cilindro maciço de aço

**Figura 22 - Ilustração Comparativa de Cilindro: Proporção de Diâmetro**



**Fonte (Propria)**

A proporção ideal escolhida do cilindro se apresenta como:

- $d$  - Diâmetro 2/3 da altura  $h$

Com isso é possível obter uma razão direta de raio e altura, de 1/3.

A equação do volume para um cilindro de proporção diâmetro e altura de 2/3 se apresenta como:

$$\frac{r}{h} = \frac{1}{3}$$

- $h$  – Altura do cilindro (m);
- $r$  – Raio do cilindro (m).

A equação para calcular as dimensões da altura e do diâmetro para a proporção 2/3 se apresenta como:

$$V = \pi h^2 \cdot 3$$

$$V = 3\pi r^2 \cdot 3$$

$$d = 2r$$

- $h$  – Altura do cilindro (m);
- $r$  – Raio do cilindro (m);
- $d$  – diâmetro do cilindro (m).

Proporção 2/3 cilindros metálico de lastro para 10kWh de acúmulo gravitacional:

**Tabela 11 - Dimensões de Diâmetro e Altura de um Cilindro com Proporção 2/3 Pesando 73.469 kg**

<b>Materiais</b>	<b>Volume (m³)</b>	<b>Diâmetro do cilindro (m)</b>	<b>Altura do cilindro (m)</b>
Água	73,459	5,58	8,37
Cimento	52,470	4,70	7,09
Arenito	33,089	3,74	5,62
Mármore	28.253	3,46	5,19
<b>Aço</b>	<b>9,417</b>	<b>2,00</b>	<b>3,00</b>
Bronze	8,414	1,88	2,83
Chumbo	6.500	1,66	2,49
Uranio	3.856	1,26	1,91
tungstênio	3.810	1,26	1,90

**Fonte: (Autor)**

Essa análise demonstra uma considerável redução no uso de material quando se utiliza um material de alta densidade. Além disso, a espessura do poço escavado diminui consideravelmente à medida que o material se torna mais denso, resultando em economias significativas de material e estrutura.

#### 5.2.10 Dimensionamento e Seleção de Cabos de Aço para Sistemas de Armazenamento Energético Gravitacional: Análise de Resistência e Fatores de Segurança

O cabo utilizado deve ser altamente resistente e possuir a capacidade de enrolamento, não apenas para resistir à elevada pressão exercida pelo lastro, mas também para suportar as forças de tensão durante o processo de içamento e descida do peso, que envolvem paradas e liberações abruptas do lastro.

A equação da tensão do cabo para suportar a massa se apresenta como:

$$T = m \cdot g$$

- $T$  – Força de tensão ou tração (N);
- $m$  – Massa (kg);
- $g$  – Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

A tensão considerada no projeto é calculada a partir da massa do lastro e da aceleração gravitacional atuando sobre essa massa, resultando na força peso. Portanto, a tensão necessária é de 720,73 kN para sustentar uma massa de 73 469 kg.

Contudo, é crucial destacar que o cabo experimenta breves acelerações durante o início do movimento, ao ser içado, e nas frenagens durante o processo de descida. Essas oscilações momentâneas geram uma carga adicional sobre o cabo, somando-se aos 9,8 m/s<sup>2</sup> da aceleração devido à gravidade, especialmente durante as fases de subida e frenagem.

A equação da tensão do cabo incluindo aceleração se apresenta como:

$$T = m \cdot (g + a)$$

- $T$  – força de tensão ou tração (N);

- $m$  – massa (kg);
- $g$  – Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);
- $a$  – Aceleração de frenagem ou aceleração de içamento (m/s<sup>2</sup>).

Essas acelerações e desacelerações, as quais incrementam a tensão no cabo, já são contempladas no fator de segurança. A resistência dos cabos é representada pela carga mínima de ruptura, que denota o limite máximo que um cabo pode suportar antes de se romper.

Conforme as tabelas disponibilizadas pela IPH (2016), uma empresa especializada em cabos de aço de alta resistência para aplicações de içamento, é viável examinar a carga mínima de ruptura, expressa em kN (quilonewtons), em relação ao diâmetro variável do cabo em milímetros e aos diferentes tipos de aço utilizados.

**Figura 23 - Estrutura Interna de Cabos de Aço da Empresa IPH**

## CABOS DE 6 PERNAS



Fonte:(IPH, 2016)

**Figura 24 – Relação de Diâmetros e Resistências de Cabos de Aço Conforme Divulgado pela Empresa IPH**

Diâmetro	AFS		Carga mínima de ruptura				AAC		Carga mínima de ruptura			
	Massa aprox.	[kg/m]	Grau 1770		Grau 1960		Massa aprox.	Grau 1770		Grau 1960		
			[kN]	[t]	[kN]	[t]		[kN]	[t]	[kN]	[t]	
6,30	0,14	20,7	2,1	-	-	-	-	-	-	-	-	
8,00	0,24	33,4	3,4	-	-	-	-	-	-	-	-	
9,00	0,30	47,3	4,8	52,4	5,3	0,33	51,0	5,2	56,5	5,8	-	
9,50	0,33	52,7	5,4	58,4	6,0	0,36	56,8	5,8	63,0	6,4	-	
11,00	0,44	70,7	7,2	78,3	8,0	0,50	76,2	7,8	84,4	8,6	-	
13,00	0,62	98,7	10,1	109	11,1	0,69	106	10,8	118	12,0	-	
14,00	0,72	114	11,6	127	13,0	0,80	124	12,7	137	14,0	-	
16,00	0,94	150	15,3	166	16,9	1,05	161	16,4	179	18,3	-	
19,00	1,32	211	21,5	233	23,8	1,48	227	23,2	252	25,7	-	
22,00	1,78	283	28,9	313	31,9	1,98	305	31,1	338	34,5	-	
26,00	2,48	395	40,3	437	44,6	2,76	426	43,5	472	48,2	-	
28,00	2,88	458	46,7	507	51,7	3,21	494	50,4	547	55,8	-	
32,00	3,76	598	61,0	662	67,6	4,19	645	65,8	715	73,0	-	
35,00	4,50	716	73,1	792	80,8	5,01	772	78,8	855	87,2	-	
38,00	5,30	843	86,0	934	95,3	5,91	910	92,9	1010	103	-	
44,00	7,11	1130	115	1250	128	7,92	1220	124	1350	138	-	
51,00	9,55	1520	155	1680	171	10,60	1640	167	1810	185	-	

Construção AFS: Ø Até 8.00 mm inclusive 6x37 M. Maiores de 8.00 mm: 6x31, 6x36 e 6x41 Warrington Seale, segundo o diâmetro e o grau. Construções AACI mais comuns segundo o grau e o diâmetro: 6x31 Warrington Seale, 6x36 Warrington Seale, 6x41 Warrington Seale. Acabamento: polido (galvanizado sob encomenda). Norma de fabricação: ABNT/ ISO 2408.

Consulte a IPH por diâmetros e resistências não especificados no catálogo.

**Fonte:(IPH, 2016)**

Ao analisar a carga mínima de ruptura, constata-se que um cabo de aço com um diâmetro de aproximadamente 32 a 38 mm seria o ideal para suportar uma força média de 719,99 kN.

No entanto, ao realizar uma avaliação para o içamento de cargas, é imperativo estabelecer um fator de segurança substancial. A carga mínima para rompimento não deve se aproximar da carga do peso a ser içado, pois isso pode resultar em risco de falha na estrutura. Portanto, emprega-se o conceito de fator de segurança:

De acordo com as diretrizes da ABNT-NBR ISO 4309 - Guindastes - Cabo de Aço - Critérios de Inspeção e Descarte, que é uma norma brasileira voltada para garantir a segurança na utilização de cabos de aço, é estabelecido que um cabo de aço deve possuir um fator de segurança mínimo de 6, conforme explicitado para guindastes estacionários, que possivelmente se encaixa na proposta do projeto. A equação do fator de segurança pela tensão de ruptura se apresenta como:

$$FS = \sigma_{rup} / \sigma_{adm}$$

- $FS$  – fator de segurança;
- $\sigma_{rup}$  – tensão de ruptura (N);
- $\sigma_{adm}$  – tensão admitida (N).

Para cabos de guinchos, para erguer pesos em 90 graus o fator de segurança é 6

**Figura 25 - Classificação dos Fatores de Segurança para Cabos de Aço**

<b>Tipos de serviços x Fator de segurança</b>	
<b>Aplicações</b>	<b>Fator de segurança</b>
Cabos estáticos	3 a 4
Cabo para tração no sentido horizontal	4 a 5
Guinchos, guindastes, escavadeiras	5
Pontes rolantes	6 a 8
Talhas elétricas e outras	7
Guindastes estacionários	6 a 8
Lingas de cabo de aço	5 a 6
Elevadores de obra	8 a 10
Elevadores de passageiro	12

Fonte: (JCL, 2023)

Dado que a estrutura está situada abaixo do solo e considerando a tensão admissível no projeto como 719,99 kN, o uso de um guincho com um fator de segurança de 6 é mais do que adequado. Isso resulta em uma tensão de ruptura de 4324,38 kN.

**Figura 26 – Relação de Diâmetros e Resistências de Cabos de Aço Conforme Divulgado pela Empresa IPH**

Diâmetro		Massa aprox. [kg/m]	Carga mínima de ruptura	
[mm]	[poleg]		[kN]	[tn]
50,8	2	11,0	1760	180
54,0	2 1/8	12,4	1970	201
57,2	2 1/4	13,9	2200	224
60,3	2 3/8	15,5	2440	249
63,5	2 1/2	17,3	2950	301
69,9	2 3/4	20,8	3530	360
76,2	3	24,7	4160	424
82,6	3 1/4	29,0	4830	493
85,7	3 3/8	31,3	5180	529
88,9	3 1/2	33,8	5520	563
102	4	44,0	6340	647

Construção: 6x36, 6x41, 6x61 ou 6x69 Warrington Seale, segundo o grau e o diâmetro.

Acabamento: polido o galvanizado (classe B).

Norma de fabricação: API 9A/ ISO 10425.

Consulte a IPH por diâmetros e resistências não especificados no catálogo.

**Fonte:(IPH, 2016)**

Para garantir a segurança deste projeto, recomenda-se a utilização de um cabo de aço de alta resistência com um diâmetro variando entre 76,2 mm a 82,6 mm, de acordo com as diretrizes de segurança e os dados observados na figura 26.

#### 5.2.11 Dimensionamento e Análise de Resistência de Carretel de Enrolamento para Sistemas de Içamento em Baterias Gravitacionais

O carretel, um dispositivo cilíndrico utilizado para enrolar cabos, fios ou cordas, apresenta características geométricas específicas, como a altura e a circunferência. O cabo, por sua vez, possui um diâmetro definido, que influencia diretamente a quantidade de cabo que pode ser enrolada no carretel.

**Fotografia 2 - Conjunto de Polias, Carretel e Cabos de Aço em Operação de Guindaste**

Fonte:(DREAMSTIME, 2023)

Para dimensionar um tambor de enrolamento capaz de acomodar o cabo ao ser içado. Esse tambor deve apresentar resistência suficiente para suportar o peso do cabo e a pressão exercida por ele, além de possuir o espaço adequado para armazenar o cabo quando enrolado. É importante lembrar que o cabo selecionado tem uma densidade que varia de 24,7 a 29 kg por milímetro. Portanto, para um cabo com cerca de 50 metros de comprimento e diâmetro de 76,2 mm, teríamos um peso de 1235 kg, enquanto um cabo com diâmetro de 82,6 mm teria um peso de 1450 kg.

**Tabela 12 - Massa do Cabo de Aço em Função do Comprimento do Poço**

Diâmetro (mm)	Massa (50m)
76,2 mm	1235 kg
82,6 mm	1450 kg

Fonte: (Própria)

### 5.2.11.1 Dimensionamento e Análise do Volume de Cabos em Carretéis

A determinação do volume de um cabo enrolado em um carretel, considerando as variáveis de altura e circunferência do carretel, além do diâmetro e comprimento do cabo, exige uma abordagem analítica detalhada. Esta análise envolve a compreensão das inter-relações geométricas entre a altura do carretel e o diâmetro do cabo, assim como a interação entre a circunferência do carretel e o diâmetro do cabo. Estas relações são fundamentais para estabelecer o número de voltas que o cabo realiza ao redor do carretel, influenciando diretamente o cálculo do volume total do cabo enrolado.

A equação para o volume do cabo no carretel apresenta como:

$$V = (H/d) \times (C/d) \times C \times \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

- $V$  – Volume Total do Cabo no Carretel (em metros cúbicos, m<sup>3</sup>);
- $H$  – Altura do Carretel (m);
- $d$  – Diâmetro do Cabo (m);
- $C$  – Circunferência do Carretel (m);
- $\pi$  – (pi).

Na análise de um cabo com extensão de 50 metros e diâmetro de 82,6 mm (equivalente a 0,0826 metros), é imperativo considerar as dimensões do tambor para a adequada acomodação do volume do cabo enrolado. Além disso, o peso do cabo emerge como um fator crítico, influenciando diretamente a resistência estrutural necessária do tambor. Em um cenário hipotético, utilizando um carretel posicionado horizontalmente com 3 metros de altura e 2 metros de circunferência, o volume do cabo enrolado é calculado em aproximadamente 9,42 m<sup>3</sup>, ou 3π metros cúbicos. Considerando o peso do cabo estimado em 1450 kg, a estrutura do carretel deve ser projetada para suportar tal carga.

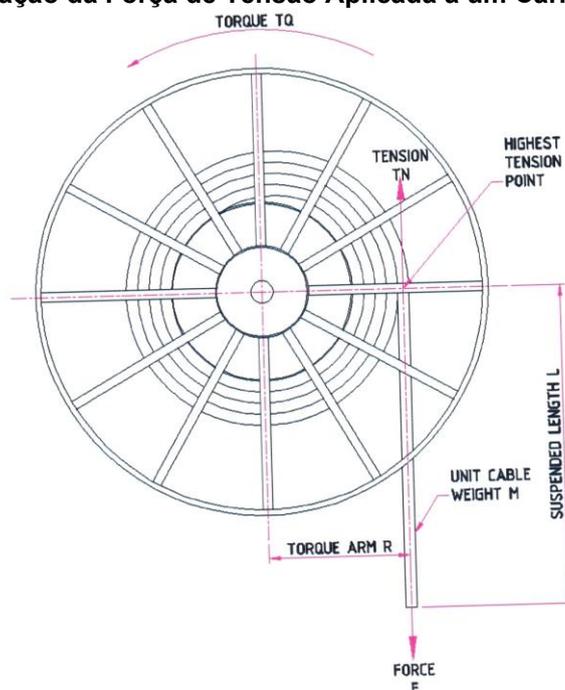
É importante ressaltar que outras configurações de cabos podem ser consideradas para este projeto. Em vez de utilizar um único cabo, é possível empregar vários cabos mais finos, desde que, juntos, proporcionem o mesmo nível de fator de

segurança que o cabo único. Portanto, a possibilidade de utilizar uma configuração com múltiplos cabos devem ser avaliada.

### 5.2.12 Otimização de Conversão de Torque em Sistemas de Geração de Energia Gravitacional: Aplicação de Multiplicadores de Rotação

A descida de uma massa ao longo de uma distância específica induz um movimento rotacional no carretel, atribuível à força de tensão exercida pelo cabo. Este fenômeno de movimento rotacional é caracterizado pela geração de torque, que é a manifestação rotacional da força aplicada.

**Figura 27 - Representação da Força de Tensão Aplicada a um Carretel Gerando Torque**



Fonte: (WORLD CARGO NEWS, 2017)

Em contextos de engenharia mecânica e sistemas que incorporam engrenagens e multiplicadores de rotação, é imperativo considerar as formulações matemáticas fundamentais e as inter-relações entre as variáveis pertinentes. Estas formulações são cruciais para a quantificação precisa de torque e potência, elementos essenciais na análise e no design de tais sistemas mecânicos

A equação do torque da força do cabo no carretel apresenta como:

$$\tau = r \times F \times \sin(\theta)$$

- $\tau$  – Torque, em Newton-metros (Nm);
- $r$  – Raio da a distância do ponto de aplicação da força até o eixo de rotação (m);
- $F$  – Força aplicada, (N);
- $(\theta)$  – Ângulo entre a linha de ação da força e o vetor que vai do ponto de aplicação da força até o eixo de rotação, medido em graus ou radianos.

O torque, neste contexto, é uma função da força tangencial e da distância radial do ponto de aplicação da força em relação ao eixo de rotação. Conseqüentemente, a potência gerada no eixo do carretel é o produto do torque pela velocidade angular. Esta relação é fundamental na mecânica rotacional, onde a potência é uma medida da taxa temporal de realização de trabalho ou de transferência de energia, sendo diretamente proporcional ao torque e à velocidade angular do sistema em questão.

A equação da potência mecânica em relação ao torque apresenta como:

$$P = \tau \times \omega$$

- $P$  – Potência (W);
- $\tau$  – Torque (Nm);
- $\omega$  – é a velocidade angular em radianos por segundo (rad/s).

A equação da velocidade angular apresenta como:

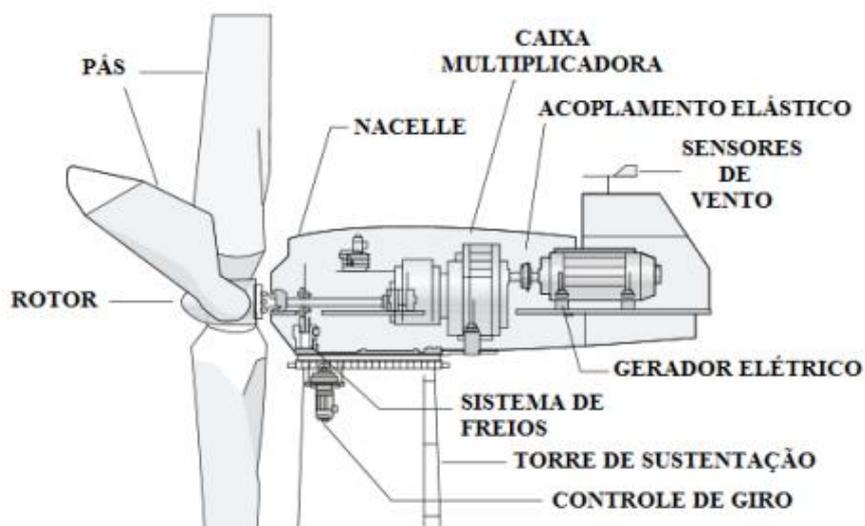
$$\omega = \frac{2\pi RPM}{60}$$

- $\omega$  – é a velocidade angular;
- $\pi$  – (pi);
- *RPM* – Rotações por minuto;
- 60 – Segundos em um minuto

Na geração de energia elétrica por meio de um gerador, a alta velocidade angular é um requisito essencial para efetivar a conversão de energia mecânica em elétrica. No contexto de um carretel, a velocidade angular tende a ser significativamente baixa, apesar da presença de elevados valores de torque. Esta discrepância entre a velocidade angular requerida para a operação eficiente de um gerador e a velocidade angular intrínseca do carretel implica a necessidade de um mecanismo de conversão. Este mecanismo deve ser capaz de transformar o alto torque, associado a uma baixa velocidade angular, em uma potência mecânica caracterizada por uma velocidade angular elevada. Tal transformação é crucial para a viabilização da geração de energia elétrica, assegurando que a velocidade angular do carretel seja amplificada para atender aos requisitos operacionais do gerador.

Esse fenômeno é claramente evidenciado na geração de energia, como nos geradores eólicos de grande escala, que adotam uma caixa de marchas para amplificar o movimento antes de acionar o gerador. Isso ocorre devido à rotação relativamente lenta das pás das turbinas eólicas, embora exerçam uma força considerável.

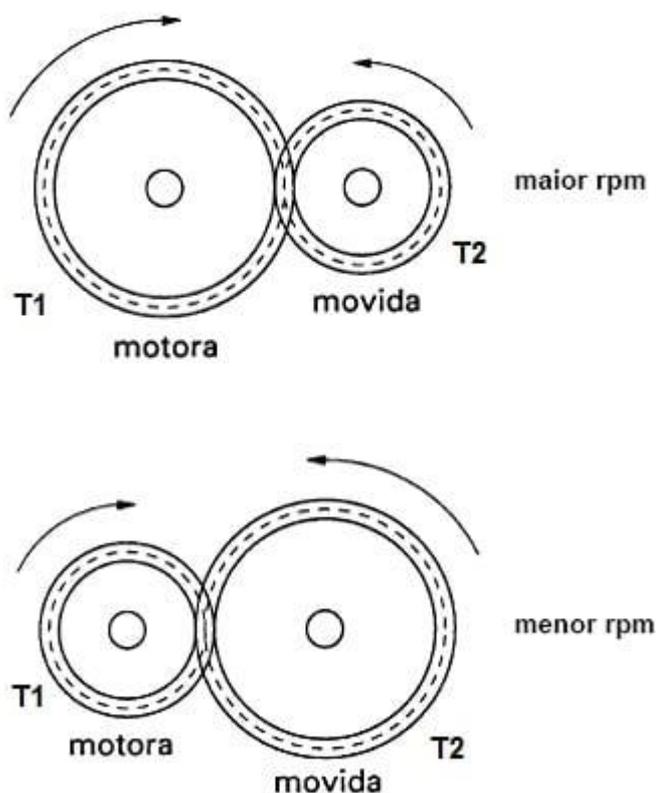
**Figura 28 - Estrutura de um Aerogerador com Ênfase na Caixa de Marcha Multiplicadora de Velocidade no Gerador**



Fonte (CBEE/UFPE 2000)

O fator de multiplicação empregado nos aerogeradores pode ampliar a rotação em até 120 vezes, viabilizando a operação eficaz do gerador. Isso transforma o movimento de rotação lento e potente das pás em um giro rápido e contínuo do gerador.

**Figura 29 - Representação Esquemática das Relações de Velocidade e Rotações por Minuto (RPM)**



Fonte: (ABECOM, 2020)

A equação para uma engrenagem motriz (entrada) e uma engrenagem movida (saída), a relação de transmissão apresenta como:

$$i = \frac{N_{movida}}{N_{motriz}}$$

- $N_{movida}$  – Número de dentes na engrenagem movida;
- $N_{motriz}$  – Número de dentes na engrenagem motriz.

A análise crítica da configuração e a determinação precisa da potência necessária na saída do eixo, que interliga o sistema ao gerador, são etapas cruciais no processo de geração de energia. Em um cenário onde um carretel está diretamente acoplado a um dínamo gerador, a rotação intrínseca do carretel não é suficiente para uma geração de energia eficaz, devido à sua baixa velocidade angular.

**Fotografia 3 - Transmissão Mecânica: Eixo de Carretel Conectado a um Multiplicador de Velocidade, Integrado a um Motor Elétrico.**



Similarmente, na tarefa de elevação de uma carga de grande magnitude, a ausência de um mecanismo de conversão de torque resultaria em um processo de içamento extremamente ineficiente e desafiador. Portanto, a incorporação de um sistema de transformação de torque é essencial no design do projeto, visando otimizar tanto a geração de energia quanto o içamento de cargas, alinhando a operação do sistema às demandas específicas de potência e eficiência.

#### 5.2.13 Implementação de Geradores de Velocidade Variável em Sistemas de Armazenamento de Energia Gravitacional: Adaptação Dinâmica à Demanda Energética

A fim de aproveitar o potencial gravitacional armazenado nas 73 toneladas estimadas e convertê-lo em energia utilizável, é imperativo realizar o dimensionamento de um dispositivo gerador, como um dínamo, capaz de atuar em ambas as direções. Com uma inversão de movimento adequada, é possível gerar energia a partir desse sistema.

O projeto requer a implementação de um gerador de velocidade variável, capaz de modular sua produção de energia de acordo com a velocidade demandada pelo consumo energético. Os geradores de velocidade variável são particularmente apropriados para aplicações de armazenamento de energia gravitacional, permitindo a absorção do excedente de energia gerado por painéis solares em condições ideais, atuando como um mecanismo de acionamento e liberando essa energia quando requerida.

**Figura 30 - Representação Esquemática de Gerador Elétrico por Indução**



**Fonte: (ASSIS 2015)**

A equação da potência mecânica no eixo do gerador para potência elétrica se apresenta como:

$$P_{elétrica} = P_{mecânica} \cdot \eta$$

- $P_{elétrica}$  – Potência elétrica gerada, (W);
- $P_{mecânica}$  – Potência mecânica fornecida ao eixo do gerador (W);
- $\eta$  – Eficiência do gerador (0-1).

Geradores de velocidade variável desempenham um papel fundamental em sistemas projetados para lidar com flutuações na fonte de energia, como o processo de descida do lastro em nosso cenário, bem como para acomodar picos de geração de energia solar. Esse tipo de gerador é amplamente utilizado em turbinas eólicas devido às variações substanciais nas rotações resultantes da ação do vento.

Esse gênero de gerador possibilita a implementação de um sistema de controle ativo, que adapta a demanda de energia de acordo com a necessidade do momento, permitindo uma resposta ágil a mudanças abruptas na potência e velocidade. Isso é essencial para atender às variadas demandas energéticas, desde a ativação de cargas de menor consumo, como uma lâmpada de baixa potência de

aproximadamente 40 watts, até dispositivos que demandam uma potência significativamente maior, como um chuveiro com uma exigência superior a 5000 watts.

A equação da determinação da potência requerida em geradores elétricos apresenta como:

$$P = V \times I \times \eta$$

- $P$  potência do gerador, medida em Watts (W);
- $V$  tensão elétrica, medida em Volts (V);
- $I$  corrente elétrica, medida em Amperes (A);
- $\eta$  eficiência do gerador, (0-1).

A aplicação de motores e geradores em sistemas de conversão de energia exige uma avaliação criteriosa das especificações e eficiências de cada componente. Em cenários onde um motor é empregado para içar uma carga, e a energia é fornecida diretamente por painéis solares, as fórmulas aplicáveis aos geradores também são pertinentes aos motores elétricos. A otimização da eficiência pode ser alcançada mediante a utilização de um gerador especialmente projetado para converter energia potencial gravitacional em energia elétrica, e um motor de alto torque dedicado à tarefa de içamento. Esta configuração dual, onde cada dispositivo é otimizado para uma função específica, pode resultar em um desempenho superior em comparação com um único motor desempenhando ambas as funções. A especialização de geradores para a geração de energia e de motores para o içamento de cargas permite a maximização da eficiência em cada etapa do processo de conversão de energia.

#### 5.2.14 Gestão Otimizada de Energia em Sistemas de Armazenamento Gravitacional: O Papel Central da Central de Controle

A implementação de uma central de controle em sistemas residenciais de distribuição de energia representa um avanço significativo na gestão eficiente do consumo elétrico, exercendo uma influência determinante na regulação e otimização do fluxo energético. Esta central, notável por sua adaptabilidade e versatilidade, é meticulosamente projetada para administrar uma ampla gama de funções essenciais.

Entre estas, destacam-se o monitoramento preciso da tensão, a gestão criteriosa do consumo energético e a coordenação estratégica da descida e frenagem da massa lastro.

Esta central opera regulando a corrente e a tensão em resposta às variações da demanda de potência, medida em watts, dentro do ambiente doméstico. Através de um mecanismo centralizado, o sistema ajusta dinamicamente a potência fornecida, adaptando-se às diferentes tensões residenciais padrão, como 110V ou 220V. Esta capacidade de ajuste permite que a demanda energética seja atendida de maneira precisa e eficiente, otimizando o uso de energia e contribuindo para uma gestão mais sustentável dos recursos energéticos em ambientes residenciais.

Operando como epicentro do sistema, a central de controle sintetiza e harmoniza uma variedade de componentes tecnológicos avançados, incluindo softwares de última geração, conversores de energia, geradores de velocidade variável, transformadores e inversores de tensão. Esta sinergia tecnológica facilita uma administração energética abrangente e eficaz, assegurando que a geração e o consumo de energia estejam alinhados às demandas energéticas instantâneas.

Em cenários onde ocorrem picos de demanda energética, caracterizados pelo uso de aparelhos de alto consumo, a eficácia de uma central de controle torna-se crucial. Esta central responde de maneira ágil e precisa, adaptando a descida de massa para corresponder às exigências energéticas específicas, medidas em watts de potência. A capacidade de ajuste imediato a tais variações assegura uma gestão energética eficiente, caracterizada pela otimização do desempenho e pela minimização de perdas energéticas. Este mecanismo de resposta rápida é fundamental para manter a estabilidade e a eficiência do sistema em situações de consumo energético intensificado.

A habilidade da central de controle em regular meticulosamente a descida e elevação da massa lastro é um aspecto fundamental. Este processo é gerido com precisão para otimizar a geração de energia, adaptando-se de forma dinâmica às variações na demanda energética. Em momentos de demanda reduzida, por exemplo, a central pode moderar a descida da massa, preservando energia para períodos de maior necessidade.

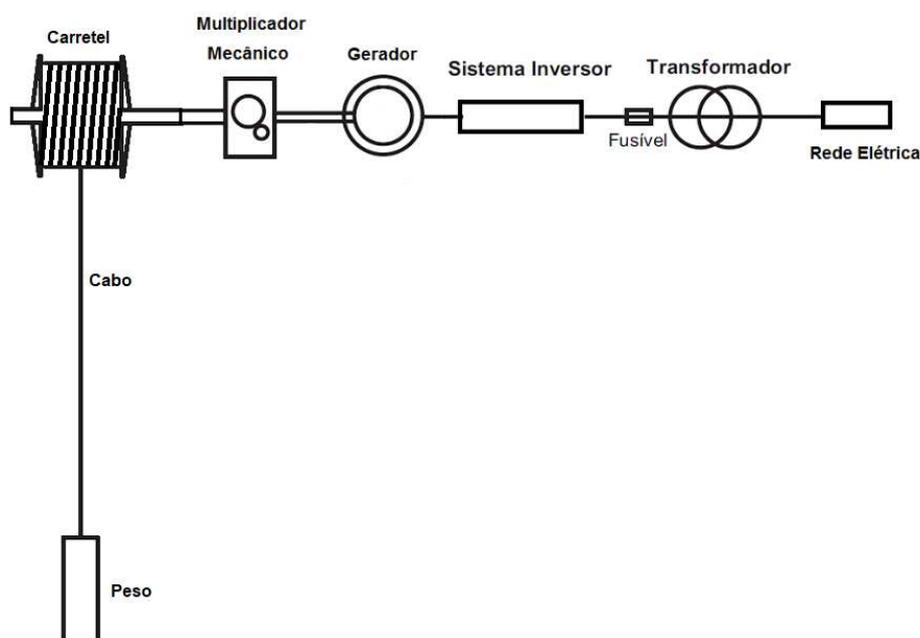
Em condições climáticas adversas, como dias nublados com baixa geração solar, o sistema é capaz de implementar uma gestão energética racional, ajustando-se às limitações de geração.

Adicionalmente, a central de controle desempenha um papel vital na conversão de energia, utilizando inversores para alternar entre corrente alternada (AC) e corrente contínua (DC), e vice-versa. Esta funcionalidade é crucial para garantir a compatibilidade com diversas fontes de energia e aplicações, possibilitando uma transição eficiente e harmoniosa entre diferentes modalidades de geração e consumo energético.

### 5.3 Resumo do Desenvolvimento do Sistema de Armazenamento de Energia Gravitacional

O projeto de armazenamento de energia gravitacional proposto envolve a concepção de um sistema complexo e inovador, que utiliza a energia potencial gravitacional para armazenar e liberar energia. O desenvolvimento deste sistema abrange várias etapas e componentes críticos, cada um desempenhando um papel vital no funcionamento geral do sistema.

Figura 31 - Representação Esquemática Teórica de um Sistema de Baterias Gravitacionais



Fonte: (Autor)

### 5.3.1 Etapas Operacionais do Sistema de Armazenamento de Energia Gravitacional

1. Dimensionamento do Poço e Lastro: A base do sistema é um poço de profundidade específica, idealmente 50 metros, para maximizar a energia potencial gravitacional. O lastro, preferencialmente de aço devido à sua alta densidade e disponibilidade, é calculado para atingir uma massa de aproximadamente 73.469 kg, necessária para armazenar 10 kWh de energia.
2. Cálculo de Cabo e Carretel de Enrolamento: O sistema requer um cabo de aço robusto para suportar a massa do lastro. A tensão necessária é de 720,73 kN, com um fator de segurança mínimo de 6, levando à escolha de um cabo com diâmetro entre 76,2 mm e 82,6 mm. Um tambor de enrolamento é projetado para acomodar e gerenciar este cabo.
3. Sistema de Multiplicação de Rotação: Para converter eficientemente a energia potencial em energia elétrica, o sistema inclui um mecanismo de multiplicação de rotação, semelhante ao usado em turbinas eólicas. Isso permite que o movimento lento e potente do lastro seja transformado em uma rotação rápida e eficiente para acionar o gerador.
4. Gerador de Velocidade Variável: O sistema utiliza um gerador de velocidade variável para adaptar a produção de energia às demandas variáveis. Este tipo de gerador é essencial para lidar com as flutuações na fonte de energia e para acomodar picos de geração de energia solar.
5. Central de Controle: Um componente crucial do sistema é a central de controle, que gerencia a descida e elevação da massa, regula a tensão, e controla a geração no gerador de velocidade variável. Esta central pode utilizar softwares avançados e diversos dispositivos eletrônicos para garantir a eficiência e a segurança do sistema.

Em suma, o sistema de armazenamento de energia gravitacional proposto neste projeto representa um avanço significativo na busca por soluções de armazenamento de energia renovável. Com sua capacidade de armazenar energia de forma eficiente e liberá-la sob demanda, este sistema tem o potencial de desempenhar um papel crucial na transição para um futuro energético mais sustentável e menos dependente de fontes de energia não renováveis.

## **6 RESULTADO E DISCUSSÕES**

### **6.1 Avaliação de Projetos Teóricos em Pequena Escala para Baterias Gravitacionais**

A análise dos projetos teóricos em pequena escala para baterias gravitacionais revela diversas opções, cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens. A seleção do projeto mais adequado depende de uma série de fatores, tais como a localização do empreendimento, a disponibilidade de recursos, o orçamento disponível e o objetivo específico do projeto. Abaixo, serão apresentados alguns exemplos de projetos simples, com uma descrição mais detalhada:

### **6.2 Contraste entre Cenários Ideais e Realistas em Projetos de Armazenamento Gravitacional:**

No contexto metodológico delineado, concebeu-se um cenário ideal, no qual não pressupõem as perdas de eficiência. Este cenário ideal serve como base para a formulação de conceitos e protótipos; contudo, é imperativo estabelecer um paralelo entre o ideal e o realismo operacional. A projeção realista será fundamentada em perdas de eficiência comumente observadas em sistemas similares. No entanto, apenas uma validação empírica poderá atestar integralmente as ineficiências e a performance do sistema, determinando assim as perdas efetivas inerentes ao projeto.

### **6.3 Incorporação da Massa do Cabo no Cálculo da Energia Potencial Gravitacional em Sistemas de Armazenamento de Energia**

Nos cálculos efetuados para o lastro e peso, a massa estimada para armazenar 10 kWh foi de 73.469 kg. No entanto, essa estimativa não leva em consideração a massa do cabo que será utilizado para içar o peso, o que é uma consideração crucial no projeto real. O cabo tem um fator de segurança de 6, proporcionando uma margem de segurança com base na carga de ruptura, ou seja, o cabo deve ser seis vezes mais resistente do que o ideal para prevenir possíveis rupturas. A massa adicional do cabo acrescenta um peso suplementar de 1.450 kg, o que, embora não seja significativo em termos relativos, contribui para um aumento da massa de quase 2%, resultando em um lastro final de 74.919 kg.

Considerando um cabo com massa total de 1450 kg distribuída uniformemente ao longo de um comprimento de 50 metros, a densidade linear de massa do cabo é determinada como 29 kg/m, conforme especificado pelo fabricante IPH. A contribuição energética adicional do cabo ao sistema de armazenamento gravitacional pode ser calculada por meio da integração da energia potencial gravitacional ao longo do deslocamento vertical do peso. Para fins de simplificação analítica, pode-se adotar uma abordagem em que se considera a contribuição média da massa do cabo, equivalente à metade de sua massa total, como sendo constantemente aplicada ao longo da trajetória de queda. Esta aproximação permite a estimativa da energia potencial gravitacional média do cabo, assumindo que 50% da massa do cabo contribui uniformemente para a energia potencial gravitacional em qualquer ponto da trajetória vertical.

A densidade linear de massa do cabo, que se desenrola durante a operação do sistema, é quantificada como 29 kg/m. Consequentemente, para cada incremento unitário de deslocamento vertical descendente, a massa efetiva do cabo que exerce influência sobre a energia potencial gravitacional (EPG) do sistema se incrementa em 29 kg. Esta variação linear de massa deve ser integrada ao longo do percurso de descida para calcular a energia potencial gravitacional total acumulada.

**Tabela 13 - Acúmulo Gravitacional em Função da Descida do Cabo**

<b>Altura (m)</b>	<b>Massa do Peso (kg)</b>	<b>Massa do Cabo Acumulada (kg)</b>	<b>Massa Total (kg)</b>	<b>EPG (J)</b>	<b>EPG (kWh)</b>
1	73 469	0	73 469	EPG1	EPG1_kWh
2	73 469	29	73 498	EPG2	EPG2_kWh
...	...	...	...	...	...
50	73 469	1450	74 919	EPG50	EPG50_kWh

**Fonte: (Autor)**

Tabela 14 - Acúmulo Gravitacional em Função da Descida do Cabo

Altura (m)	Massa do Peso (kg)	Massa do Cabo Acumulada (kg)	Massa Total (kg)	EPG (J)	EPG (kWh)
1	73 469	0	73 469	720 719,5	00.20
10	73 469	290	73 759	7 238 642,9	02.01
20	73 469	580	74 049	14 505 642,9	04.03
30	73 469	870	74 339	21 801 002,9	06.06
40	73 469	1160	74 629	29 124 722,9	08.09
50	73 469	1450	74 919	36 476 802,9	10.13

Fonte: (Autor)

#### 6.4 Análise das Perdas de Eficiência em Sistemas de Geração de Energia Gravitacional

O projeto ideal foi concebido sem levar em consideração as perdas típicas de eficiência que ocorrem em sistemas de geração de energia. Essas perdas de eficiência podem ser atribuídas a diversos fatores, tais como:

##### 6.4.1 Perdas por Atrito

A perda por atrito é um fenômeno que surge quando os componentes móveis do sistema entram em contato e oferecem resistência ao movimento relativo. Esta forma de perda pode ser evidenciada em várias partes do sistema, incluindo as engrenagens, motores e nas operações de enrolamento e desenrolamento do cabo, provocando um aumento na temperatura e uma redução na eficiência geral.

A equação do atrito apresenta como:

$$Fat = \mu \cdot N$$

- $Fat$  = Força de atrito (N);
- $\mu$  = Coeficiente de atrito;
- $N$  = Força normal (N).

$$N = m \cdot g$$

- $N$  = Força normal (N);
- $m$  = Massa (Kg);
- $g$  = Aceleração da gravidade (9,8m/s<sup>2</sup>).

Para reduzir o impacto das perdas por atrito, podem ser adotadas medidas como a utilização de materiais com baixo coeficiente de atrito, aplicação adequada de lubrificação e o desenvolvimento de projetos que minimizem o contato direto entre componentes móveis, evitando ao máximo a inclusão de peças móveis suplementares no sistema.

As perdas por atrito representam um fator crítico na degradação da eficiência em sistemas mecânicos e elétricos, caracterizando-se pela conversão de energia cinética em térmica, culminando na dissipação de calor. Esta transformação energética resulta em uma redução significativa da eficiência operacional. Assim, a mitigação das perdas por atrito emerge como um vetor essencial na maximização do desempenho sistêmico, demandando estratégias como a implementação de protocolos de lubrificação adequados e a execução periódica de manutenção preventiva das componentes envolvidas.

#### 6.4.2 Perdas no Processo de Conversão Energética

As perdas associadas à conversão de energia mecânica em elétrica, bem como a conversão inversa de elétrica para mecânica, são fenômenos presentes nos ciclos operacionais de sistemas de armazenamento energético. A primeira categoria de perda ocorre durante a liberação de energia previamente armazenada em acumuladores, como baterias, enquanto a segunda se apresenta durante o processo de carregamento destes dispositivos. Estas perdas de conversão são tipicamente quantificadas como um percentual da energia inicial que é dissipada ao longo do processo de conversão. Adicionalmente, existem perdas associadas à inversão de corrente alternada (AC) para corrente contínua (DC) e vice-versa. Estratégias para a mitigação dessas perdas incluem a otimização da eficiência de motores e geradores, a seleção de componentes de alta integridade e a manutenção sistemática do sistema com materiais e componentes de qualidade certificada.

A transdução energética em sistemas de conversão mecânico-elétrica é frequentemente acompanhada pela geração de calor nos componentes constituintes, tanto em motores quanto em geradores. A intensidade dessas perdas térmicas é influenciada pelo arranjo estrutural do sistema, que pode variar desde a implementação de um dispositivo híbrido que desempenha ambas as funções de motor e gerador, até a utilização de unidades dedicadas, cada uma especializada para sua função específica. A quantificação das perdas térmicas é realizada com base nas propriedades térmicas e operacionais dos motores e geradores em questão. Estratégias para a redução dessas perdas incluem a otimização dos sistemas de refrigeração, seja através da gestão eficiente de fluxos de ar ou pela incorporação de motores e geradores de alta eficiência térmica, bem como o monitoramento e controle rigoroso das temperaturas operacionais. É imperativo distinguir que as perdas energéticas convertidas em calor neste contexto são distintas das perdas por atrito, embora ambas resultem em dissipação térmica, suas origens e métodos de mitigação diferem substancialmente.

#### 6.4.2.1 Perda Térmica no Motor e Gerador

Durante o processo de conversão de energia, ocorre a geração de calor nos componentes mecânicos e elétricos do motor e do gerador. Essa fenomenologia térmica pode variar consideravelmente conforme o design adotado, que pode contemplar a utilização de um único dispositivo para ambas as funções ou a segregação de um motor e um gerador, otimizados individualmente para as respectivas tarefas. As perdas térmicas são passíveis de quantificação com base nas características intrínsecas dos motores e geradores específicos em utilização. Estratégias para mitigar essas perdas incluem aprimorar o resfriamento, que pode ser alcançado por meio de fluxos de ar apropriados, bem como a seleção de motores e geradores com elevados níveis de eficiência, juntamente com a manutenção de um controle rigoroso sobre a temperatura operacional.

#### 6.4.2.2 Perda Térmica dos Fios de Eletricidade

A geração de calor devido à resistência elétrica nos fios de condutores resulta em perdas de energia substanciais. Essas perdas são quantificadas com base na resistência dos condutores, na intensidade da corrente elétrica e na diferença de

potencial elétrico. Reduzir as perdas nos fios requer o uso de cabos com menor resistência, a manutenção de distâncias elétricas curtas, a prevenção de sobrecargas e, se possível, a aplicação de níveis mais elevados de tensão para diminuir a resistência dos condutores.

#### 6.4.3 Perda por Desgaste Mecânico e de Materiais

A degradação progressiva das partes móveis, incluindo rolamentos e engrenagens, devido a processos como desgaste, oxidação e exposição à umidade, conduz a perdas substanciais de eficiência no sistema. Embora o desgaste mecânico em si não seja quantificável por meio de uma única fórmula, ele é continuamente monitorado ao longo do tempo. Medidas preventivas eficazes abrangem manutenção periódica, a aplicação adequada de lubrificantes e a utilização de revestimentos antioxidantes, tais como tintas, vernizes e revestimentos de metais protetores. Além disso, a preferência por materiais de alta qualidade é essencial para minimizar o impacto do desgaste mecânico no sistema.

#### 6.4.4 Perda por Vento

Em sistemas situados acima da superfície terrestre, a ação do vento gera forças que incidem tanto no lastro quanto no peso em queda, resultando em perdas significativas, muitas vezes relacionadas a oscilações e outros efeitos indesejados. Estimar com precisão as perdas decorrentes do vento é uma tarefa complexa devido à presença de diversas variáveis em jogo. Para minimizar esses efeitos, é aconselhável incorporar proteções específicas no projeto que atenuem o impacto do vento e reduzir a área de superfície exposta. Outra abordagem eficaz envolve a adoção de poços ou estruturas subterrâneas para eliminar inteiramente a interferência do vento no sistema.

#### 6.4.5 Perda de Inércia

Peças rotativas em alta velocidade, como volantes de inércia, engrenagens, motores e a própria aceleração do lastro, estão sujeitas a perdas devido à inércia, tanto na manutenção de uma rotação contínua quanto na inicialização de um movimento. O cálculo das perdas de inércia é influenciado pela massa das peças e

sua aceleração angular, bem como pela inércia padrão da massa e da aceleração. Para mitigar essas perdas, é aconselhável utilizar componentes leves e eficientes e minimizar as massas em rotação sempre que possível.

#### 6.4.6 Perda na elasticidade do Cabo

A elasticidade do cabo pode absorver parte da energia durante a subida e descida, resultando no estiramento, balanço e possíveis oscilações do cabo. A elasticidade é determinada pelas propriedades físicas do cabo e pela tensão aplicada. Devido à considerável massa do lastro, é provável que o cabo sofra estiramento excessivo, aumentando o risco de desgaste prematuro e de danos. Para minimizar essas perdas, é aconselhável utilizar cabos com menor coeficiente de elasticidade ou implementar componentes de amortecimento no sistema.

#### 6.4.7 Perda por Expansão Térmica

As flutuações de temperatura podem provocar a expansão e contração dos materiais, acarretando perdas de eficiência devido a variações dimensionais em peças e ajustes. O cálculo preciso das perdas originadas pela expansão térmica é intrincado e dependente de cada material utilizado e da temperatura alcançada. Assim, é de suma importância projetar um sistema capaz de acomodar e gerenciar as variações de temperatura ou empregar materiais com coeficientes de expansão térmica reduzidos.

#### 6.4.8 Perda por Frenagem do Peso

Caso seja implementado um sistema de frenagem, a frenagem do lastro durante a descida gera uma força contrária ao movimento, o que resulta na geração de energia térmica no sistema de freio utilizado, essa energia térmica pode ser potencialmente convertida em energia útil. A força de frenagem é calculada de acordo com os princípios da dinâmica, para minimizar as perdas, é fundamental empregar sistemas de regeneração de energia e dispositivos de amortecimento, a fim de recuperar parte da energia dissipada durante o processo de frenagem do lastro. Isso permite evitar a perda total da energia para o calor gerado pelo atrito em sistemas de freio, como discos ou pastilhas.

#### 6.4.9 Perda de Controle

Ineficiências operacionais podem ocorrer devido a erros nos sistemas de controle e regulação do sistema. A quantificação precisa das perdas de controle não pode ser obtida por meio de uma única fórmula, sendo requerida a realização de testes empíricos para avaliar os efeitos reais. Para mitigar essas perdas, é essencial aprimorar os sistemas de controle, monitorar continuamente o desempenho e realizar ajustes sempre que necessário.

#### 6.4.10 Perdas por Motivos Gerais

Essas perdas podem ser atribuídas a diversas causas não especificamente definidas, incluindo imperfeições de projeto e pequenas ineficiências não catalogadas. Essas perdas gerais só podem ser plenamente compreendidas e avaliadas em um projeto real, por meio da realização de extensos testes empíricos. Portanto, é imperativo realizar análises detalhadas e ajustes no design a fim de minimizar perdas não identificadas previamente.

Cada sistema de armazenamento de energia gravitacional é singular em termos de suas características, como dimensões, massa, profundidade, materiais empregados, localização geográfica, bem como das variáveis climáticas associadas, entre outros. A identificação e a minimização de perdas específicas estão intrinsecamente ligadas ao projeto e à aplicação particular de cada sistema. Portanto, um projeto meticulosamente elaborado, a execução de manutenção apropriada e a vigilância contínua são imperativos para otimizar a eficiência global do sistema.

### **6.5 Análise Comparativa entre Estimativas Otimistas e Pessimistas**

No desenvolvimento do projeto de armazenamento de energia gravitacional, é imperativo adotar uma abordagem analítica que contemple tanto perspectivas otimistas quanto pessimistas em relação à eficiência do sistema. Esta abordagem bifurcada permite uma avaliação mais abrangente e realista do desempenho potencial do sistema. Relatos de eficácias elevadas, que alcançam até 90% em certas fontes, embora promissores, exigem uma análise cautelosa e conservadora para evitar superestimativas.

Diante das perdas reportadas, de acordo com o autor desse trabalho acadêmico, optou-se na projeção teórica da pesquisa acadêmica por efetuar uma avaliação superficial das perdas de eficiência, fundamentada em duas potenciais estimativas, generalizado todas as perdas a um percentil geral de todo o sistema, unindo todas essas perdas em uma aproximação só. Conforme as previsões estabelecidas, tais aspectos podem ser validados em um contexto empírico em projetos futuros, visando a avaliação da proximidade entre a conjectura teórica e a realidade observada.

#### 6.5.1 Estimativa otimista:

Considera-se uma perda de eficiência total de 30% em comparação com o modelo ideal teórico. Esta projeção é expressa matematicamente como  $EPG_{real\_otimista} = EPG_{ideal} \times (1 - 0.30)$ , refletindo uma expectativa de que o sistema mantenha 70% de sua eficácia teórica.

#### 6.5.2 Estimativa pessimista

Assume uma perda de eficiência mais significativa, de 50 %. Esta projeção é representada pela equação  $EPG_{real\_pessimista} = EPG_{ideal} \times (1 - 0.50)$ , indicando que o sistema poderia reter apenas metade de sua eficácia ideal. Este cenário conservador é crucial para preparar o projeto para as piores condições operacionais possíveis, garantindo assim a robustez e a viabilidade do sistema em uma variedade de circunstâncias.

**Tabela 15 - Estimativas de Perda de Eficiência em Diversas Situações**

Altura (m)	EPG Ideal (kWh)	EPG Real Otimista (kWh)	EPG Real Pessimista (kWh)
1	0,20	0,140	0,100
10	2,01	1,407	1,005
20	4,03	2,821	2,015
30	6,06	4,242	3,030
40	8,09	5,663	4,045
50	10,13	7,091	5,065

Fonte: (Autor)

## 6.6 Tempos de carga e descarga da bateria gravitacional:

supondo que a estimativa para a bateria gravitacional seria de 10kwh, a tempo da carga completa para esse acúmulo conforme a tabela 16:

**Tabela 16 – Estimativa de Tempo de Carga e Energia Extra em Dias de Carregamento**

<b>Eficiência (%)</b>	<b>Energia Gerada por Dia (kWh)</b>	<b>Energia Consumida Durante o Dia (kWh)</b>	<b>Energia Consumida Durante a Noite (kWh)</b>	<b>Energia Restante para Armazenamento (kWh)</b>	<b>Dias para Carregar a Bateria</b>
EPG Ideal 100	10	-1.51	-5.49	3	3,33
EPG Otimista 70	7	-1.51	-5.49	0	0,00
EPG Pessimista 50	5	-1.51	-5.49	-2	impossível

Fonte: (Autor)

## 6.7 Produção Necessária em Função da Eficiência Operacional

Na fase preliminar de elaboração das tabelas analíticas para o projeto de armazenamento de energia gravitacional, é essencial calcular primeiramente a quantidade de energia que deve ser gerada antes de considerar as perdas decorrentes de ineficiências sistêmicas. Este cálculo é fundamental para determinar a capacidade de produção energética necessária para atingir o objetivo estabelecido de armazenar 10 kWh de energia.

Operando sob uma premissa de eficiência de 70%, a quantidade de energia que precisa ser inicialmente gerada é aproximadamente 14,29 kWh. Este valor é obtido ao dividir a meta de armazenamento de energia (10 kWh) pela eficiência operacional estimada (0,7). Este cálculo reflete a necessidade de produzir uma quantidade maior de energia para compensar as perdas inerentes ao sistema.

De maneira similar, em um cenário onde a eficiência do sistema é considerada em 50%, a exigência de geração energética aumenta significativamente. Neste caso, para alcançar o mesmo objetivo de armazenamento de 10 kWh, seria necessário gerar 20 kWh de energia (10 kWh dividido por 0.5). Este aumento na produção energética

necessária é consequência direta da maior taxa de perda de eficiência, destacando a importância de considerar as ineficiências do sistema no planejamento e dimensionamento do projeto.

**Cálculos para o Sistema Otimista (70% de eficiência):**

Energia necessária:  $10 \text{ kWh} \cdot 0.7 \approx 14.29 \text{ kWh}$

Correção necessária:  $14.29 \text{ kWh} - 10 \text{ kWh} = 4.29 \text{ kWh}$

kWh

**Cálculos para o Sistema Pessimista (50% de eficiência):**

Energia necessária:  $10 \text{ kWh} \cdot 0.5 = 20 \text{ kWh}$

Correção necessária:  $20 \text{ kWh} - 10 \text{ kWh} = 10 \text{ kWh}$

**6.8 Estratégias de Mitigação para Ineficiências Sistêmicas:**

No contexto do projeto ideal, foi previamente estabelecido um objetivo de armazenamento energético de 10 kWh. Para contrabalançar as ineficiências inerentes ao sistema, propõe-se a implementação de três abordagens distintas:

**6.8.1 Incremento da Massa:**

O aumento da massa do contrapeso acarretará em exigências estruturais adicionais, incluindo o reforço dos cabos de sustentação, a utilização de maquinário com maior capacidade de carga e a ampliação do diâmetro do poço vertical. É importante ressaltar que o tamanho do poço, no cenário ideal, era originalmente estabelecido em 1 metro de diâmetro, correspondente ao diâmetro do cilindro do peso. Tais adaptações são implementadas com o objetivo de acomodar o aumento da massa de maneira segura e eficiente.

**Tabela 17 – Incremento de Massa Requerido para Compensar Perdas Energéticas**

<b>Eficiência (%)</b>	<b>Massa Necessária (kg)</b>	<b>Massa Adicional (kg)</b>	<b>Aumento do Diâmetro do Poço (%)</b>	<b>Massa do Cabo (kg)</b>	<b>Energia Gerada (kWh)</b>	<b>Energia Após Perdas (kWh)</b>
Otimista 70	104 857	31 388	18-22	2 097	14,29	10
Pessimista 50	149 254	75 785	41-45	2 985	20.00	10

**Fonte: (Autor)**

Conforme delineado no projeto teórico, a execução da escavação de um poço requer um espaço adequado para a descida e elevação do peso. Isso implica que o espaço disponível pode variar devido às vibrações e oscilações inerentes ao peso. Na versão otimista, observa-se um intervalo de 18% a 22%, enquanto na versão pessimista, esse intervalo aumenta para 41% a 45%. Essa variação refere-se ao aumento do raio do poço necessário para acomodar a nova massa do peso adicionado, evitando o contato do cilindro de lastro com as paredes. É importante destacar que essa variação é uma estimativa ainda não testada da oscilação do peso, proporcionando uma margem de segurança. Além disso, considera-se o uso de aço como material de lastro.

#### 6.8.2 Extensão da Distância de Queda:

O prolongamento da trajetória de descida do contrapeso resultará na necessidade de escavação adicional para aumentar a profundidade do poço, bem como no alongamento proporcional dos cabos de sustentação. Tal estratégia visa maximizar a energia potencial gravitacional acumulável pelo sistema sem envolver acréscimo de massa no projeto.

**Tabela 18 - Extensão de Distância Requerida em Poços para Compensação de Perdas Energéticas**

<b>Eficiência (%)</b>	<b>Altura Necessária (m)</b>	<b>Massa do Cabo (kg)</b>	<b>Energia Gerada (kWh)</b>	<b>Energia Após Perdas (kWh)</b>
Otimista 70	71,44	2072	14.29	10
Pessimista 50	100	2900	20	10

**Fonte: (Autor)**

### 6.8.3 Acréscimo no Número de Painéis Fotovoltaicos:

A expansão do parque de geração fotovoltaica visa suprir o sistema com uma potência adicional, compensando as perdas energéticas e promovendo uma maior eficiência na conversão de energia solar em energia elétrica, mesmo diante das ineficiências operacionais, porém é necessário um sistema mais robusto possa suprir a demanda maior de energia.

**Tabela 19- Incremento de Painéis Fotovoltaicos para Compensação de Perdas Energéticas**

<b>Eficiência (%)</b>	<b>Painéis Fotovoltaicos</b>	<b>Painéis Fotovoltaicos Adicionados</b>	<b>Energia Gerada (kWh)</b>	<b>Energia Após Perdas (kWh)</b>
Otimista 70	15	5	14,29	10
Pessimista 50	20	10	20,00	10

**Fonte: (Autor)**

Essas medidas são projetadas para assegurar que o sistema atinja a capacidade de armazenamento energético estipulada, apesar das perdas de eficiência observadas.

É imperativo considerar que a otimização do sistema não se restringe à implementação isolada de uma única estratégia de mitigação. A sinergia entre múltiplas intervenções, potencialmente uma combinação de duas ou todas as três propostas, podem conduzir a uma eficácia operacional superior, simultaneamente minimizando o consumo de recursos e custos materiais. Tal abordagem integrada favorece um equilíbrio entre desempenho econômico e sustentabilidade de recursos, alinhando-se com os princípios de eficiência energética e engenharia otimizada.

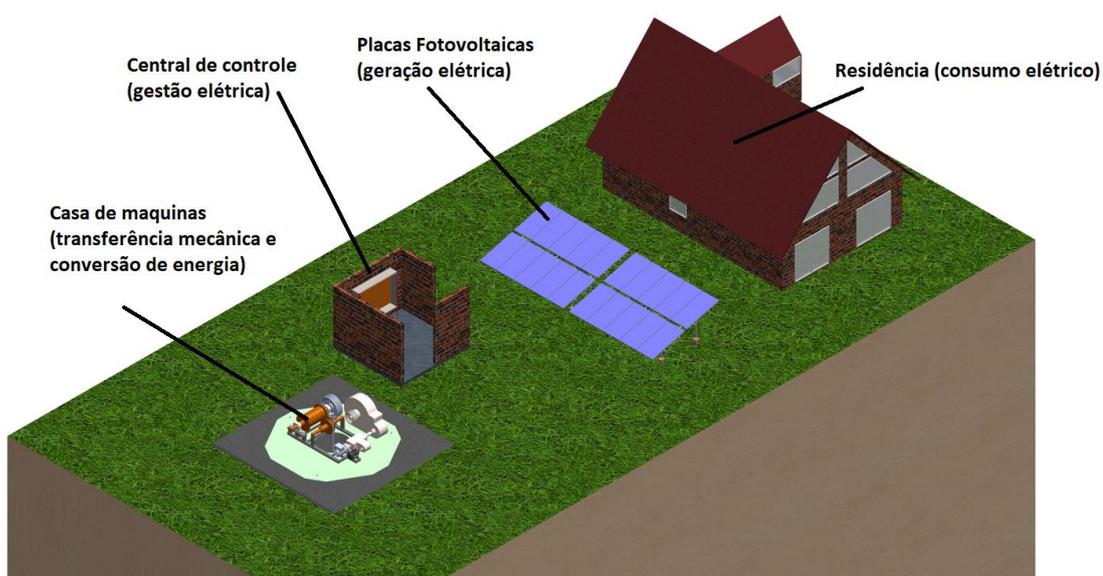
## **6.9 Elaboração e Modelagem de Projetos para Baterias Gravitacionais: Análise Detalhada Através de Desenhos Técnicos e Representações Modelísticas**

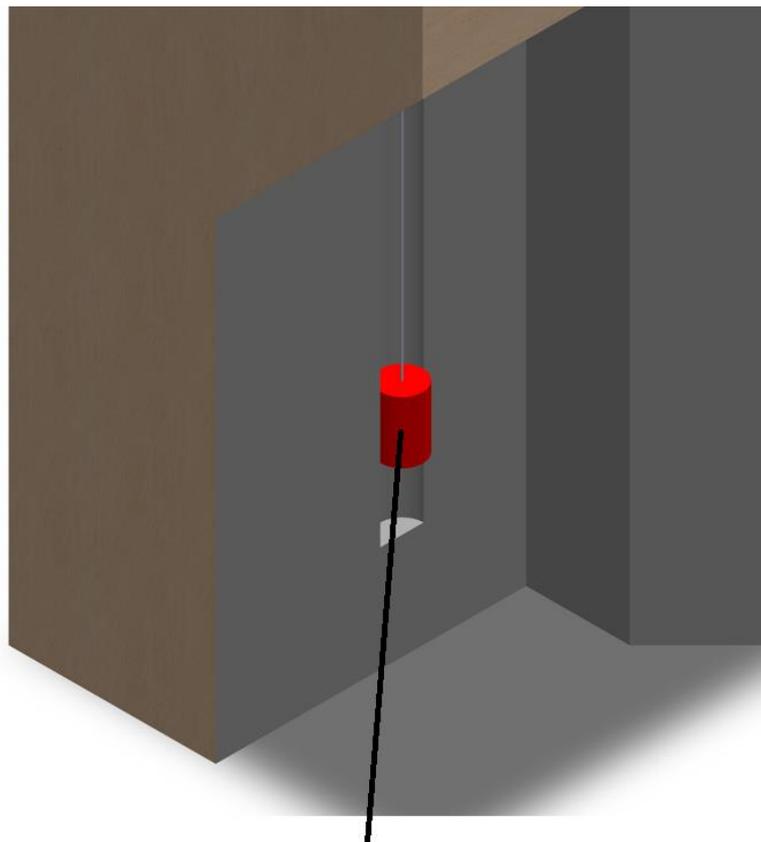
Dentro do contexto de pesquisa e desenvolvimento de baterias gravitacionais, serão cuidadosamente elaboradas três variantes de projeto, cada uma utilizando um material de lastro distinto.

1. A primeira variante empregará aço, selecionado por sua densidade adequada e conformidade com os parâmetros realistas e pragmáticos da engenharia.

2. A segunda variante explorará o uso de chumbo como lastro. Apesar de apresentar um custo econômico mais elevado, esta opção é considerada viável dentro das limitações e possibilidades do projeto.
3. A terceira variante focará na aplicação do urânio empobrecido, distinguido pela sua densidade extremamente alta. Esta escolha tem como objetivo otimizar a eficiência espacial do sistema, buscando minimizar o volume necessário para os contrapesos e, por extensão, reduzir a magnitude das escavações necessárias para os poços.

**Figura 32 - Esquema Conceitual de Bateria Gravitacional com Elementos Básicos Principais:**





**Sistema de descida Controlada, cabo e peso  
(Acumulo e geração de energia gravitacional)**

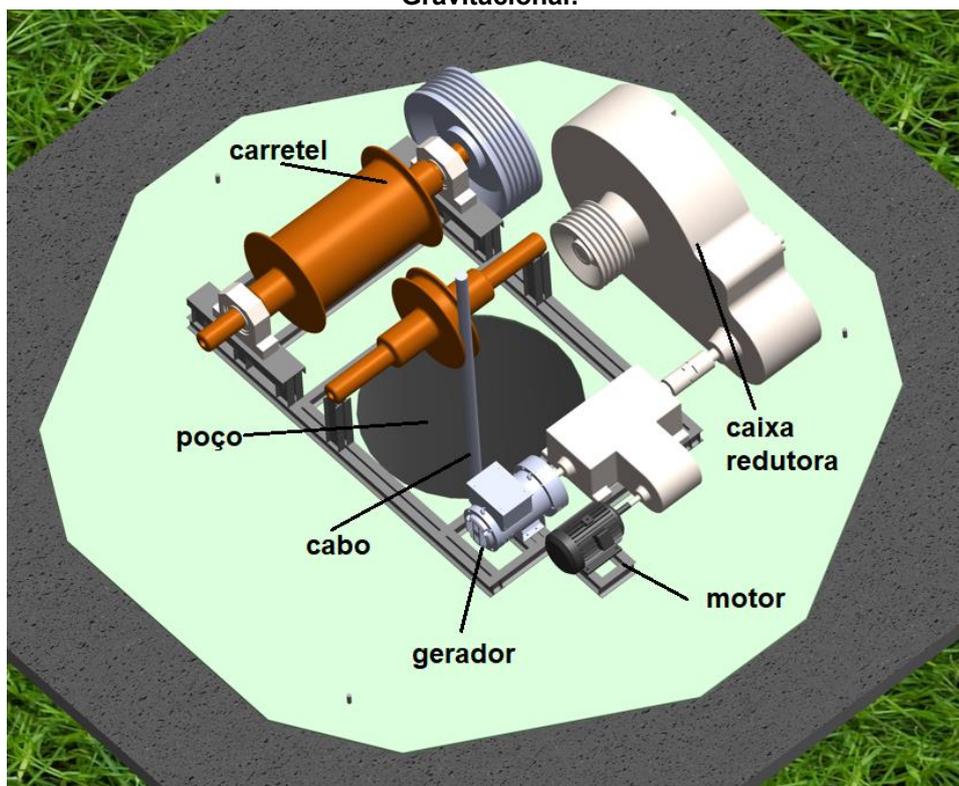
**Fonte: (Autor)**

### 6.9.1 Configuração e Funcionalidade da Casa de Máquinas em Sistemas de Armazenamento de Energia Gravitacional

A casa de máquinas, elemento central no sistema de armazenamento de energia baseado em gravidade, é composta por uma infraestrutura robusta e componentes mecânicos e elétricos precisamente interligados. O poço, reforçado estruturalmente, serve como o eixo vertical para o movimento do peso, enquanto um cabo de aço de alta tensão, enrolado em um carretel, sustenta e controla este movimento. Polias estrategicamente posicionadas garantem a eficiência e a suavidade do deslocamento vertical do peso. O eixo do carretel, integrado a uma correia de transmissão, está conectada a uma caixa de marchas, também referida como caixa de engrenagens ou redutora, que tem a função crítica de modular a velocidade de rotação e de transmitir o torque adequado ao gerador. Este gerador, é o responsável pela conversão da energia mecânica, oriunda do movimento do peso, em energia elétrica. Adicionalmente, um motor elétrico auxiliar é empregado durante

os períodos de geração de energia solar, fornecendo a força necessária para elevar o peso, otimizando assim o ciclo de armazenamento de energia. Este conjunto sinérgico de componentes, operando em conjunto na casa de máquinas, é vital para a eficiência e a eficácia do sistema de armazenamento de energia por gravidade.

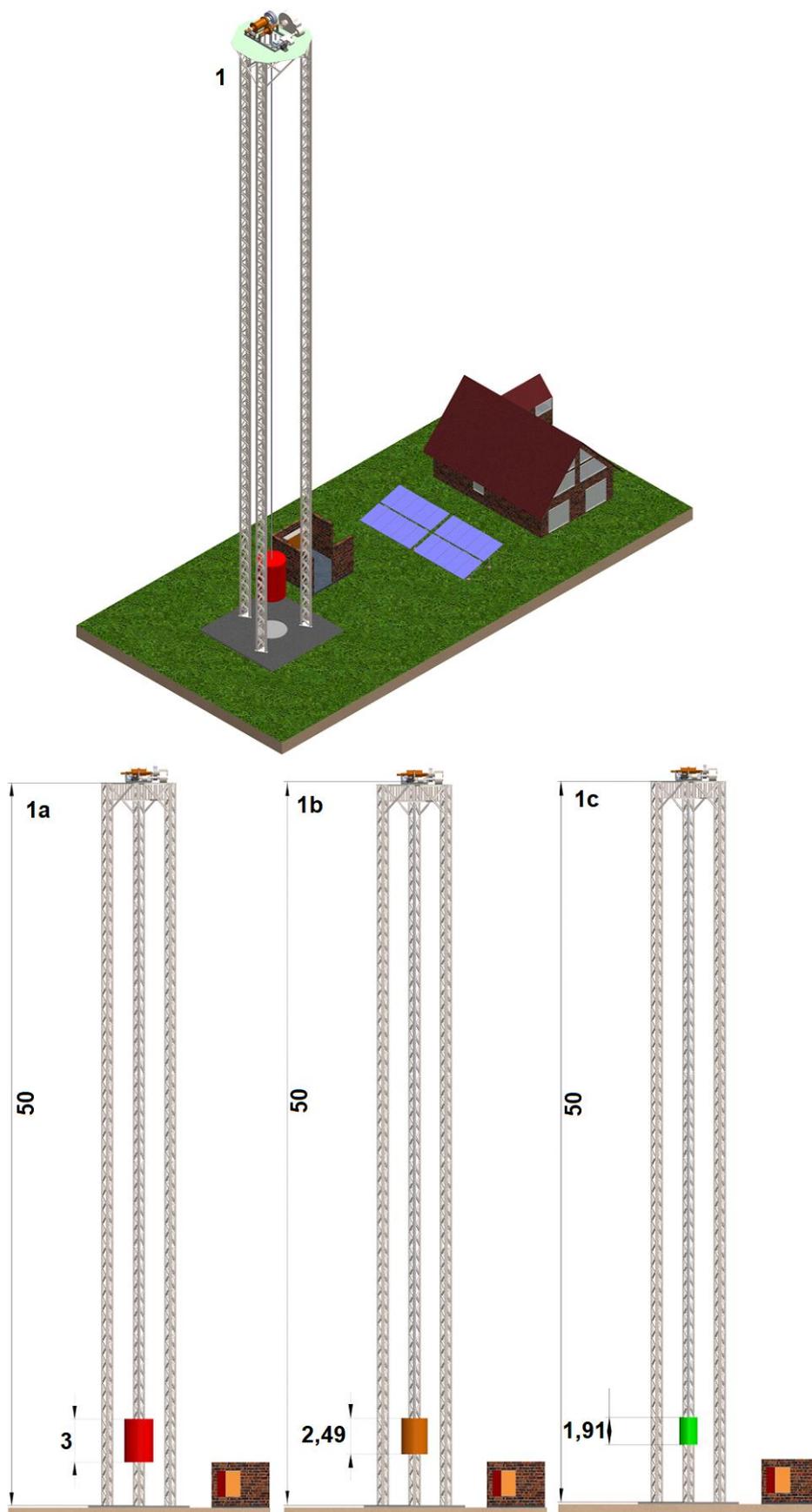
**Figura 33 - Representação Esquemática da Casa de Máquinas para Acúmulo de Energia Gravitacional:**



Fonte: (Autor)

## 6.10 Modelagem Tridimensional de Projetos: Análise Dimensional e Seleção de Materiais

Figura 34 - Esquema de Bateria Gravitacional com Torre Única e Peso Singular Integrado à Geração Fotovoltaica



Fonte: (Autor)

**Tabela 20 - Especificações da Bateria Gravitacional com Torre Única e Peso Singular**

Projeto 1	Materiais	Volume (m <sup>3</sup> )	Diâmetro do cilindro (m)	Altura do cilindro (m)
1a	Aço	9,417	2,00	3,00
1b	Chumbo	6.500	1,66	2,49
1c	Uranio	3.856	1,26	1,91

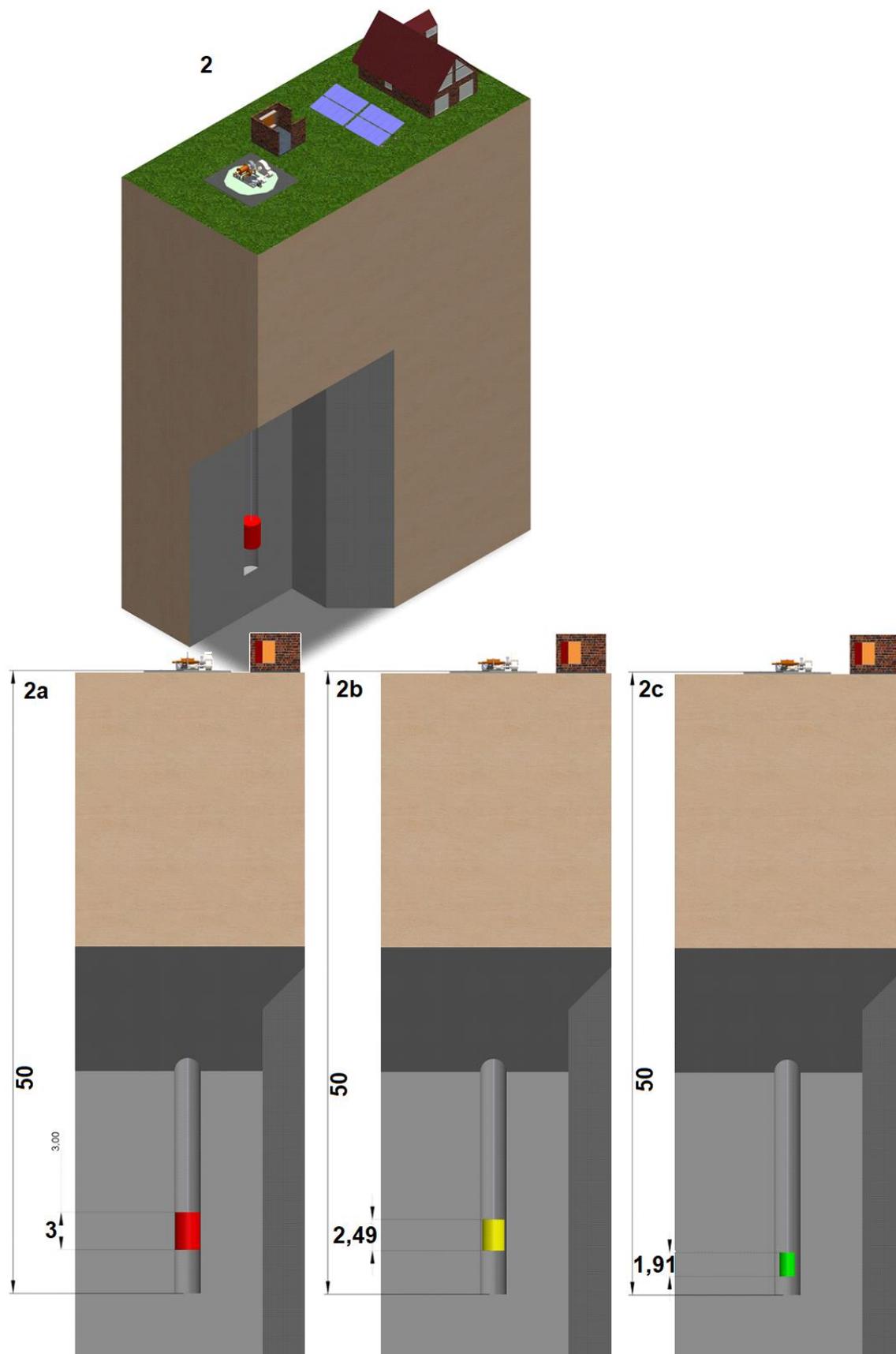
<b>Capacidade de acúmulo de energia (kWh)</b>	<b>10</b>
<b>Massa do Peso (Kg)</b>	73.469
<b>Distância curso torre (m)</b>	50

**Fonte: (Autor)**

**Vantagem:** Uma vantagem significativa deste modelo é a capacidade de integrar estruturas já existentes, como torres, no *design* da bateria gravitacional. Esta abordagem pode resultar em uma redução substancial dos recursos necessários para a construção de um poço profundo, otimizando o uso de infraestruturas preexistentes e minimizando os custos associados à construção de novas estruturas.

**Desvantagem:** Contudo, este modelo apresenta desafios consideráveis. Primeiramente, a necessidade de espaço horizontal adicional para acomodar a torre pode ser problemática em terrenos com características específicas, como solos argilosos ou bases de baixa resistência, exigindo uma análise geotécnica detalhada. Além disso, a construção da torre demanda materiais de alta resistência e durabilidade para assegurar a estabilidade estrutural, especialmente considerando a influência de fatores ambientais como o vento. A segurança é outra preocupação crítica, particularmente em relação à integridade do cabo, cuja ruptura pode acarretar riscos significativos. Adicionalmente, a manutenção da torre, dada a sua altura, pode representar um desafio logístico e técnico, exigindo procedimentos especializados e equipamentos adequados para garantir a operacionalidade e a segurança da estrutura.

Figura 35 - Esquema de Bateria Gravitacional com Poço Único e Peso Singular Integrado à Geração Fotovoltaica



Fonte: (Autor)

**Tabela 21 - Especificações da Bateria Gravitacional com Torre Único e Peso Singular**

Projeto 2	Materiais	Volume (m <sup>3</sup> )	Diâmetro do cilindro (m)	Altura do cilindro (m)
2a	Aço	9,417	2,00	3,00
2b	Chumbo	6.500	1,66	2,49
2c	Uranio	3.856	1,26	1,91

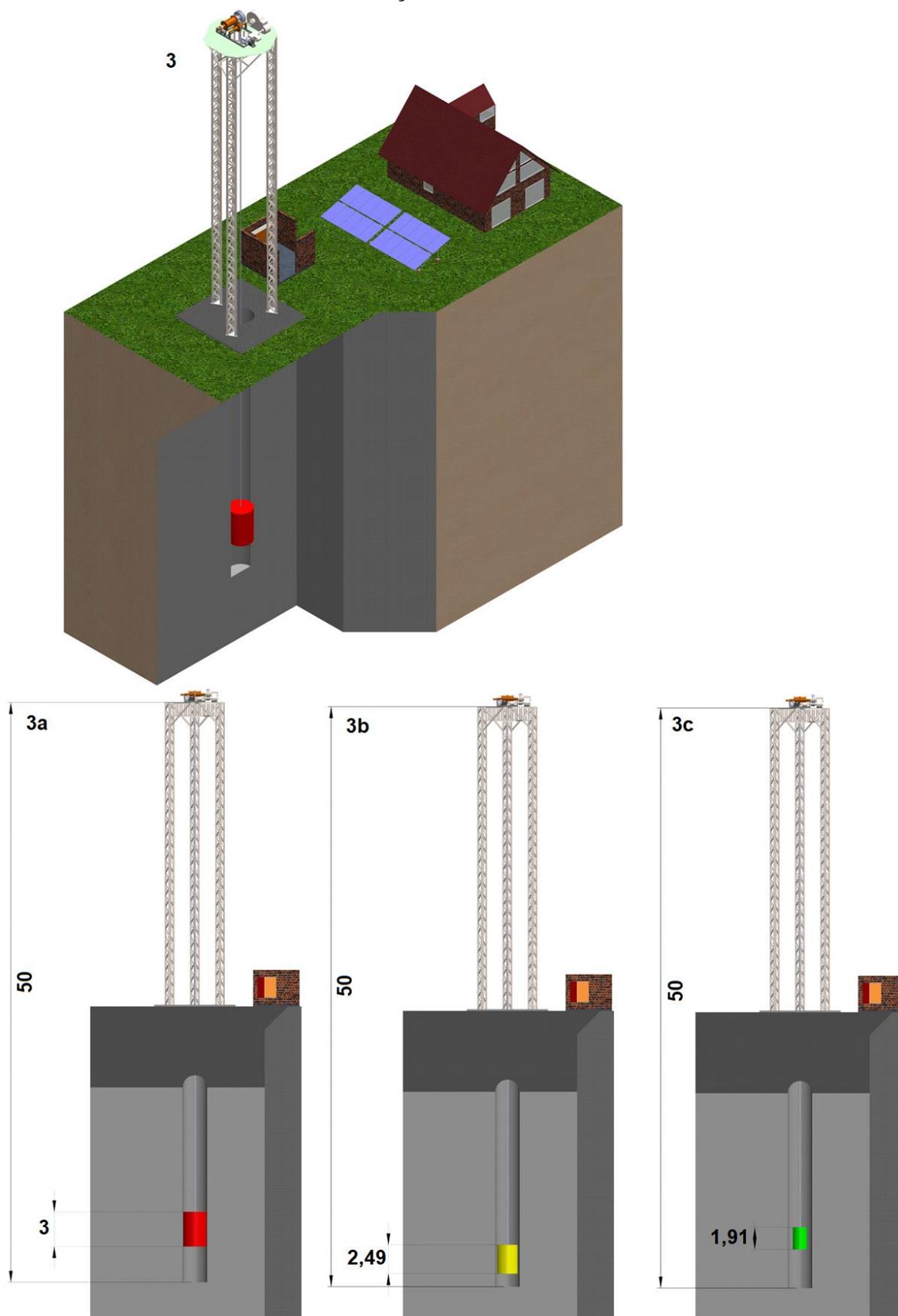
<b>Capacidade de acúmulo de energia (kWh)</b>	<b>10</b>
<b>Massa do Peso (Kg)</b>	73.469
<b>Distância curso poço (m)</b>	50

**Fonte: (Autor)**

**Vantagem:** Uma das principais vantagens desse modelo é a economia de espaço vertical. A utilização de um poço profundo integrado ao sistema permite a maximização do uso do espaço subterrâneo, o que é particularmente benéfico em áreas com limitações de espaço superficial. Além disso, a localização das caixas de máquinas as operações de manutenção, proporcionando um acesso mais direto e controlado aos componentes críticos do sistema.

**Desvantagem:** No entanto, a implementação de um poço profundo apresenta desafios significativos. A perfuração de um poço dessa natureza é uma operação complexa e onerosa, com desafios que podem incluir a gestão de lençóis freáticos e a adaptação às condições geológicas variáveis do solo. Além disso, o diâmetro do poço é um fator crítico que pode impactar negativamente na viabilidade da escavação. Por essa razão, a seleção de um material de lastro de alta densidade é preferível para maximizar a eficiência do sistema em poços de diâmetro reduzido, equilibrando as necessidades de espaço e eficiência.

Figura 36 - Esquema de Bateria Gravital Integrando Torre e Poço com Peso Singular e Geração Fotovoltaica



Fonte: (Autor)

Tabela 22 - Especificações da Bateria Gravitacional Integrando Torre, Poço e Peso Singular

Projeto 3	Materiais	Volume (m <sup>3</sup> )	Diâmetro do cilindro (m)	Altura do cilindro (m)
3a	Aço	9,417	2,00	3,00
3b	Chumbo	6.500	1,66	2,49
3c	Uranio	3.856	1,26	1,91

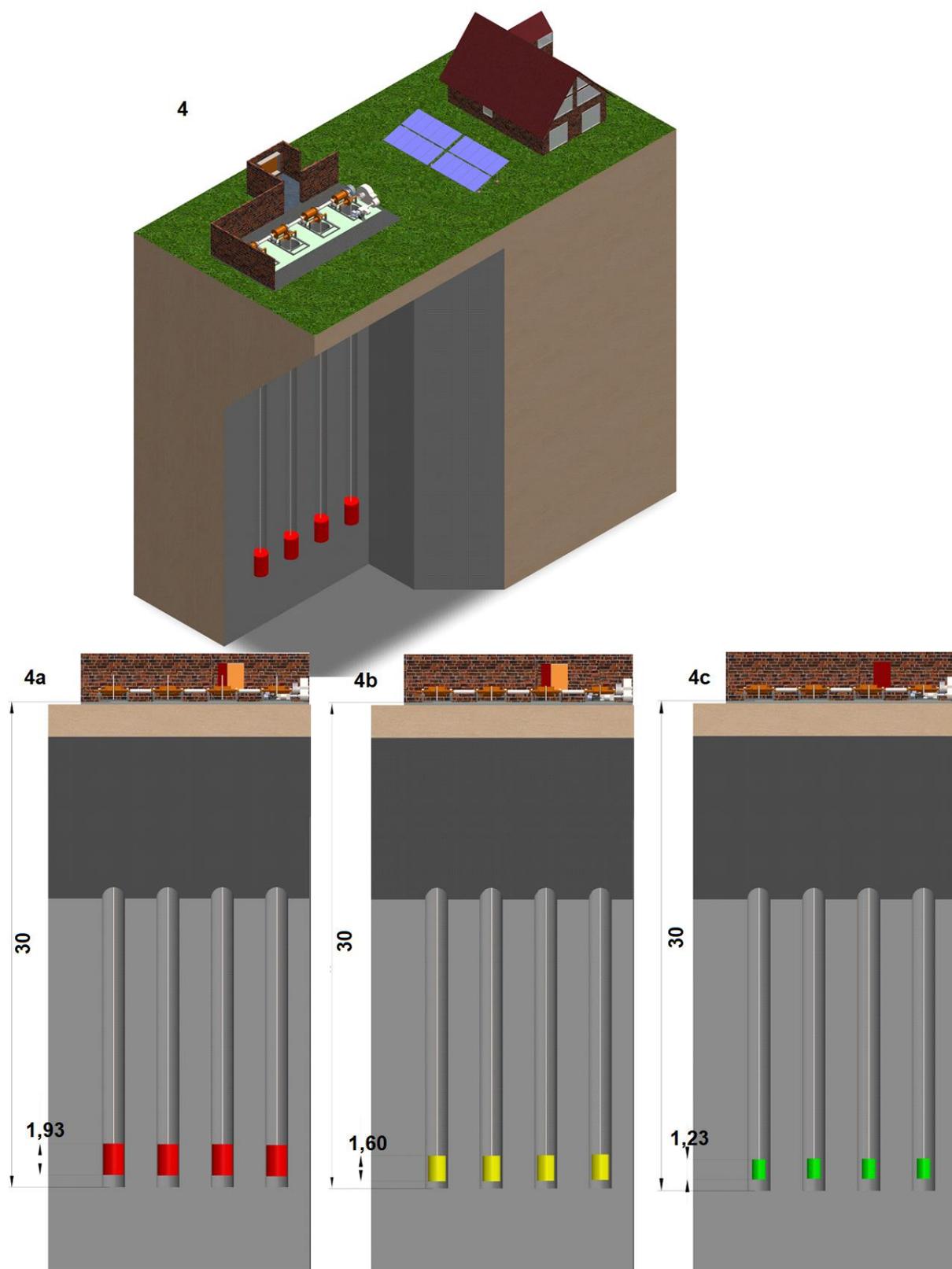
<b>Capacidade de acúmulo de energia (kWh)</b>	<b>10</b>
<b>Massa do Peso (Kg)</b>	73.469
<b>Distância curso torre (m)</b>	25
<b>Distância curso poço (m)</b>	25

Fonte: (Autor)

**Vantagem:** A principal vantagem dessa configuração é a capacidade de estender o curso de descida além do que seria possível com apenas uma torre ou um poço isoladamente. Essa abordagem híbrida permite a utilização sinérgica das características de ambos os sistemas, maximizando o potencial de geração de energia. A estrutura combinada aproveita a profundidade do poço e a altura da torre, proporcionando um curso de descida ampliado e, conseqüentemente, uma maior capacidade de armazenamento de energia potencial.

**Desvantagem:** No entanto, a implementação de um sistema que une um poço a uma torre com um único peso impõe desafios significativos em termos de design e segurança. É essencial um dimensionamento cuidadoso para assegurar a integridade estrutural da configuração combinada. Isso envolve análises rigorosas para garantir que a estrutura possa suportar as forças dinâmicas envolvidas, bem como as cargas estáticas impostas pelo peso. Além disso, a complexidade do sistema exige uma atenção especial para a manutenção e para a prevenção de falhas operacionais.

Figura 37 - Esquema de Bateria Gravital com Múltiplos Poços e Pesos Integrados à Geração Fotovoltaica



Fonte: (Autor)

**Tabela 23 - Especificações da Bateria Gravitacional com Quatro Poços e Quatro Pesos**

Projeto 4	Materiais	Volume (m <sup>3</sup> ) 4 x pesos	Diâmetro do cilindro (m)	Altura do cilindro (m)
4a	Aço	3,920	1,28	1,93
4b	Chumbo	2,706	1,07	1,60
4c	Uranio	1,605	0,82	1,23

<b>Capacidade de acúmulo de energia (kWh)</b>	<b>10</b>
<b>Massa do Peso total (Kg)</b>	122.320
<b>Massa dos pesos individuais (Kg)</b>	30.580
<b>Distância curso poços total(m)</b>	120
<b>Distância curso poços individuais (m)</b>	30

Fonte: (Autor)

**Vantagem:** A principal vantagem dessa configuração reside na simplicidade e economia da construção. A utilização de poços mais rasos e de diâmetros menores facilita o processo de escavação e reduz os custos associados. Além disso, a adoção de pesos de menor massa permite o uso de cabos mais curtos e finos, otimizando o uso de materiais e reduzindo a carga estrutural sobre o sistema. Esta abordagem também pode oferecer flexibilidade na distribuição dos poços, permitindo uma adaptação mais eficiente às condições geográficas e topográficas do local.

**Desvantagem:** Por outro lado, a implementação de múltiplos poços e pesos pode acarretar um aumento no consumo de materiais e na complexidade da caixa de máquinas. A necessidade de mais espaço lateral para acomodar vários poços pode limitar a aplicabilidade dessa configuração em áreas com restrições de espaço. Além disso, a presença de mais componentes móveis pode resultar em maior atrito e desgaste, exigindo manutenção mais frequente e potencialmente aumentando os custos operacionais. A complexidade aumentada do sistema também pode levar a desafios na eficiência energética, especialmente se o atrito e as perdas mecânicas não forem adequadamente gerenciados.

As três variantes serão submetidas a uma análise comparativa rigorosa, com o propósito de identificar a solução mais eficiente e viável para a implementação de baterias gravitacionais, considerando aspectos como custo, eficácia e impacto ambiental.

### **6.11 Possíveis Benefícios e Aplicações das Baterias Gravitacionais no Contexto do Armazenamento de Energia Renovável:**

No âmbito das baterias gravitacionais, a sua concepção e implementação adequadas podem revelar uma série de benefícios distintos em comparação com as baterias tradicionais de íon-lítio. Estas vantagens são delineadas a seguir:

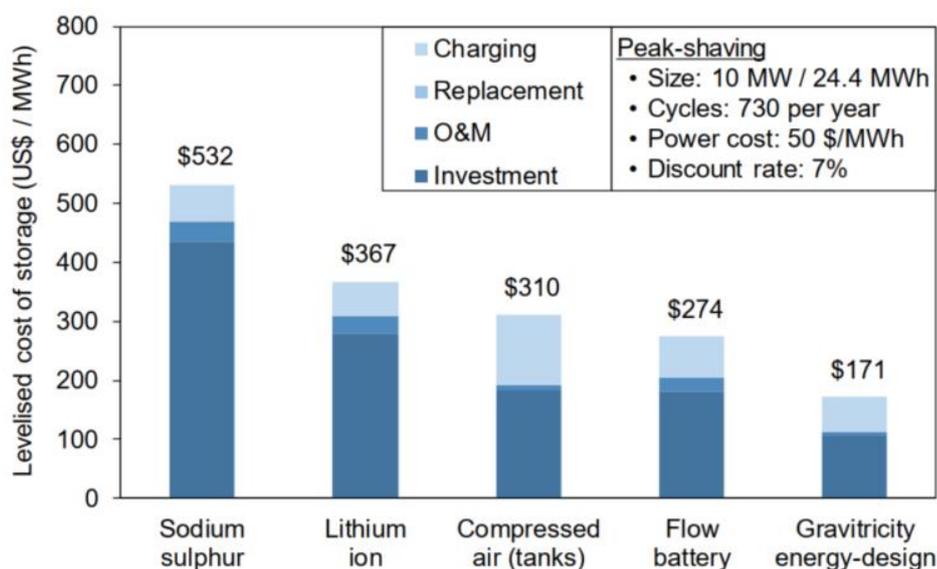
1. Longevidade Operacional Excepcional: Pesquisas conduzidas pelo Imperial College London indicam que as baterias gravitacionais possuem uma durabilidade operacional notável, ultrapassando os 25 anos sem depreciação significativa de desempenho. (CHATURVEDI, 2020)
2. Robustez Estrutural e Durabilidade Prolongada: As infraestruturas constituintes das baterias gravitacionais demonstram uma robustez considerável, com potencial para mais de meio século de funcionamento eficaz, sujeito a manutenção apropriada. Este aspecto é reforçado pela durabilidade intrínseca dos componentes principais, como o poço e a massa, que tendem a apresentar um desgaste mínimo ao longo do tempo.
3. Capacidade de Resposta Imediata: Estas baterias exibem uma capacidade de resposta quase instantânea às demandas energéticas, com tempos de reação inferiores a um segundo. Esta característica as torna particularmente adequadas para aplicações que exigem um fornecimento de energia rápido e eficiente, funcionando como sistemas de backup emergenciais. (CAMERON 2018)
4. Estabilidade de Desempenho e Mínima Degradação: Diferentemente das baterias de íon-lítio, que estão sujeitas a degradação devido a ciclos de carga e descarga, as baterias gravitacionais mantêm um desempenho consistente ao longo do tempo, sem sofrerem degradação significativa.
5. Redução de custos: Estudos realizados pela equipe Gravitricy apontam para um custo por megawatt-hora (mWh) inferior nas baterias gravitacionais em comparação com as alternativas convencionais, o que

as posiciona como uma solução custo-efetiva para armazenamento de energia em larga escala (GRAVITRICITY, TEAM 2020)

6. **Manutenção Reduzida:** Uma vez estabelecidas, estas baterias requerem manutenção mínima, contribuindo para a redução dos custos operacionais a longo prazo.
7. **Alta Eficiência Energética:** As baterias gravitacionais são capazes de alcançar eficiências elevadas, frequentemente superiores a 90%, assegurando que a maior parte da energia armazenada seja recuperável conforme a necessidade. (SMITH, 2020)

Estes atributos posicionam as baterias gravitacionais como uma alternativa promissora para o armazenamento de energia em grande escala, particularmente em contextos de energia renovável, onde a estabilidade e a disponibilidade contínua de energia são de suma importância. Contudo, é crucial reconhecer que a eficácia destas baterias depende de um planejamento meticuloso e de considerações locais específicas para assegurar a sua operacionalidade eficiente e econômica.

**Figura 38 - Análise Comparativa do Custo de Armazenamento Energético por MWh**



Fonte: (GRAVITRICITY TEAM 2020)

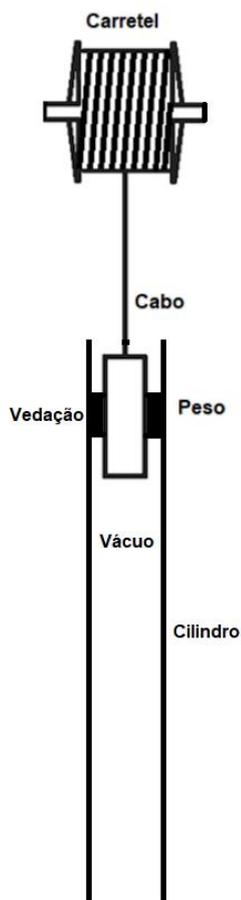
## 6.12 Abordagens Alternativas para Redução de Massa no Sistema:

Ao analisar o projeto, é visto que a massa do sistema é um dos fatores que mais dificultam a viabilidade do projeto, muita massa, além de ocupar espaços

respetivamente amplos, também podem exercer tensão na estrutura,, e dificuldade de transporte, além do preço de materiais, junto com isso, os tamanhos dos poços e torres são um problema de viabilidade, pois quanto maior a distância da massa percorrida, maior será a anergia acumulada, mas em poucas situação é possível realizar profundas escavações e confecções de grandes torres

A implementação de um ambiente de vácuo representa uma estratégia potencial para a diminuição da massa efetiva do sistema. Neste arranjo, a força gravitacional não seria a única influência sobre o peso em queda; a pressão atmosférica também exerceria uma força significativa, análoga à atuação da pressão externa em um êmbolo de seringa, impulsionando o peso em direção ao solo. Contudo, a instauração de um vácuo perfeito em um poço de grande escala apresenta desafios técnicos notáveis, demandando superfícies metálicas com polimento de alto grau, selos de borracha de qualidade superior para a manutenção da pressão e materiais resistentes ao desgaste por atrito. Adicionalmente, seria imperativo um sistema de lubrificação eficaz, embora mesmo com estas medidas, o risco de falhas nas vedações persistiria ao longo do tempo. Os custos associados à criação e manutenção de um vácuo são extremamente altas, representando uma consideração econômica significativa.

**Figura 39 - Representação Conceitual de Bateria Gravitacional com Auxílio de Força Atmosférica**

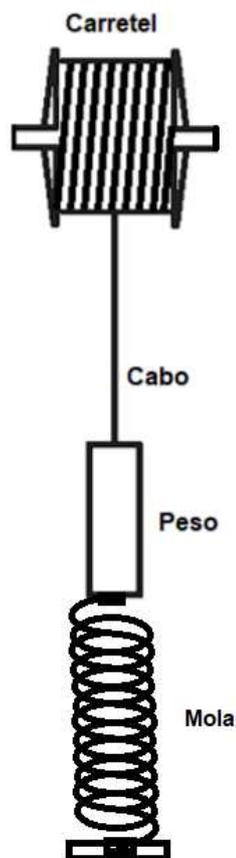


**Fonte: (Autor)**

Como alternativa, poder-se-ia considerar a utilização de molas de aço carbono de grandes dimensões para exercer uma força descendente adicional sobre o peso. No entanto, as molas estão sujeitas a limitações de durabilidade, com sua eficiência mecânica decrescendo após ciclos repetidos de tensão e relaxamento. Tal fenômeno não apenas comprometeria a longevidade operacional do sistema, mas também incrementaria a frequência de manutenções, o que é contraproducente em termos de eficiência e custo operacional.

Em última análise, a busca por um material ideal, que seja denso, menos custoso e eficaz para baterias gravitacionais, permanece um desafio. Este é um campo em constante evolução, e novas pesquisas e descobertas podem, eventualmente, levar a soluções inovadoras para esses problemas.

**Figura 40 - Representação Conceitual de Bateria Gravitacional Integrando Força Elástica de Molas**



Fonte: (Autor)

### **6.13 Desafios de Viabilidade técnica na Implementação de Baterias Gravitacionais: Análise da Massa do Sistema e Dimensionamento Estrutural**

Na avaliação do projeto de baterias gravitacionais, identifica-se que a magnitude da massa envolvida constitui um desafio significativo para a viabilidade do empreendimento. A necessidade de acomodar uma massa substancial implica em requisitos espaciais consideráveis, o que pode resultar em tensões estruturais elevadas, complicações logísticas no transporte e custos elevados associados aos materiais. Adicionalmente, a dimensão dos poços e torres emerge como um fator limitante, visto que a eficácia energética do sistema é diretamente proporcional à distância percorrida pela massa.

Entretanto, a implementação de estruturas de grande escala, como poços profundos ou torres altas, frequentemente encontra obstáculos práticos e econômicos.

Em muitos cenários, as limitações geográficas e urbanísticas restringem a possibilidade de escavações profundas ou construções elevadas. Além disso, a expansão vertical ou subterrânea em larga escala pode implicar em desafios de engenharia complexos e custos proibitivos.

Portanto, a otimização do projeto de baterias gravitacionais requer uma abordagem equilibrada que considere tanto a eficiência energética quanto as restrições práticas e econômicas. Isso pode envolver a exploração de locais geograficamente favoráveis, o uso de tecnologias inovadoras para minimizar o impacto estrutural, e a busca por soluções que equilibrem de forma eficiente a relação entre a massa do sistema, a dimensão das estruturas e a viabilidade econômica.

#### 6.14 Desafios e Soluções em Baterias Gravitacionais

1. **Densidade de Materiais:** No âmbito do desenvolvimento de baterias gravitacionais, a densidade do material utilizado para o peso emerge como um fator determinante, influenciando diretamente a capacidade de armazenamento energético do sistema. A utilização de materiais com alta densidade, como urânio empobrecido, embora potencialmente eficaz, apresenta desafios significativos em termos de custo e segurança. Portanto, a investigação contínua em busca de materiais alternativos, mais densos e acessíveis, é de suma importância.
2. **Espaço Necessário:** Adicionalmente, a implementação de baterias gravitacionais em larga escala demanda considerável espaço físico, especialmente para acomodar poços profundos e pesos de grande volume. Esta necessidade representa um desafio tanto construtivo quanto financeiro. A exploração de soluções inovadoras, como a utilização de sistemas de vácuo ou materiais mais compactos, constitui uma área de pesquisa promissora para a redução da exigência espacial.
3. **Vedações e Lubrificação:** Outro aspecto crítico é a vedação e lubrificação em sistemas que envolvem vácuo ou componentes móveis. A pesquisa em materiais de vedação de alta performance e sistemas de lubrificação eficientes é essencial para minimizar o desgaste e a

necessidade de manutenção, garantindo assim a longevidade e eficácia do sistema.

4. **Custo:** O custo de construção e implementação de baterias gravitacionais, particularmente em projetos de grande escala, é um fator limitante. A busca por materiais mais econômicos, métodos construtivos eficientes e parcerias estratégicas de pesquisa são fundamentais para a redução dos custos associados.
5. **Eficiência energética:** Embora as baterias gravitacionais apresentem altas taxas de eficiência em comparação a outras tecnologias de armazenamento de energia, ainda enfrentam perdas devido a fatores como atrito, resistência elétrica e ineficiências na conversão de energia. A otimização desses processos é um desafio contínuo para melhorar a eficiência global do sistema.
6. **Segurança:** A segurança é uma preocupação primordial, especialmente em projetos que utilizam materiais densos e potencialmente perigosos, como urânio empobrecido. Assegurar o manuseio e armazenamento seguros desses materiais é crucial para prevenir riscos ambientais e à saúde.
7. **Alternativas de Materiais:** Por fim, a pesquisa contínua em alternativas de materiais que ofereçam alta densidade, baixo custo e segurança é vital. Materiais compostos ou reciclados que atendam aos requisitos de armazenamento de energia representam um campo promissor de investigação.

A superação desses desafios é fundamental para estabelecer as baterias gravitacionais como uma solução viável e eficaz para o armazenamento de energia em larga escala. Com o avanço da pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias e materiais, é possível que essas limitações sejam progressivamente superadas, posicionando as baterias gravitacionais como um componente integral no futuro do armazenamento de energia renovável.

## **6.15 Aproveitando Construções e Explorando Hipóteses para Baterias Gravitacionais**

A abordagem de redução de custos em projetos de baterias gravitacionais através da reutilização de estruturas existentes apresenta um potencial significativo. Esta estratégia envolve a adaptação de minas abandonadas, torres antigas, penhascos naturais e outras infraestruturas similares para o armazenamento de energia.

Na Inglaterra, iniciativas promissoras estão sendo desenvolvidas em minas desativadas para a implementação de baterias gravitacionais. Estas minas, anteriormente sem valor econômico, estão sendo transformadas em recursos valiosos e funcionais. Esta abordagem oferece uma economia considerável em termos de custos de construção, aproveitando a profundidade já existente das minas para armazenar energia, (AMBROSE (2019).

No Brasil, a mina AngloGold Ashanti em Cuiabá serve como um exemplo notável. Com uma profundidade de 1100 metros, que excede a altura do Burj Khalifa, o edifício mais alto do mundo, esta mina apresenta um potencial extraordinário para a construção de uma bateria gravitacional. Com dimensionamento adequado, a capacidade de armazenamento de energia poderia alcançar a escala de megawatts, suficiente para fornecer energia não apenas para a própria mina, mas também para uma pequena cidade vizinha, como indicado por (ASHANTI, 2022).

Além das minas, grandes torres também são consideradas para a implementação de baterias gravitacionais. O Brasil abriga a maior torre de pesquisa da América do Sul, o Observatório de Torre Alta da Amazônia, com 325 metros de altura. Se a estrutura for suficientemente resistente, poderia ser um local ideal para pesquisas e experimentos em baterias gravitacionais. (SIMI, 2022).

Outra possibilidade é a implementação de baterias gravitacionais em plataformas marítimas. No entanto, essa abordagem requer análises detalhadas para enfrentar desafios como a corrosão salina dos materiais e o impacto do empuxo marítimo na eficiência do sistema.

Portanto, a exploração de estruturas já existentes oferece uma oportunidade empolgante para tornar a tecnologia de baterias gravitacionais mais acessível e sustentável, adaptável a diferentes contextos geográficos e infraestruturas.

## **6.16 Viabilidade Econômica para a Construção de um Projeto de Armazenamento Gravitacional**

A implementação de uma estrutura para armazenamento gravitacional, seja através da construção de uma torre ou escavação de um poço, representa um investimento significativo. Este custo elevado é atribuído principalmente à necessidade de estruturas robustas capazes de suportar o peso substancial do sistema. A escolha entre a construção de uma torre, a escavação de um poço, ou a combinação de ambos, é frequentemente a parcela mais onerosa do projeto, excluindo o uso potencial de metais densos e mais caros, como urânio empobrecido ou chumbo. Interessantemente, o uso de materiais mais densos, como o urânio, pode reduzir a necessidade de diâmetro de perfuração, potencialmente economizando recursos.

O lastro, um componente crítico do sistema, com uma massa estimada de 73 toneladas, também incide em custos significativos. A escolha do material para o lastro varia amplamente em termos de custo: ferro sucata pesado maciço pode custar cerca de R\$ 0,50 por kg, enquanto aço inoxidável nobre pode alcançar R\$ 3,30 por kg. A sucata de chumbo pode ser adquirida por aproximadamente R\$ 5,50 por kg, e lingotes novos de chumbo podem custar até R\$ 30,00 por kg. O urânio empobrecido, uma opção mais especulativa para o projeto, tem um custo estimado de R\$ 2.120,00 por kg.

É importante considerar que a aquisição de grandes quantidades de material pode resultar em reduções de custo devido à alta demanda. Além disso, a casa de máquinas, que deve ser construída com materiais de alta resistência, representa outro custo significativo. Para garantir a viabilidade econômica do sistema, é essencial que a estrutura seja projetada para durar 25 a 50 anos, ou até mais, superando a vida útil de baterias de íon-lítio de capacidade semelhante.

A central de controle, composta por transformadores, inversores e controladores, também envolve investimentos consideráveis. Embora o custo dos painéis solares não seja o foco principal desta análise, é relevante notar que em um sistema de geração com baterias, as placas solares seriam um componente necessário.

Para fins comparativos, uma bateria de íon-lítio de backup da empresa Sol Lares, com capacidade de armazenamento de 10 kWh, custa R\$ 27.353,00 e possui

uma vida útil média de 10 anos. Uma análise mais detalhada dos custos pode incluir incentivos financeiros, créditos de carbono e considerações sobre os impactos ambientais associados à extração de lítio.

### **6.17 Integração de Projetos de Armazenamento de Energia Gravitacional no Mercado de Carbono:**

A integração de projetos de armazenamento de energia gravitacional no mercado de carbono exige uma compreensão aprofundada e uma abordagem metodológica rigorosa. Este processo multifacetado envolve etapas críticas, delineadas por protocolos internacionais e padrões de mercado de carbono, para garantir a sustentabilidade ambiental e a viabilidade econômica do projeto.

1. **Análise do Mercado de Carbono:** O mercado de carbono é dividido em dois segmentos principais: o mercado regulamentado, sob protocolos como o Protocolo de Quioto, e o mercado voluntário. No mercado regulamentado, as nações ou grandes emissores são obrigados a cumprir metas de redução de emissões, enquanto no mercado voluntário, entidades privadas adquirem créditos de carbono para compensar suas emissões de forma voluntária (STAVINS, 2008).
2. **Desenvolvimento de Projetos Ambientalmente Sustentáveis:** Projetos como baterias gravitacionais, que buscam armazenar energia de forma eficiente e sustentável, podem se qualificar para créditos de carbono, desde que demonstrem uma redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em comparação com um cenário de linha de base (MICHAELOWA, 2005).
3. **Validação por Entidades Externas:** A validação do projeto por uma organização independente e credenciada é crucial para assegurar a viabilidade, sustentabilidade e a autenticidade das reduções de emissões propostas (WARNECKE, 2014).
4. **Registro em Padrões de Carbono Reconhecidos:** É imperativo registrar o projeto em um padrão de carbono estabelecido, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), Verra (Verified Carbon Standard), ou Gold Standard. Esses padrões fornecem critérios específicos e

metodologias para a quantificação das reduções de emissões (Olsen & FENHANN, 2008).

5. Implementação e Monitoramento Conforme Metodologia Aprovada: Após o registro, o projeto é implementado e suas emissões são monitoradas de acordo com a metodologia aprovada pelo padrão de carbono selecionado (SCHNEIDER, 2009).
6. Verificação e Emissão de Créditos de Carbono: Uma entidade independente realiza verificações periódicas para confirmar as reduções de emissões. Após a verificação, os créditos de carbono são emitidos, geralmente sob a forma de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) (GILLENWATER, 2012).
7. Comercialização dos Créditos: Os créditos gerados podem ser comercializados no mercado de carbono. No mercado voluntário, empresas que buscam neutralizar suas emissões podem adquirir esses créditos (KOLLMUSS 2010).

Para um projeto de baterias gravitacionais, é essencial demonstrar como ele contribui para a redução das emissões de GEE em comparação com métodos convencionais ou menos eficientes de armazenamento de energia. Isso pode incluir a substituição de fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, a otimização do uso de energia renovável, ou a redução da necessidade de expansão de infraestruturas energéticas tradicionais (HEPBURN, 2019).

O processo de obtenção de créditos de carbono é complexo e requer conhecimento especializado em medição e verificação de emissões de GEE, além de uma compreensão aprofundada das regulamentações e padrões do mercado de carbono. A consulta a especialistas em mercado de carbono e sustentabilidade é recomendada para orientação e assistência no processo (BUMPUS, 2008).

## 7 CONCLUSÃO

Este estudo aborda a investigação da eficácia de um sistema de armazenamento de energia, denominado bateria gravitacional. Aplicou-se uma metodologia interdisciplinar que integra conceitos de engenharia mecânica, elétrica e ciência dos materiais, foi concebido e modelado um sistema que explora a energia potencial gravitacional para o armazenamento de energia elétrica. O *design* do sistema baseia-se na construção de um poço equipado com um lastro de massa considerável, de aproximadamente 73 toneladas acoplado a um sistema de cabos e polias, e vinculado a um gerador de velocidade variável para a transmutação de energia mecânica em elétrica.

A análise conceitual e os cálculos executados evidenciaram a viabilidade técnica do sistema proposto apesar de não ser realizada construção de um protótipo. A seleção criteriosa de materiais, o dimensionamento preciso do poço e do lastro, juntamente com a escolha adequada dos componentes mecânicos e elétricos, foram cruciais para assegurar a eficiência operacional e a segurança do sistema. A modelagem tridimensional forneceu uma representação detalhada do projeto, facilitando a compreensão das interações entre os componentes e identificando desafios potenciais para a implementação prática.

Os resultados alcançados sugerem que a bateria gravitacional é uma solução promissora para o armazenamento de energia, particularmente em contextos onde a geração de energia é intermitente, como ocorre com as fontes renováveis. Sua capacidade de armazenar energia em períodos de excesso e liberá-la conforme a demanda contribui significativamente para a estabilização da rede elétrica e para a diminuição da dependência de fontes energéticas não renováveis.

É crucial enfatizar que apenas por meio de experimentações empíricas concretas é possível realizar estimativas realistas das perdas de eficiência, enfrentar desafios construtivos, compreender as dificuldades inerentes aos processos de escavação, e abordar variáveis como influências eólicas e problemas nas conversões elétrica e mecânica, entre outros aspectos. Tais adversidades devem ser meticulosamente consideradas em estudos práticos de viabilidade, os quais demandam a construção de protótipos e a coleta de dados empíricos do sistema em operação. Este enfoque prático é essencial para validar a aplicabilidade e a eficácia

do sistema proposto, garantindo uma análise abrangente e realista de seu desempenho sob condições operacionais variadas.

No entanto, é imperativo destacar que o projeto demanda investigações adicionais em aspectos como análise de custo-benefício, avaliação de impactos ambientais. Futuras pesquisas devem se concentrar na otimização do design, na redução de custos e na escalabilidade do sistema, com o objetivo de adaptá-lo a diferentes contextos e escalas de aplicação.

No cenário internacional, observa-se um avanço significativo no campo das baterias gravitacionais, com projetos de grande escala em desenvolvimento nos Estados Unidos, especificamente no Texas, e nas proximidades de Xangai, na China. Estes projetos são liderados pela empresa Energy Vault, que está investindo em sistemas de armazenamento de energia gravitacional de grande porte. Estes sistemas parecem basear-se na utilização de múltiplos pesos e estruturas predominantemente aéreas, embora possam incluir também componentes subterrâneos. (MALAYIL 2023)

**Fotografia 4 - Bateria Gravitacional de Grande Escala com Múltiplos Pesos na China.**



(MALAYIL. 2023)

A escassez de informações detalhadas sobre projetos de grande escala pode ser atribuída à proteção de propriedade intelectual, como patentes, que resguardam as inovações técnicas e estratégicas desses sistemas. Apesar dessa limitação no acesso a informações completas, as construções observadas indicam um potencial promissor. Estes empreendimentos representam um marco no desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia, demonstrando um interesse crescente e

investimentos substanciais no aproveitamento da energia potencial gravitacional como uma solução viável e sustentável para os desafios do armazenamento de energia em larga escala. A evolução desses projetos pode ser um indicativo importante para o futuro da tecnologia de armazenamento de energia gravitacional e seu papel no panorama energético global.

Em resumo, este trabalho representa um avanço no campo de estudo sobre o armazenamento de energia, propondo uma alternativa viável conceitualmente e sustentável para o desafio global de integrar fontes renováveis na matriz energética. Assim a bateria gravitacional emerge como uma tecnologia promissora, com potencial para desempenhar um papel fundamental na transição para um futuro energético mais limpo e sustentável.

## REFERÊNCIAS

ABDULGAFAR, Sayran A.; OMAR, Omar S.; YOUSIF, Kamil M. Improving the efficiency of polycrystalline solar panel via water immersion method. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, v. 3, n. 1, p. 8127-8132, 2014.

ABECOM. Engrenagem: Tipos e Aplicações. 2020.

ABEEólica Associação Brasileira de Energia Eólica. Relatório Anual. 2021.

ALONSO, Rodrigo. O relógio de pêndulo. Museu de Astronomia e Ciências Afins, 1999.

AMARAL, Luciano do. A química: eletroquímica. São Paulo: Loyola, 1995.

AMBROSE, Jillian. How UK's disused mine shafts could be used to store renewable energy: Gravitricity develops winch and hoist system to store energy at half the cost of lithium-ion batteries. *The Guardian*, 2019.

ANDRADE, CARLOS ROBERTO MONTEIRO; ZAIAT, Marcelo. Engenharia, natureza e recursos naturais. 2013.

AQUINO, Eduardo. BATERIAS Gravitacionais, o FUTURO do Armazenamento de ENERGIA Chegou. 2022.

ASHANTI, Anglo Gold. Unidades operacionais: empresa de mineração. Cuiabá, 2022.

ASSIS, Alice. ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE O ENSINO E A APRENDIZAGEM DO CONCEITO DE ENERGIA. SCIELO, 2002.

ASSIS, Aline. Aplicação do Princípio da Indução Magnética: Gerador Elétrico. 2015.

ATKINS, Peter; LAVERMAN, Leroy; JONES, Loretta. Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente. 7ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2018, 830 p.

BARNHART, Charles J.; BENSON, Sally M. On the importance of reducing the energetic and material demands of electrical energy storage. *Energy & Environmental Science*, v. 6, n. 4, p. 1083-1092, 2013.

BBC NEWS. Entrada de água, curto-circuito e princípio de incêndio: a emergência a bordo do submarino ARA San Juan. 2017.

BBC. Can gravity batteries solve our energy storage problems? BBC Future 2022.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, 2011.

BERMANN, Célio. CRISE AMBIENTAL E AS ENERGIAS RENOVÁVEIS. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 2008.

BERMÚDEZ-RODRÍGUEZ, Tatiana. Uma abordagem da dinâmica do desenvolvimento científico e tecnológico das baterias lítio-íon para veículos elétricos. SciELO, 2020.

BONSOR, K. How Hydropower Plants Work. How Stuff Works, 2001.

BRAGA, Renata Pereira. Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações. 2008.

BUCUSSI, Alessandro. INTRODUÇÃO AO CONCEITO DE ENERGIA. UFRGS, 2006.

BUMPUS, A.G.; LIVERMAN, D.M. "Accumulation by decarbonization and the governance of carbon offsets". Economic geography. 2008 Apr;84(2):127-155. doi: 10.1111/j.1944-8287.2008.tb00401.x

CABRAL, Ricardo Pereira. Os U-boot na Primeira Guerra Mundial. História Militar em Debate, 2022.

CAMERON, Greig. Funding gives weight to Gravitricity's idea for storing energy. The Times, 2018.

CAMPOS, Felipe Melo. TECNOLOGIAS E APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA PARA SUPORTE À INTEGRAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS NO BRASIL. SENAI CIMATEC, 2022.

CBIE - Centro Brasileiro de Infraestrutura (CBIE). O que são hidroelétricas reversíveis? 2020.

CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Termodinâmica. McGraw-Hill Education, 2015.

CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA – CBEE / UFPE. 2000.

CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª ed. Porto Alegre: Adbr, 2013.

CHATURVEDI, D.K. et al. Electricity storage system: A Gravity Battery. In: 4th World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4), 2020, London. Proceedings. London: IEEE, 2020.

DREAMSTIME. Polias e Cabos do Guindaste. 2023.

EINSTEIN, Albert. On a heuristic point of view concerning the production and transformation of light. *Annalen der Physik*, p. 1-18, 1905.

ENERGÊS. COMO CALCULAR A POTÊNCIA HIDRELÉTRICA. 2020.

Energy Storage Association. Energy Storage Trends and Opportunities. [S.l.]: Energy Storage Association, [s.d.], 2023

ENGENHARIA DETALHADA. As BATERIAS GRAVITACIONAIS são o FUTURO do ARMAZENAMENTO de ENERGIA? 2022.

EUGENE A. Avallone et al. (ed). Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 11th Edition. Mc-Graw Hill, New York, 2007.

FADIGAS, A. Eliane Aparecida Faria Amaral. Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnico-econômica. 2000.

FARIAS, L. M.; SELBITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. *Revista Liberato*, v. 12, n. 17, p. 07–16, 2013.

FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A. T. Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences. John Wiley & Sons, 2015.

FIGUEIREDO, Filipe Papa de. Armazenamento de Energia Solar e Eólica por Usinas Hidráulicas Reversas: Uma Solução para o Brasil?. PUC-Rio, 2021.

FLORA ENERGIA (Brasil). Descubra o que é kWh e como funciona o cálculo em sua conta de energia! 2022.

FLORENTINO, Carmen Rosa Rabelo et al. As equações presentes no cálculo de um micro aerogerador eólico. ANAIS DA MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CESUCA-ISSN, 2016.

FONSECA, Paulo Henrique Santos da. Validação de equações de predição da taxa metabólica de repouso em adolescentes. UFSC, 2007.

FONTANA, Clarissa Peres. A EVOLUÇÃO DO TRABALHO: DA PRÉ-HISTÓRIA ATÉ AO TELETRABALHO. 2021.

GALBIATTI-SILVEIRA, Paula. Energia e mudanças climáticas: impactos socioambientais das hidrelétricas e diversificação da matriz energética brasileira. SciELO, 2018.

GILLENWATER, Michael; SERES, Stephen. The Clean Development Mechanism: a review of the first international offset programme. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, v. 1, n. 3-4, p. 179-203, 2011.

GRAVITRICITY TEAM. Latest Gravitricity Explainer Extended Animation Spring 2020. 2020

GWEC, Global Wind Energy Council . Global Wind Report 2021. 2021.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. 10ª ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2016, vol 4.

HÉMERY, Daniel; BEBIER, Jean Claude; DELÉAGE, Jean-Paul. Uma História da Energia. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1993.

HEPBURN, C.; ADLEN, E.; BEDDINGTON, J. et al. "The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal". Nature, 575, 87–97, 2019

HEYWOOD, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. 1988.

HIRATA, Ricardo. As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. 2019.

HUGGINS, R. A. Energy Storage. New York: Springer, 2010.

IEA Agência Internacional de Energia. Renewables. 2020.

IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Renewable Energy Market Update 2021. 2021.

IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Renewable Energy Market Update 2020. 2020.

IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Wind Energy Report 2020. 2020.

IHA, INTERNATIONAL HYDROPOWER ASSOCIATION. Hydropower Status Report. 2021.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. 2018.

IPH (São Paulo). Cabos de aço para USO GERAL. 2016.

IRENA, INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Abu Dhabi: IRENA, 2012.

ITA HOIST. Guincho elétrico de cabo de aço JM. 2022.

JACOBSON, Mark Z. 100% clean, renewable energy and storage for everything. Cambridge University Press, 2020.

JANNUZZI, Gilberto de Martino. Geração distribuída e eficiência energética: Curva de carga do consumo residencial médio no Brasil e do potencial de geração distribuída solar. 2018.

JCL Cabos. Inspeção de cabos de aço: A NBR 4309. 2023.

JONES, P.; UNDERWOOD, C. Solar Energy in Buildings: Thermal Balance for Efficient Heating and Cooling. Elsevier, 2016.

KALDELLIS, J.K.; ZAFIRAKIS, D. The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. Renewable Energy, v. 36, n. 7, p. 1887-1901, 2011.

LEITÃO, Ulisses Azevedo. Barco a vela: um pouco de história. UFMG, 1998.

LEITE, Nelson. Os desafios do armazenamento de energia no setor elétrico. ABRADÉE, 2017.

LOPES, Edilton José et al. Fusão nuclear na produção de energia do Sol: uma possibilidade do tunelamento quântico e um caminho promissor para o planeta. 2023.

LORENTINO, C. R. R. Energia Eólica: Princípios e Tecnologias. Editora Varela, 2016.

MACKAY, D. J. C. Sustainable Energy - Without the Hot Air. UIT Cambridge, 2009.

MALAYIL, Jijo. Two massive gravity batteries are nearing completion in the US and China. Interesting Engineering, 2023.

MANDAGUAI. Diferenças entre um poço revestido e o não revestido. 2015.

MATTEDE, Henrique. Entenda como funciona um aerogerador. Mundo Elétrica, 2023.

MICHAELOWA, A.; JOTZO, F. Transaction costs, institutional rigidities and the size of the clean development mechanism. Energy Policy 33(4):511–523, 2005.

MURDOCK, Hannah E. et al. Renewables 2021-global status report. 2021.

NATIONAL GEOGRAPHIC (org.). See the 1,000-Year-Old Windmills Still in Use Today. 2017.

NIETZSCHE, Friedrich. Assim falava Zaratustra. Nova Fronteira, 2011.

OLSEN, Karen Holm; FENHANN, Jørgen. Energy Policy, 2008, vol. 36, issue 8, 2773-2784.

OSMARI, Rafael Henrique. Estudo de viabilidade econômica na aplicação do método de corte de pico em unidade consumidora industrial utilizando-se um banco de baterias de Íon-Lítio. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2022.

OZIN, Geoffrey. Gravity energy storage elevated to new heights. Advance Science News, 2022.

PEAKE, Stephen et al. Renewable energy-power for a sustainable future. OXFORD University Press, 2018.

PORTAL SOLAR (Brasil). Quanta energia produz um painel solar? 2022.

PROCEL/Eletróbrás. Informações técnicas. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética, 2005.

REIS, Pedro. Funcionamento de um aerogerador. Portal Energia, 14 abr. 2016.

Renewable Energy: Power for a Sustainable Future. 2012.

ROCHA, Ana Luiza Cordeiro Duarte. Armazenamento de Energia por Gravidade: inovação. Gravitricity, 2022.

ROSOLEM, Maria de Fátima N. C. DESENVOLVIMENTO DE BATERIA DE LÍTIO-ÍON NACIONAL PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018.

ROUMASSET, J.A.; WADA, C.A. Poço Artesiano. In: Enciclopédia de Economia de Energia, Recursos Naturais e Meio Ambiente. [S.l.]: [s.n.], 2013.

RUOSO, A. C.; CAETANO, N. R.; ROCHA, L. A. O. Storage gravitational energy for small scale industrial and residential applications. Inventions, v. 4, n. 4, p. 64, 2019.

SAMPAIO, Luciano Menezes Bezerra; RAMOS, Francisco S.; SAMPAIO, Yony. Privatização e eficiência das usinas hidrelétricas brasileiras. Economia Aplicada, v. 9, p. 465-480, 2005.

SCHARF, C. Gravity's Engines: How Bubble-Blowing Black Holes Rule Galaxies, Stars, and Life in the Cosmos. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2012.

SCHNEIDER, Lambert et al. Is the CDM fulfilling its environmental and sustainable development objectives? An evaluation of the CDM and options for improvement. 2007.

SILVA, A. L. da. Eficiência e Praticidade no Armazenamento Energético. Revista de Tecnologia Aplicada, v. 10, n. 2, p. 45-60, 2021.

SILVA, Gabriel Albuquerque Fernandes da. Estudo de viabilidade de sistemas de geração e armazenamento de energia elétrica em residências unifamiliares no estado de São Paulo. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação).

SILVA, Rogério Diogne de Souza e. UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS NO SETOR ELÉTRICO E AS PERSPECTIVAS PARA O BRASIL. 2021.

SILVA, V. P. da; Moura, P. S.; de Almeida, A. T. The role of large-scale energy storage systems in future energy systems: A case study for Portugal. *Energy*, v. 137, p. 787-797, 2017.

SIMI, Sistema Mineiro de Inovação. Brasil tem a maior torre de pesquisa ambiental da América do Sul. 2017. Inpa.

SMITH, Brett. What is Gravitricity's Gravity-Based Energy Storage System? ANZO CLEAN TACH, 2020.

SMITH, J. *Electrical Engineering: Principles and Applications*. Pearson Education, 2018.

SOLAR, Portal. Mapa de radiação solar no Brasil. 2019.

SOVACOOOL, B.K. The socio-environmental impacts of lithium extraction and processing. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 2020.

SPEIGHT, James G.; EL-GENDY, Nour Shafik. *Introduction to petroleum biotechnology*. Gulf Professional Publishing, 2017.

STAVINS, Robert N. "A Meaningful U.S. Cap-and-Trade System to Address Climate Change." *Harvard Environmental Law Review* 32 (2008): 293–371.

STEFFEN, Bjarne; SCHMIDT, Tobias S. A quantitative analysis of 10 multilateral development banks' investment in conventional and renewable power-generation technologies from 2006 to 2015. *Nature Energy*, v. 4, n. 1, p. 75-82, 2019.

TARASCON, J.-M.; ARMAND, Michel. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature*, v. 414, n. 6861, p. 359-367, 2001.

TCHOUNWOU, Paul B. et al. Heavy metal toxicity and the environment. *Molecular, clinical and environmental toxicology: volume 3: environmental toxicology*, p. 133-164, 2012.

TEAM, Gravitricity. *Underground energy storage: fast, long-life energy storage*. 2022.

TWIDELL, J.; Weir, T. *Renewable Energy Resources*, 2015.

TWIDELL, John. *Renewable energy resources*. Routledge, 2015.

U.S. Department of Energy (EUA). *Uranium and Thorium CRM's: price list*. 2021.

U.S. Energy Information Administration (EIA). *Most pumped storage electricity generators in the U.S. were built in the 1970s - Today in Energy*.

VASCONCELOS, Filipe Matos de. *Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica*. 2017.

WARNECKE, Carsten. Can CDM monitoring requirements be reduced while maintaining environmental integrity?. *Climate Policy*, v. 14, n. 4, p. 443-466, 2014.

WEBER, Paige. Intermittency or Uncertainty? Impacts of Renewable Energy in Electricity Markets: Matt Woerman. CESifo, 2022.

Weinstein, L. A.; Loomis, J.; Bhatia, B.; Bierman, D. M.; Wang, E. N.; Chen, G. Concentrating Solar Power. *Chemical Reviews*, v. 115, n. 23, p. 12797-12838, 2015.

WILLIAMS, J. H. et al. The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: the pivotal role of electricity. *Science*, v. 335, n. 6064, p. 53-59, 2012.

WORDPRESS. Gravity Battery. TheLibraryAssociation, 2015.

WORLD CARGO NEWS. Putting speed into context. 2017.

WORLD COMMISSION ON DAMS. Dams and Development: A New Framework for Decision-Making. 2020.

WORLD ECONOMIC FORUM. How gravity batteries will help us switch to renewable energy. 2022.

WORLD ENERGY COUNCIL. World Energy Resources 2021: Hydropower. 2021.