



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS SOBRAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

EDÊNIO ZACARIAS GALVÃO COSTA

**ASPECTOS GERAIS SOBRE TECNOLOGIAS PARA ARMAZENAMENTO DE
ENERGIA E SUAS DIVERSAS APLICAÇÕES**

SOBRAL

2023

EDÊNIO ZACARIAS GALVÃO COSTA

ASPECTOS GERAIS SOBRE TECNOLOGIAS PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
E SUAS DIVERSAS APLICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Isaac Rocha Machado.

SOBRAL

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C871a Costa, Edênio Zacarias Galvão.
ASPECTOS GERAIS SOBRE TECNOLOGIAS PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA E
SUAS DIVERSAS APLICAÇÕES SOBRAL 2023 / Edênio Zacarias Galvão Costa. – 2023.
81 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Isaac Rocha Machado.
1. Armazenamento de energia. 2. Transição energética. 3. Descarbonização. 4. Energias renováveis. I.
Título.

CDD 621.3

EDÊNIO ZACARIAS GALVÃO COSTA

ASPECTOS GERAIS SOBRE TECNOLOGIAS PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA
E SUAS DIVERSAS APLICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 07/12/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Isaac Rocha Machado (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Marcelo Marques Simões de Souza
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Juan Carlos Pequeña Suni
Universidade Federal do Ceará (UFC)

À minha família, por sempre acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela vida e pelas bênçãos concedidas.

Aos meus pais, Edna e Galvão, que não mediram esforços e sempre me deram oportunidades. Além disso, forneceram todo o apoio necessário, seja financeiro ou afetivo, até mesmo nos momentos mais difíceis, os quais me levaram a querer desistir.

Ao meu irmão e primo, Edenisio e Amadeus, que nos momentos em que eu estava desanimado e buscava uma conversa, estiveram presentes para dar apoio, força, acreditando e incentivando.

Ao meu tio e prima, Edilberto e Jane, nunca esperei que fariam tanto por mim, sendo difícil agradecer somente com um “Obrigado!”.

É difícil expressar tamanha gratidão após tantos feitos. Vocês foram os responsáveis por tornar essa caminhada realmente recompensadora, sendo minha fonte de energia para recuperar as energias.

Ao Prof. Dr. Isaac Rocha Machado que aceitou me orientar, pensando em algo diferente que pudesse trazer um diálogo importante e inovador para a comunidade acadêmica e sociedade. Grato pela paciência e pela disponibilidade.

Não poderia deixar de mencionar o Prof. Dr. Eber de Castro Diniz, cujas aulas e orientações moldaram minha trajetória acadêmica. Obrigado também pelas conversas e conselhos quando foram necessários.

Hayllan Macedo e Wagner Felipe, vocês são irmãos de outra mãe. Estiveram presentes durante todo esse período todo o tempo, do início ao fim.

Meus amigos e colegas de curso, Adriano Tavares, Joan Kennedy, Eli Marques, Jardel Azevedo, Raphael Rocha, Marcelo Estevão, Éric Vinicius e Biatriz Fontenele, merecem um agradecimento especial por compartilharem as alegrias e desafios desta jornada acadêmica comigo. Além disso, me abraçaram e acolheram em uma cidade desconhecida para mim.

A todos os profissionais que tive o prazer de conviver no meu tempo de estágio na ENEL Ceará, em especial para a Aparecida Melo que me acolheu como um filho. Essa etapa foi definitivamente uma experiência enriquecedora.

Peço desculpas se deixei de mencionar alguém, pois inúmeras pessoas contribuíram de maneira direta ou indireta durante essa trajetória.

A todos vocês, o meu mais sincero obrigado por fazerem parte desta jornada acadêmica e de vida.

“Um sonho sonhado sozinho é um sonho. Um sonho sonhado junto é realidade.”

(Yoko Ono)

RESUMO

O armazenamento de energia desempenha um papel fundamental na transição energética para fontes renováveis de geração e na melhoria da confiabilidade dos sistemas de fornecimento. Este trabalho traz uma revisão bibliográfica das tecnologias de armazenamento de energia que estão moldando o futuro do setor energético. O estudo começa destacando a crescente importância do armazenamento de energia para a integração de fontes intermitentes, como a energia solar e eólica, na matriz energética. Assim, traz o contexto e motivação para tratar sobre o assunto que muito é discutido na atualidade. Aborda também as tecnologias para armazenamento de energia como alternativas promissoras, trazendo o avanço da implementação dos sistemas, assim como suas características, como eficiência, tempo de resposta, dentre outras. Além disso, traz as aplicações dessas tecnologias, incluindo o armazenamento de energia em larga escala para o suporte a rede, o armazenamento distribuído em sistemas residenciais e a mobilidade elétrica. Por fim, ressalta-se que o armazenamento de energia como uma peça fundamental na transição energética para atendimento das crescentes demandas de um mundo cada vez mais dependente de fontes renováveis, além de trazer também algumas perspectivas no setor.

Palavras-chave: Armazenamento de energia. Descarbonização. Energias renováveis. Transição energética.

ABSTRACT

Energy storage plays a key role in the energy transition to renewable energy sources and improving the reliability of energy supply systems. This work addresses energy storage technologies that are shaping the future of the energy sector. The study begins by highlighting the increase in demand for electrical energy and the growing importance of energy storage for the integration of intermittent sources, such as solar and wind energy, into the energy matrix. Thus, it brings context and motivation to deal with the subject that has been discussed a lot today. The text also addresses energy storage technologies as promising alternatives, bringing advances in the implementation of systems, characteristics, such as efficiency, response time and others. Furthermore, the dissertation brings applications for these technologies, including large-scale energy storage to support the grid, distributed storage in residential systems and electric mobility. In conclusion, the work highlights that energy storage is a fundamental part of the energy transition to meet the growing demands of a world increasingly dependent on clean and reliable energy sources, also bringing some perspectives in the sector and proposals for future work.

Keywords: Energy storage. Decarbonization. Renewable energy. Energy transition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Consumo de energia elétrica no Brasil entre 2019-2050	13
Figura 2 – Matriz de energia elétrica brasileira	14
Figura 3 – BESS adicionado no mundo entre 2015 e 2021.	18
Figura 4 – Potência instalada em operação no Brasil	20
Figura 5 – Panorama de usinas no Brasil	21
Figura 6 – Circuito simplificado de bateria	24
Figura 7 – Ciclo de carga e descarga de um perfil de potência	27
Figura 8 – Classificação dos sistemas de armazenamento	29
Figura 9 – Comparação entre potência e tempo de descarga	30
Figura 10 – Densidade de energia <i>versus</i> Densidade de energia específica	31
Figura 11 – Densidade de energia específica <i>versus</i> Densidade de potência	31
Figura 12 – Tecnologias para veículos elétricos	32
Figura 13 – Eficiências <i>versus</i> Ciclo de vida	33
Figura 14 – Diferentes formas para o FESS	34
Figura 15 – Diagrama de um FESS	35
Figura 16 – Diagrama simplificado de um PHS	37
Figura 17 – Diagrama CAES e princípio de operação	38
Figura 18 – Crescimento TESS, 2021 a 2030 (US\$ Bilhões)	39
Figura 19 – Topologia de planta solar térmica	41
Figura 20 – Capacitor convencional vs Supercapacitor	43
Figura 21 – Resistividade <i>versus</i> Temperatura	44
Figura 22 – Esquemático de um sistema SMES	45
Figura 23 – Processo de produção do Hidrogênio	46
Figura 24 – Baterias primárias e secundárias	49
Figura 25 – Comparativo de densidades entre primárias e secundárias	49
Figura 26 – Comparação das químicas de Íons de Lítio	51
Figura 27 – Modelos de carros elétricos e química aplicada	51
Figura 28 – Estrutura da bateria de fluxo	52
Figura 29 – Estrutura de bateria e princípio de operação	53
Figura 30 – Faixa de tensão para operação de bateria	54
Figura 31 – Curvas de descarga	55

Figura 32 – Temperatura <i>versus</i> Capacidade	55
Figura 33 – Autodescarga <i>versus</i> Tempo	56
Figura 34 – Capacidade em ampére hora a diferentes regimes de descarga	57
Figura 35 – Queda de frequência e restauração	59
Figura 36 – Corte de pico	59
Figura 37 – Nivelamento de carga	59
Figura 38 – Usina Hidrelétrica Reversível de Bath County	61
Figura 39 – Complexo Henry Burden	62
Figura 40 – Usina elevatória de Pedreira	62
Figura 41 – Usina elevatória de Traição	63
Figura 42 – Localização da UHR Assunção	64
Figura 43 – Componentes da UHR Assunção	64
Figura 44 – Planta de 20MW para regulação de frequência da Beacon Power	65
Figura 45 – Vista aérea da planta CAES de Huntorf	66
Figura 46 – Vista da planta CAES de McIntosh	66
Figura 47 – Usina heliotermica AndaSol I	67
Figura 48 – Usina heliotermica da CESP	68
Figura 49 – BESS 285 MWh Semdcorp em Singapura	70
Figura 50 – BESS ISA CTEEP	70
Figura 51 – Volvo EX30	71
Figura 52 – Aviões da Airbus ZEROe	72
Figura 53 – Lavo Green Energy Storage System	72
Figura 54 – Diagrama do sistema Lavo	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Os 10 principais projetos futuros de armazenamento de energia	19
Tabela 2 – Potência instalada e número de projetos por tecnologia no mundo.	20
Tabela 3 – Projetos de armazenamento em operação no Brasil	22
Tabela 4 – Projetos P&D estratégicos sobre armazenamento de energia e seus status . .	23
Tabela 5 – Características das tecnologias de armazenamento	33
Tabela 6 – Parâmetros do TESS	40
Tabela 7 – Calor específico (Cp) a 25°C	40
Tabela 8 – Características e propriedades das baterias Íon de Lítio usando diversas químicas	50
Tabela 9 – Número de projetos por tipo de serviço	58
Tabela 10 – Serviços e benefícios do SAE	60
Tabela 11 – Usinas hidrelétricas reversíveis construídas no Brasil	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BESS	battery energy storage system
CAES	Armazenamento de Energia por Ar Comprimido
DOE	Department of Energy
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
FESS	Armazenamento de Energia por Flywheel
GD	Geração Distribuída
IEA	Agência Internacional de Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PHS	Usina Hidrelétrica Reversível
SAE	Sistemas para Armazenamento de Energia
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIGA	Sistema de Informações de Geração da ANEEL
SIN	Sistema Interligado Nacional
TESS	Armazenamento de Energia Térmica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	15
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	17
2.1	Perspectiva mundial	18
2.2	Perspectiva nacional	20
2.3	Definições técnicas	22
3	TECNOLOGIAS PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	29
3.1	Sistemas Mecânicos para Armazenamento de Energia	33
3.1.1	<i>Volantes de Inércia</i>	34
3.1.2	<i>Usinas Hidrelétricas Reversíveis</i>	36
3.1.3	<i>Ar Comprimido</i>	37
3.2	Armazenamento de Energia Térmica	39
3.3	Armazenamento de Energia por Meio Elétrico	42
3.3.1	<i>Supercapacitor</i>	42
3.3.2	<i>Supercondutores</i>	44
3.4	Sistemas de Armazenamento de Energia Química	46
3.4.1	<i>Hidrogênio</i>	46
3.4.2	<i>BESS</i>	47
4	APLICAÇÕES	58
4.1	Sistemas Mecânicos	60
4.2	Sistemas Térmicos	66
4.3	Sistemas Elétricos	67
4.4	Sistemas Químicos	69
5	DESAFIOS E PERSPECTIVAS NO SETOR	74
6	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

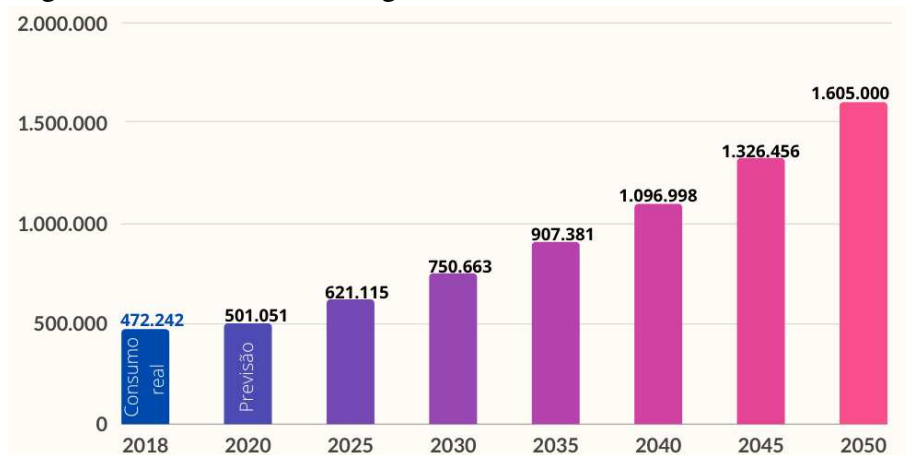
Com a crise sanitária de 2020, medidas precisaram ser adotadas para minimizar a propagação do COVID-19, tendo como consequência a redução das atividades econômicas e do consumo de energia. No período pós-pandemia é esperado que o mundo volte a crescer com a retomada gradual das atividades.

Atualmente já há um aumento da demanda por energia mundialmente devido ao crescimento da população e da economia, bem como o crescimento da utilização de tecnologias, como os carros elétricos. Além disso, a necessidade em se diminuir os impactos ambientais e climáticos, traz uma crescente preocupação com a transição energética, ou seja, a mudança de uma matriz energética baseada em fontes não renováveis para uma matriz energética baseada em fontes renováveis.

Segundo estudos elaborados pela Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), o consumo de energia deverá triplicar até 2050. Com essa estimativa o Brasil alcançará um consumo de 1,6 TWh (terawatts-hora) ao decorrer dos anos, levando ao desafio de suprir tamanho consumo. A Figura 1 apresenta essa previsão de crescimento no consumo de energia elétrica entre os anos de 2019 a 2050.

No Brasil, sabe-se que em torno de 60% da geração de energia provém das hidrelétricas, sendo que o potencial destas já foi praticamente explorado por completo, fazendo-se necessário buscar outras fontes, como a solar e eólica, para suprir essa crescente demanda.

Figura 1 – Consumo de energia elétrica no Brasil entre 2019-2050



Fonte:(ARSOLAR,)

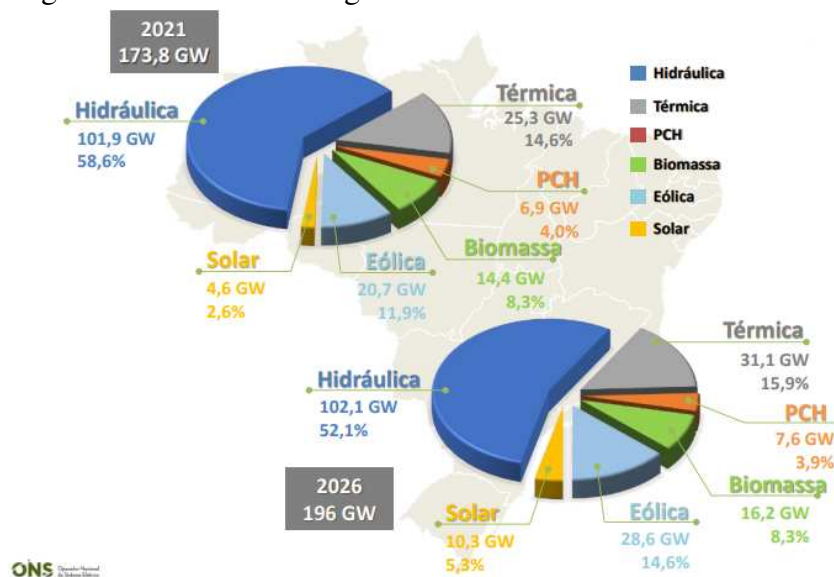
Para acompanhar o aumento do consumo de energia elétrica e manter o fornecimento é necessário aumentar os níveis de geração, reforçar o sistema de transmissão, sub transmissão

e distribuição, ou seja, tornar o Sistema Elétrico de Potência (SEP) mais robusto e confiável, trazendo assim uma série de desafios nas mais diversas áreas de estudo.

Com a necessidade de aumentar os níveis de geração é importante rever as fontes de energia utilizadas, considerando a busca por um mundo mais sustentável, a preocupação com os recursos naturais disponíveis e os impactos ambientais. Assim, tem-se buscado o uso de fontes de energias renováveis, como a solar e eólica. Por possuírem características intermitentes e não serem despacháveis, essas fontes favorecem a utilização das tecnologias para armazenamento de energia.

O gráfico da Figura 2 deixa claro a necessidade de se buscar novas fontes de geração de energia. Esse mostra a previsão da carga instalada para os anos de 2022 a 2026. Observa-se que a participação da energia solar crescerá de 4,6 GW para 10,3 GW, e a eólica de 20,7 GW para 28,6 GW. Isso representa um crescimento considerável em um curto espaço de tempo, enquanto a hidráulica tem sua contribuição praticamente inalterada.

Figura 2 – Matriz de energia elétrica brasileira



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)

As fontes, solar e eólica, tem potencial de crescimento com a implantação dos parques eólicos offshore e as usinas solares flutuantes. Com isso, vale o questionar se o Sistema Elétrico de Potência (SEP) está preparado para receber esse aumento considerável das fontes intermitentes na nossa matriz energética.

A característica não despachável dessas fontes, traz a necessidade de investimento e pesquisas em soluções para armazenamento de energia, que resolvam o problema da equalização

entre geração e demanda energética. A intermitência desses tipos de geração, compromete a confiabilidade, sendo o uso dos Sistemas para Armazenamento de Energia (SAE) uma solução para aumentar tanto a confiabilidade quanto a disponibilidade de energia elétrica.

Além de tratar a intermitência, os SAEs tornaram-se uma importante tecnologia de suporte, pois além de estar relacionado a proteção e gerenciamento, pode ser aplicado aos sistemas isolados e híbridos que têm crescido cada vez mais no país. Neles os sistemas de armazenamento são fundamentais, principalmente para os isolados, já que não há conexão com a rede elétrica. Pode-se falar também da importância do Sistemas para Armazenamento de Energia (SAE) para as microrredes inteligentes devido geração e consumo localmente, minimizando os esforços e perdas de transmissão e distribuição de energia.

1.1 Motivação

O armazenamento de energia é crucial para a transição de uma economia mais sustentável e de baixo carbono. Grande parte da energia produzida no mundo ainda é gerada a partir de fontes não renováveis. Dessa maneira, o uso dos SAE contribuem para o uso de fontes renováveis.

Além da intermitência, os SAE podem contribuir na redução de perdas de transmissão, suporte na qualidade de energia (estabilidade de tensão e frequência), nivelamento de carga, seu uso para economia de energia nos horários de ponta, fornecimento para redes isoladas e diversos outros problemas.

Por essas razões, o estudo e o levantamento das bibliografias sobre os SAEs é relevante, por contribuir no entendimento das diferentes tecnologias disponíveis e como elas podem ser usadas de forma mais eficiente e eficaz, no equacionamento dos diversos problemas ligados ao fornecimento de energia elétrica.

1.2 Objetivos

O trabalho visa trazer o panorama atual do armazenamento de energia no mundo e no Brasil, suas tecnologias, aplicações, desafios, perspectivas futuras, bem como os impactos ambientais e sociais.

Como objetivos específicos destacamos:

- Identificar as principais tecnologias de armazenamento de energia disponíveis atualmente

- e avaliar suas vantagens e desvantagens, bem como apresentar o estado da arte;
- Analisar os fatores que afetam a eficiência e eficácia das diferentes tecnologias de armazenamento de energia;
- Apresentar exemplo de aplicações em diferentes contextos.

1.3 Estrutura do trabalho

- Capítulo 2 - Panorama atual do armazenamento de energia no mundo e no Brasil;
- Capítulo 3 - Principais tecnologias utilizadas para o armazenamento de energia;
- Capítulo 4 - Principais aplicações do armazenamento de energia;
- Capítulo 5 - Desafios e perspectivas futuras para o armazenamento de energia;
- Capítulo 6 - Conclusão e propostas para trabalhos futuros.

2 ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

O armazenamento de energia é fundamental para garantir a estabilidade e eficiência dos sistemas de energia elétrica. Essas tecnologias permitem armazenar o excesso de energia gerada por fontes renováveis, como solar e eólica, para uso posterior, quando essas fontes não estão disponíveis ou produzindo energia suficiente. Isso também permite que a energia armazenada seja usada em momentos de alta demanda, reduzindo a necessidade de aumentar a produção de energia em usinas termelétricas, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e o preço da energia para o consumidor final.

Nesse contexto, o armazenamento de energia viabiliza a diversificação da matriz energética e a promoção de fontes de energia limpa e renováveis, promovendo a independência energética de comunidades e regiões. No entanto, o armazenamento de energia enfrenta diversos desafios, como seu alto custo e limitações na capacidade de armazenamento.

Esses sistemas podem ser aplicados desde a geração de energia em residências e comunidades até a geração de energia em larga escala para o SEP (BEARDSALL *et al.*, 2015a; OLABI *et al.*, 2021). Existem várias tecnologias disponíveis, cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens (AL Shaqsi *et al.*, 2020). Cada tecnologia tem sua aplicação específica em diferentes contextos, dependendo das necessidades e recursos disponíveis.

A integração dos SAEs no sistema elétrico é desafiador, por haver necessidade de adaptar a rede elétrica para suportar a incorporação de novas tecnologias, visto que tem uma capacidade limitada de lidar com uma grande quantidade de energia. Desta forma, se a capacidade de carga for excedida, pode haver sobrecarga, resultando em quedas de energia ou outros problemas.

Olhando para o contexto social, os SAE podem trazer alguns impactos negativos. Pelo seu alto custo de implementação em sistemas isolados, o que pode limitar o acesso a tais tecnologias em algumas comunidades. Por fim, as baterias podem ser prejudiciais ao meio ambiente caso não sejam manuseadas ou descartadas adequadamente.

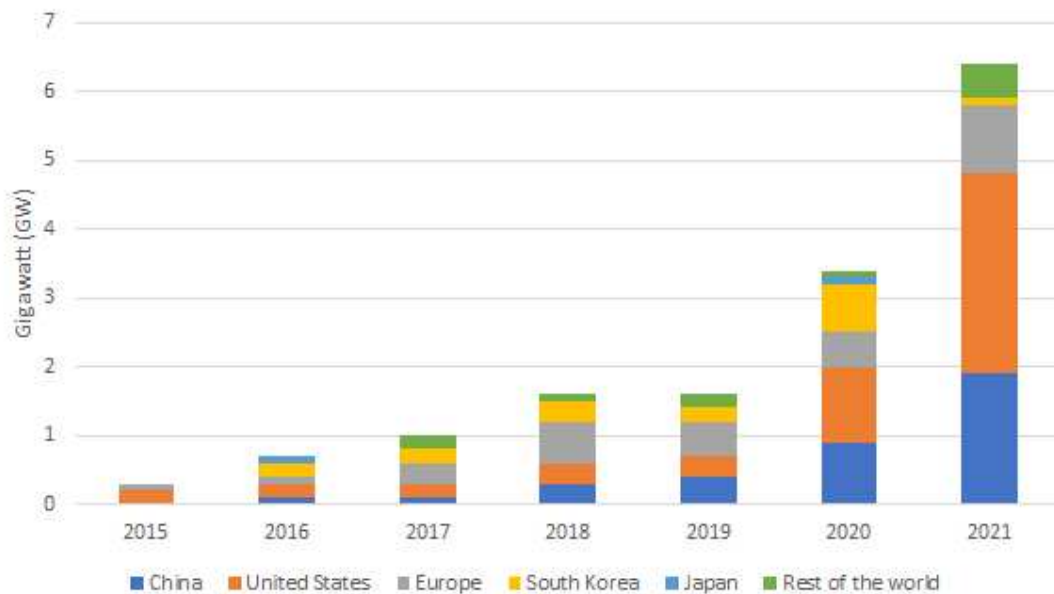
É importante abordar esses impactos negativos para garantir que a transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável seja justa e equitativa para todos, analisando cuidadosamente os impactos sociais e ambientais das tecnologias de armazenamento de energia antes de implementá-las em larga escala.

2.1 Perspectiva mundial

Os métodos para armazenamento de energia tem se desenvolvido em todo o mundo, devido ao crescente interesse na geração e distribuição de energia limpa e renovável. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), o armazenamento de energia tem um papel fundamental na transição energética (AGENCY, 2023a), por permitir a integração de fontes renováveis na matriz energética e aumenta a segurança energética de regiões e países.

Conforme o mesmo órgão, tecnologias já são utilizadas em larga escala em diversos países. A capacidade global foi de cerca de 8500 GWh em 2020, representando mais de 90% do armazenamento total de eletricidade (AGENCY, 2023a). Nos últimos anos, houve um aumento significativo na capacidade de armazenamento de energia instalada em todo o mundo, principalmente devido à expansão das tecnologias de baterias (BESS), conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – BESS adicionado no mundo entre 2015 e 2021.



Fonte: (AGENCY, 2023a)

A capacidade instalada total de armazenamento por baterias ficou próxima dos 16 GW no final de 2021, a maioria foi adicionada ao longo dos cinco anos anteriores. As instalações aumentaram em 2021, aproximadamente 60% em comparação com 2020, pois mais de 6 GW de capacidade de armazenamento foram adicionados em 2021 (AGENCY, 2023b). Atualmente, os Estados Unidos é o país com a maior capacidade de armazenamento de energia instalada, seguido pela China, Europa e os demais países do mundo que possuem.

Além disso, há diversos projetos de armazenamento de energia em andamento em todo o mundo, incluindo projetos de baterias, hidrogênio, ar comprimido, entre outras. São apontados os 10 projetos de armazenamento de energia mais promissores até 2030. Esses projetos visam aumentar a capacidade de armazenamento de energia e promover a geração de energia limpa e renovável em larga escala, reduzir custos com linhas de transmissão, reduzir o uso de usinas a gás, entre outras aplicações (GLOBALDATA, 2023).

Tabela 1 – Os 10 principais projetos futuros de armazenamento de energia

Projeto	País	Tecnologia	Pot. Nominal (kW)	Status	Proprietário
Leh Ultra Mega Solar PV Project-Battery Energy Storage System	Índia	Eletro-Química	5,000,000	Anunciado	Solar Energy Corporation of India Ltd
Xlinks Solar And Wind Power Complex - Battery Energy Storage System	Morocco	Eletro-Química	5.000.000	Anunciado	Xlinks Ltd
CEP Energy-Kurri Kurri Battery Energy Storage System	Australia	Eletro-Química	1.200.000	Anunciado	CEP Energy Pty Ltd
Morro Bay Battery Energy Storage System	United States	Eletro-Química	600.000	Anunciado	Vistra Energy Corp
Sunnica Solar-plus-Battery Energy Storage System	United Kingdom	Eletro-Química	500.000	Planejado	PS Renewables Inc, Tribus Clean Energy Ltd
PREPA-Puerto Rico Solar PV-Battery Energy Storage Tranche I	Puerto Rico	Eletro-Química	500.000	Planejado	The Puerto Rico Electric Power Authority
Total Eren Battery Energy Storage System	Kazakhstan	Eletro-Química	500.000	Anunciado	Total Eren SA
Coalburn Battery Energy Storage System	United Kingdom	Eletro-Química	500,000	Planejado	Alcemi Storage Developments Ltd
Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park - Molten Salt Thermal Energy Storage System	United Arab Emirates	Térmica	600.000	Planejado	Shanghai Electric Group Co Ltd : Acwa Power Co
CGD Group Golmud City Solar Thermal Plant -Molten Salt Thermal Storage System	China	Térmica	600.000	Planejado	China Green Development Group Co Ltd

Fonte: (GLOBALDATA, 2023)

A Tabela 2 apresenta um breve panorama referente a situação dos sistemas para armazenamento de energia já implantados em todo mundo, onde os valores apresentados entre parênteses representam o número de projetos e os demais valores referem-se a capacidade instalada total por tecnologia em quilowatt (kW).

Segundo o Department of Energy (DOE) existem, 1357 projetos de sistemas de armazenamento em operação no mundo, resultando em aproximadamente 173,5 GW de potência instalada. O país com o maior número de sistemas de armazenamento à bateria é os Estados Unidos, com 189 projetos e 2.586.151 kW, seguido do Japão com 38 sistemas e 1.766.443 kW.

Tabela 2 – Potência instalada e número de projetos por tecnologia no mundo.

Tecnologia	Operação	Offline/Reparo	Contratada	Anunciada	Descomissionada	Construção
Mecânica	115.071.133 (351)	280.000 (2)	142.480 (11)	2.521.942 (20)	34.372 (7)	260.000 (2)
Química e Eletro-Química	39.139.378 (591)	48.650 (4)	1.548.780 (42)	8.884.643 (116)	156.139 (30)	360.200 (8)
Térmica	4.711.579 (169)	-	44.700 (6)	163.127 (8)	5.150 (2)	-
-	14.624.085 (246)	215 (2)	1.234.740 (20)	1.492.723 (24)	20.700 (15)	6.500 (3)

Fonte: (DOE, 2023b). Adaptado pelo autor.

Na América do Sul destaque para o Chile, que embora tenha apenas 3 projetos, estes somam 140.000 kW.

2.2 Perspectiva nacional

O Brasil é um país com grande potencial de geração de energia limpa e renovável. Atualmente, possui aproximadamente 80% da matriz com fontes renováveis como a solar, eólica, hidrelétrica e biomassa (ANEEL, 2023a). Observa-se na Figura 4 a composição das fontes de energia no Brasil, deixando claro a riqueza do país nesse aspecto, e que a energia solar se tornou a segunda maior fonte da matriz elétrica brasileira, ultrapassando a eólica e ficando atrás somente das hidrelétricas (SOLAR, 2023c).

Figura 4 – Potência instalada em operação no Brasil

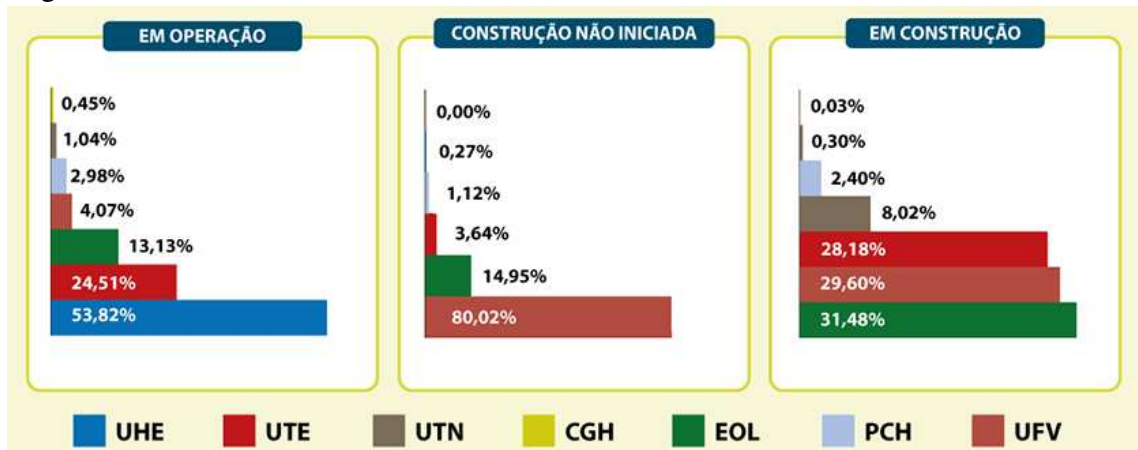


Fonte: ANEEL, 2023. Adaptado pela ABSOLAR.

A Figura 5 apresenta um panorama referente a usinas que estão em operação, bem como as ainda em etapa de construção. Segundo dados extraídos do Sistema de Informações de

Geração da ANEEL (SIGA), atualmente temos 914 usinas eólicas e 18.099 usinas fotovoltaicas em operação. Em construção há 146 usinas de cada fonte, solar somando 5,8GW, enquanto eólica soma 5,6GW (ANEEL, 2023a). Olhando ainda para esse progresso, mas agora com construção não iniciada, há 431 projetos eólicos e 981 solar.

Figura 5 – Panorama de usinas no Brasil



Fonte: (ANEEL, 2023a)

No Brasil, o armazenamento de energia ainda é uma tecnologia emergente, mas já está sendo utilizado em alguns projetos pilotos e em pequena escala. Com exceção de aplicações em sistemas remotos, ainda há pouco uso de baterias junto às unidades consumidoras em função do seu elevado custo e das poucas possibilidades de aplicação com retorno financeiro (EPE, 2023a; EPE, 2023b).

Objetivando tornar o sistema elétrico brasileiro mais favorável para integração das tecnologias para armazenamento de energia, uma série de medidas vêm sendo tomadas por órgãos do setor elétrico. Em 2016, a ANEEL lançou a chamada de projeto estratégico de P&D n.º 21/2016, tendo como um dos temas “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro” (ANEEL, 2022).

Já em 2020, a mesma agência realizou a abertura da Tomada de Subsídios n.º 011/2020, com o propósito de obter contribuições para as adequações regulatórias necessárias para permitir a inserção de sistemas de armazenamento na rede elétrica (ANEEL, 2023b). No mesmo ano, a ANEEL lançou a consolidação das contribuições recebidas na Tomada de Subsídios n.º 011/2020, destinada à obtenção de subsídios para elaboração de propostas de adequações regulatórias necessárias à inserção de sistemas de armazenamento no Sistema Interligado Nacional (SIN) por meio da Nota Técnica n.º 137/2022 (ANEEL, 2020).

A partir do primeiro semestre de 2023, a Agência Nacional de Energia Elétrica

(ANEEL) passou a incentivar o desenvolvimento de projetos de armazenamento de energia mediante leilões, realizados pelo governo federal (ECONÔMICO, 2022). É esperado que a demanda por esse tipo de tecnologia aumente, especialmente com a maior inserção de fontes renováveis (CANALENERGIA, 2022).

O Brasil possui diversos projetos de armazenamento em andamento, principalmente projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D). Constam no banco de dados do Departamento de Energia DOE apenas três projetos no Brasil (DOE, 2023b). O primeiro projeto implantado no Brasil é um sistema instalado na Usina Hidrelétrica de Bariri, em São Paulo, da AES Tietê, conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Na Tabela 3 pode-se observar informações de alguns sistemas de armazenamento em operação no Brasil.

Tabela 3 – Projetos de armazenamento em operação no Brasil

Aplicação	Local	Potência (kW)	Tecnologia
Peak shaving	Belo Jardim, PE	242	PbC
Peak shaving	Recife, PE	150	PbC
-	São Paulo, SP	20000	UHR
P&D	Bariri, SP	161	Lítio
Microrede	Fernando de Noronha, PE	280	Lítio
PEak shaving	Brasília, DF	120	Lítio

Fonte: DOE. Adaptado pelo Autor.

Projetos de pesquisa e desenvolvimento estão em andamento no país visando aperfeiçoar as tecnologias de armazenamento de energia e diminuir os custos. A chamada pública P&D Estratégico n.º 21/2016, recebeu 29 propostas, sendo onze aprovadas e outras doze aprovadas com recomendações (ABRAGEL, 2017). Os 21 projetos contemplados somam um valor de R\$ 364.963.775. A Tabela 4 apresenta os projetos contemplados.

O objetivo dessa chamada foi a proposição de arranjos técnicos e comerciais para avaliação e inserção de sistemas de armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro, incentivando o estabelecimento de condições para o desenvolvimento de base tecnológica, propriedade intelectual e infraestrutura de produção nacional. Destaque para a Companhia Paranaense de Energia (Copel), com sete projetos aprovados, totalizando R\$ 70.199.802,70.

2.3 Definições técnicas

Aqui diferenciaremos os armazenadores químicos e elétricos dos demais. Ao falarmos de armazenamento elétrico e químico, é comum discutirmos o armazenamento em função da carga elétrica, como acontece com as baterias. Esta tem sua capacidade medida em ampere-hora

Tabela 4 – Projetos P&D estratégicos sobre armazenamento de energia e seus status

Situação	Proponente	Segmento	Data de Conclusão	Custo Total Previsto
Concluído	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista	Geração	24/03/2023	R\$ 12.860.231,00
Em atraso	Companhia Piratininga de Força e Luz	Distribuição	-	R\$ 30.887.711,00
Concluído	Companhia Energética de São Paulo	Geração	29/01/2021	R\$ 29.660.353,84
Em atraso	Amazonas Energia S.A.	Distribuição	-	R\$ 14.325.723,12
Concluído	CEMIG Distribuição S.A	Distribuição	13/10/2022	R\$ 20.778.960,23
Concluído	Petrobras S.A.	Geração	04/01/2023	R\$ 25.305.977,00
Em atraso	Furnas-Centrals Elétricas S.A.	Geração	-	R\$ 45.280.093,30
Em atraso	COPEL Distribuição S.A.	Distribuição	-	R\$ 2.854.988,00
Em atraso	COPEL Distribuição S.A.	Distribuição	-	R\$ 12.246.407,08
Em atraso	COPEL Distribuição S.A.	Distribuição	-	R\$ 20.217.532,00
Em atraso	COPEL Distribuição S.A.	Distribuição	-	R\$ 17.446.996,00
Concluído	COPEL Distribuição S.A.	Distribuição	25/11/2022	R\$ 4.738.757,30
Concluído	COPEL Distribuição S.A.	Distribuição	21/03/2023	R\$ 4.096.712,00
Concluído	Rio Grande Energia S.A.	Transmissão	06/10/2022	R\$ 26.171.703,20
Concluído	Companhia Paulista de Força e Luz	Distribuição	11/02/2022	R\$ 4.011.460,00
Em atraso	ENGIE Brasil Energia S.A.	Geração	-	R\$ 20.841.032,00
Concluído	CEMIG Distribuição S.A	Distribuição	20/12/2022	R\$ 26.893.425,76
Concluído	COPEL Distribuição S.A.	Distribuição	18/01/2023	R\$ 8.598.410,32
Em atraso	Companhia Energética do Ceará	Distribuição	-	R\$ 5.209.200,00
Em atraso	Companhia Energética de Pernambuco	Geração	-	R\$ 22.337.858,50
Em atraso	ENERGISA Mato Grosso do Sul S.A.	Distribuição	-	R\$ 10.200.243,88

Fonte: ANEEL, 2023. Adaptado pelo Autor.

(Ah). Dessa maneira, define-se a capacidade pela quantidade de energia que pode ser extraída do armazenador. A expressão que define a capacidade é dada pela Equação:

$$C = \int_0^t i(t)dt \quad (2.1)$$

Além da capacidade (C), define-se também profundidade de descarga (DoD), que consiste quanto de energia será extraída do armazenador em relação a sua capacidade. Como exemplo, considere termos um sistema completamente carregado em que houve uma descarga de 50% da sua capacidade. Temos que metade da sua carga foi utilizada. A expressão é descrita pela Equação:

$$DoD = \frac{\int_0^t i_{dis}(t)dt}{C} \quad (2.2)$$

Outro fator que pode ser citado é o estado de carga (SoC). Este indica a quantidade de carga disponível em relação a sua capacidade, ou seja, o que continua disponível após uma determinada descarga. Logo, o estado de carga é a quantidade de energia armazenada descontada da quantidade de energia retirada, tudo isso sobre a capacidade de armazenamento. Essa descrição pode ser vista na Equação:

$$SoC = \frac{C - \int_0^t i_{dis}(t)dt}{C} = 1 - DoD \quad (2.3)$$

A profundidade de descarga (DoD) e o estado de carga (SoC) são informações importantes no gerenciamento de um armazenador, tendo em vista que uma descarga completa pode danificá-lo ou mesmo comprometer sua vida útil.

Quando falamos dos demais sistemas, a capacidade de armazenamento é representada em termos de energia propriamente dito. Logo, a expressão pode ser definida pela Equação:

$$E = \int_0^t p(t)dt \quad (2.4)$$

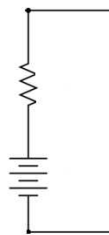
Na capacidade de energia (E), agora temos o estado de energia (SoE), que a expressão é apresentada na Equação (2.5), onde E é a energia armazenada e E_{sto} é a energia total armazenada.

$$SoE = \frac{E}{E_{sto}} \quad (2.5)$$

Ao falarmos de armazenamento de energia temos a questão da eficiência, sendo importante avaliar as diferentes perdas que podem haver no sistema e também os diferentes modos de operação. Nesse aspecto, ocorrem perdas por transferência de potência nos processos de carga e descarga, bem como perdas por autodescarga, quando o sistema encontra-se desabilitado. Um exemplo de perdas por transferência de potência é o sistema de bombeamento de água para um reservatório, onde há perdas de energia no motor, na bomba e na canalização.

É fácil perceber as perdas por carga e descarga fazendo uma análise a partir do modelo simplificado de uma bateria, como o representado no circuito da Figura 6. Esse modelo é uma aproximação razoável da perda no processo de carga e descarga de uma bateria, sendo essas proporcionais ao quadrado da potência que está sendo entregue pelo sistema.

Figura 6 – Circuito simplificado de bateria



Fonte: Próprio autor, 2023.

Pode-se observar que há no modelo uma resistência interna, e dependendo da potência fornecida pelo sistema, haverá uma perda expressa pela Equação (2.6). Pensando que a

tensão entre os terminais é praticamente a mesma, pode-se dizer que a perda é equivalente à potência ao quadrado, apresentada pela Equação (2.7).

$$P = R \cdot i^2 \quad (2.6)$$

$$P_{ch} = \alpha \cdot P^2 \quad (2.7)$$

Se armazenamos energia em um supercapacitor, com o tempo aquela energia vai diminuindo, por haver perdas associadas aos próprios capacitores. Essas perdas, denominadas de perdas por autodescarga, também ocorrem em baterias, e são uma função do estado de energia do sistema, apresentado pela Equação:

$$P_0 = f(SoE) \quad (2.8)$$

Dessa maneira, a perda total do sistema pode ser dada pela Equação (2.9) e a energia perdida durante um ciclo de operação pode ser expressa pela Equação (2.10).

$$P_{loss} = \alpha P^2 + f(SoE) \quad (2.9)$$

$$E_{lossCyc} = \int_0^{t_{cyc}} [\alpha P^2 + f(SoE)] dt \quad (2.10)$$

Há dois conceitos importantes sobre eficiência, sendo a eficiência global normal e a eficiência real. Na eficiência global normal (η_{cn}) o sistema assume que a potência de carga e descarga são iguais e desconsidera a autodescarga, ou seja, olha tipicamente para a energia. Como nos sistemas para armazenamento de energia a variável tempo é importante, surge o segundo conceito de eficiência real (η_{cnt}).

Na eficiência real a autodescarga é considerada. Dessa maneira, é possível analisar o estado de energia do sistema pela expressão apresentada na Equação (2.11), podendo convencionar a potência como positiva durante a carga e negativa na descarga.

$$SoE(t) = SoE(t_0) + \frac{\int [P(t) - P_{loss}] dt}{E_{sto}} \quad (2.11)$$

Onde:

$SoE(t)$ é o estado de energia em um determinado instante;

$SoE(t_0)$ é o estado de energia inicial;

$P(t)$ é a potência que o sistema está produzindo;

P_{loss} são as perdas de energia;

E_{sto} , capacidade do sistema.

Como exemplo desse estado de energia, façamos uma análise do perfil de carga e descarga de um sistema de armazenamento apresentado na Figura 7. Pode-se perceber que o sistema absorve da rede uma potência (+PM), sendo assim carregado por um tempo de carga (t_{ch}). É possível notar a mudança no estado de energia (SoE) e associado a isso há perdas. Nota-se que a perda cresce no momento de carga.

No momento em que o armazenador encontra-se completamente carregado, desliga-se o sistema em questão. Entretanto, observa-se uma redução do estado de energia no tempo (t_0) devido a autodescarga, cujo nível depende da tecnologia e do tempo que o sistema se encontra desabilitado.

Durante a descarga, percebe-se que a potência passa a ser negativa (-PM) e o estado de energia é alterado, pois nesse momento o sistema encontra-se fornecendo energia por um tempo de descarga (t_d). Vale destacar que o tempo de descarga (t_d) é menor que o tempo de carga (t_{ch}), isso porque no momento em que se inicia a descarga já não há mais a mesma energia armazenada por completo.

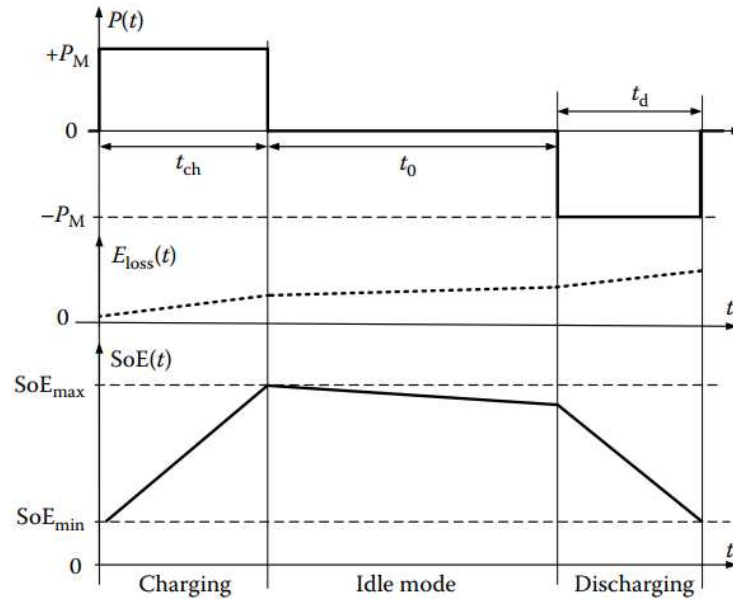
A eficiência normal pode ser descrita pela razão entre a energia disponível e a energia armazenada total, desconsiderando as perdas, ou seja, um sistema ideal. Vale lembrar que o resultado será menor que um pelo fato do tempo de descarga ser menor que o tempo de carga. Isso é descrito pela Equação:

$$\eta_{cn} = \frac{E_d}{E_{ch}} = \frac{P_M \cdot t_d}{P_M \cdot t_{ch}} = \frac{t_d}{t_{ch}} < 1 \quad (2.12)$$

Abordando a eficiência real, que consideração as perdas, temos a energia de carga entregue para o sistema descontada da energia perdida, dividido pela energia total do sistema. A Equação que expressa essa definição é apresentada abaixo:

$$\eta_{cnt} = \frac{E_{ch} - E_{loss}}{E_{ch}} = \frac{(P_M \cdot t_d) - \alpha P^2(t_{ch} + t_d) - \int_0^t P_0(SoE(t))}{P_M \cdot t_{ch}} \quad (2.13)$$

Figura 7 – Ciclo de carga e descarga de um perfil de potência



Fonte: (RUFER, 2017)

Da Equação (2.13), temos:

$\alpha P^2(t_{ch}+t_d)$, perda de energia associada a conversão de potência;

$\int_0^t P_0(\text{SoE}(t))$, perda por autodescarga a depender do estado de energia.

Dessa maneira, considerando que (t_d) seja igual à eficiência real multiplicada pelo tempo de carga, Equação (2.14), substituindo na Equação (2.13) e organizando, chega-se a Equação (2.15).

$$t_d = \eta_{cnt} \cdot t_{ch} \quad (2.14)$$

$$\eta_{cnt} = \frac{1 - \alpha P_M}{1 + \alpha P_M} - \frac{\int_0^t P_0(\text{SoE}(t)) dt}{P_M \cdot t_{ch} (1 + \alpha P_M)} \quad (2.15)$$

Definindo a eficiência instantânea de carga pela Equação (2.16), eficiência instantânea de descarga pela Equação (2.17) e fator de autodescarga pela Equação (2.18), tem-se:

$$\eta_{ch} = \frac{P_M - \alpha P_M^2}{P_M} = 1 - \alpha P_M \quad (2.16)$$

$$\eta_d = \frac{P_M}{P_M + \alpha P_M^2} = \frac{1}{1 + \alpha P_M} \quad (2.17)$$

$$\eta_0 = \frac{\int_0^t P_0(SoE(t))}{P_M \cdot t_{ch}} \quad (2.18)$$

Olhando para as Equações acima e comparando com a Equação (2.15), temos (2.16) sendo a eficiência da carga, (2.17) a eficiência da descarga e (2.18) o fator de autodescarga. Logo, tem-se:

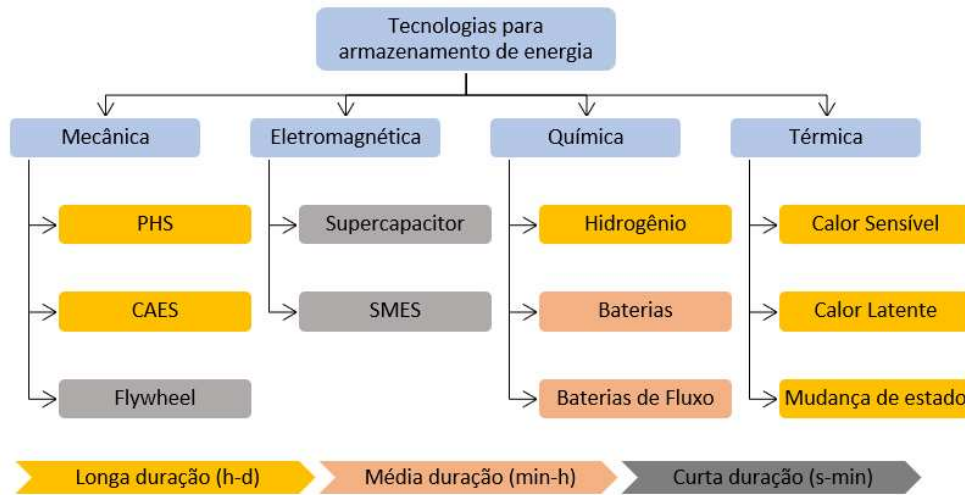
$$\eta_{ctn} = (\eta_{ch} - \eta_0)\eta_d \quad (2.19)$$

Portanto, a Equação (2.19) mostra a dependência da eficiência real em função das eficiências instantâneas, como o produto dessas últimas. Dessa maneira, pelo fato da eficiência ser um número menor que um, o produto de números menores que um só reduz o número. Essas eficiências são medidas críticas para otimização dos sistemas de armazenamento, sendo empregadas na comparação entre as tecnologias.

3 TECNOLOGIAS PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

As tecnologias para armazenamento de energia tornaram-se de grande importância para aplicações em grande escala, pequena escala e Geração Distribuída (GD) (YANG *et al.*, 2020). Embora essas tecnologias possam ser categorizadas por duração de armazenamento, tempo de resposta e função (WAN *et al.*, 2020), o mais comum é classificá-las pelo processo de armazenamento como mecânica, química, térmica e elétrica (BEARDSALL *et al.*, 2015a). A Figura 8 apresenta um esquema com a classificação das tecnologias com base no critério citado, sendo que os destaques em cor representam os aspectos relativos ao tempo de descarga fornecido pela tecnologia utilizada.

Figura 8 – Classificação dos sistemas de armazenamento

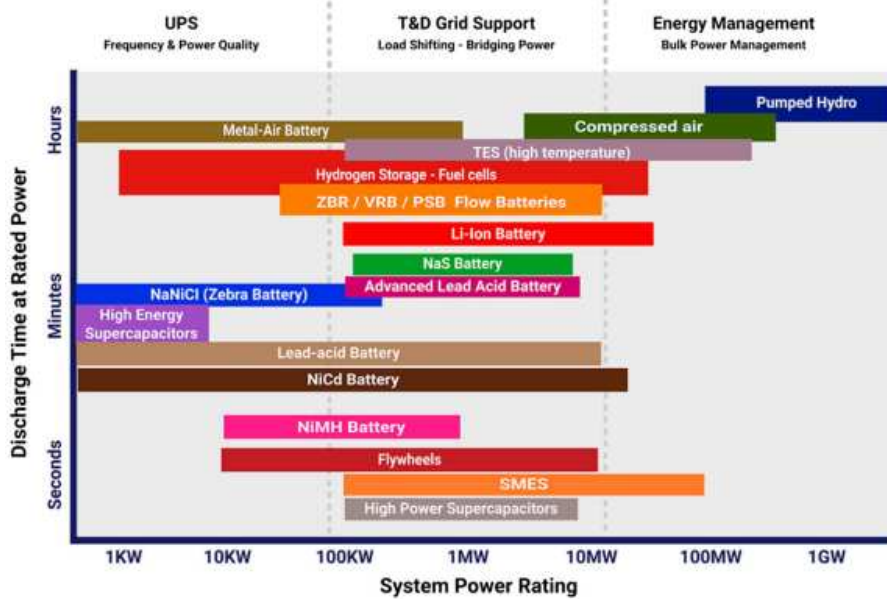


Fonte: (GONZALEZ, 2016)

Uma análise da faixa de aplicação dessas tecnologias pode ser feita através Figura 9, que apresenta uma relação entre a potência e tempo de descarga. Essas tecnologias, como, por exemplo, as hidrelétricas reversíveis e os sistemas por ar comprimido, podem armazenar altas potências por um tempo relativamente longo. Olhando para os Flywheels, estes conseguem atingir altas potências, mas aplicados a pequenos intervalos de tempo. O fato das baterias armazenarem altas potências por longo tempo justifica essas estarem em alta no mercado.

Portanto, uma tecnologia pode fornecer energia por horas, alcançar altas potências, assim como outra pode fornecer energia por pouco tempo em uma faixa de potência considerável. Considerando que o custo, a vida útil e os parâmetros operacionais também devem ser considerados, fica claro porque a escolha do sistema de armazenamento de energia pode representar um desafio.

Figura 9 – Comparação entre potência e tempo de descarga



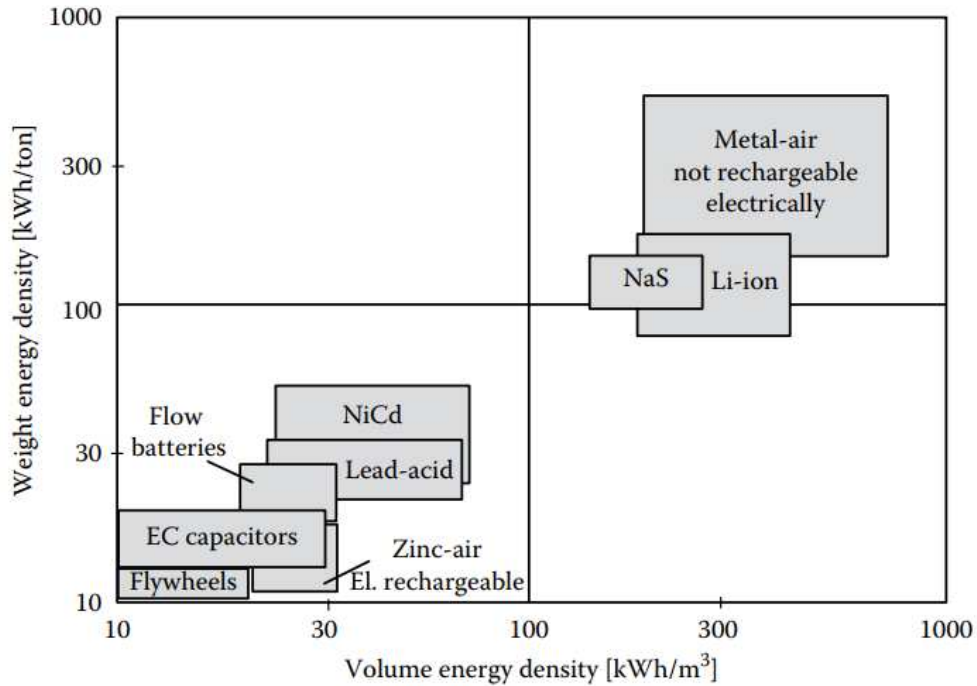
Fonte: (GONZALEZ, 2016)

Outras características importantes dos armazenadores a serem consideradas são a densidade de energia, densidade de potência, densidade específica de energia e densidade específica de potência. Essas características estão ligadas a quantidade de energia e potência que podem ser armazenadas por volume e massa.

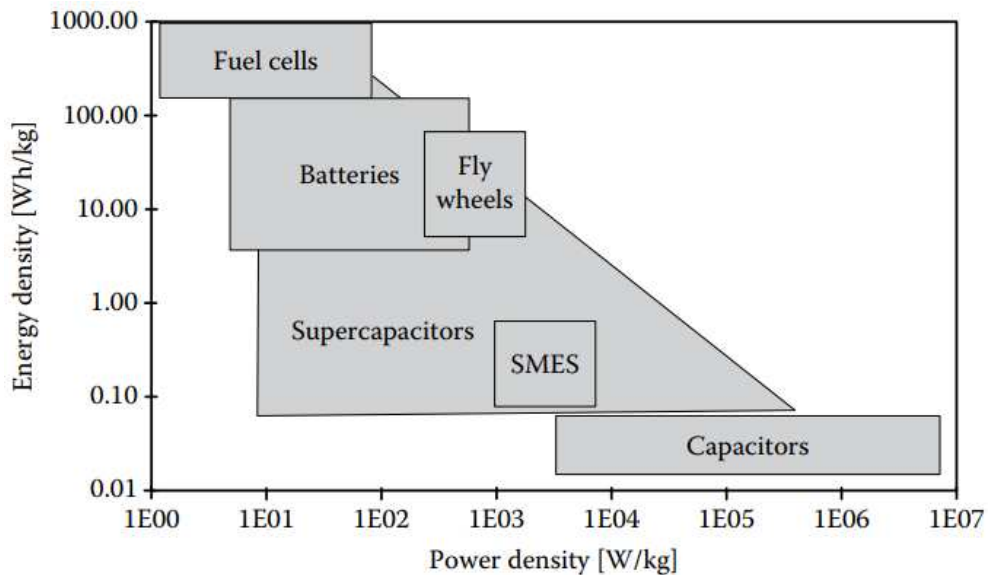
- Densidade de energia (e_v), geralmente dado em Wh/dm³ ou kWh/m³;
- Densidade de potência (p_v), geralmente dado em W/dm³ ou kW/m³;
- Densidade de energia específica (e_m), geralmente dado em Wh/kg ou kWh/ton;
- Densidade de potência específica (p_m), geralmente dado em W/kg ou kW/ton.

A partir das unidades de medida das densidades descritas acima, observando também a Figura 10, para uma mesma aplicação, sistemas com maior densidade de energia apresentam um menor volume. As densidades são fatores importantes caso seja necessário transportar o armazenador. Como exemplo, flywheels ocuparão mais espaço, tendo em vista que possuem uma baixa densidade de energia, enquanto baterias possuem uma densidade de energia maior e densidade específica também maior, ocupando menos peso e espaço.

Ainda em comparações, a Figura 11 apresenta o diagrama de Ragone, que traz informações sobre a relação entre a densidade de energia específica e densidade de potência. Nele é possível observar tanto a quantidade de energia que é possível armazenar por massa, bem como a potência possível de ser fornecida por massa.

Figura 10 – Densidade de energia *versus* Densidade de energia específica

Fonte: (RUFER, 2017)

Figura 11 – Densidade de energia específica *versus* Densidade de potência

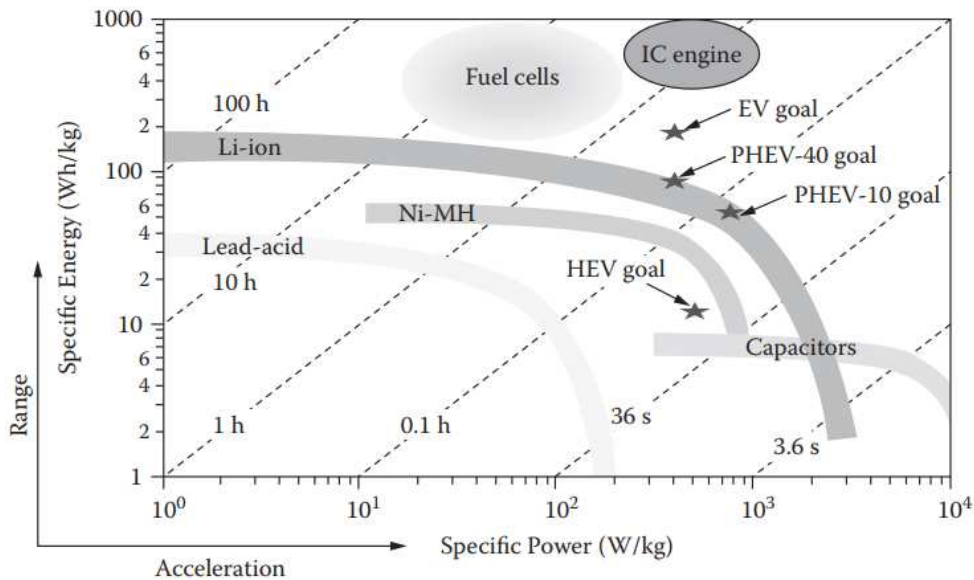
Fonte: (RUFER, 2017)

É possível notar que os capacitores possuem elevada densidade de potência e baixa densidade de energia, conseguindo entregar altas potências, são mais leves, porém não conseguem armazenar muita energia. Já os sistemas de maiores potências são as baterias ou células a combustível.

Para destacar a importância desses parâmetros, pode-se olhar para os veículos elétricos e híbridos. Ao olhar para a densidade de energia específica para aplicações de transportes,

está sendo analisado o alcance do mesmo, ou seja, quantos quilômetros poderá percorrer. No que tange a densidade específica de potência, essa está diretamente ligada a potência que pode ser fornecida no momento da aceleração do veículo. A Figura 12 apresenta as tecnologias para projeto de veículos elétricos e híbridos (BARNES; LEVINE, 2011).

Figura 12 – Tecnologias para veículos elétricos

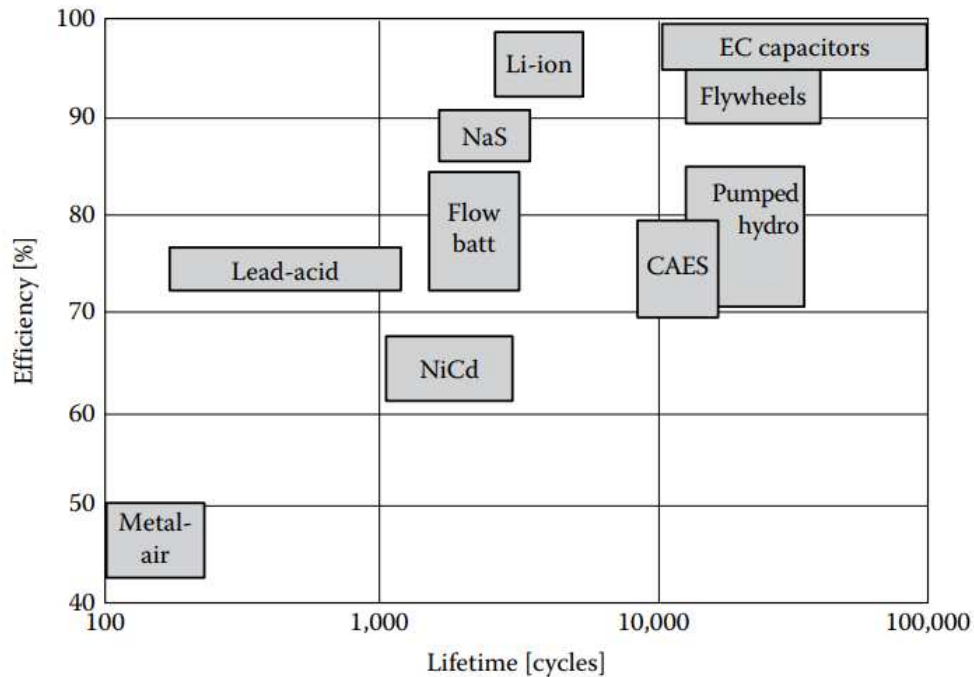


Fonte: VERIFICAR (BARNES; LEVINE, 2011)

A eficiência e ciclo de vida das tecnologias para armazenamento de energia está representado na Figura 13. O tempo de vida está apresentado em ciclos, ou seja, número de cargas e descargas que podem ser feitas pelo sistema. As baterias possuem eficiência em torno de 70 a 80%, e para Li-íon, estas ultrapassam os 90%, possuindo tempo de vida superior as de chumbo ácido.

A Tabela 5 apresenta um resumo das características das tecnologias para armazenamento de energia. Através dela é possível observar os parâmetros de cada tecnologia, como, por exemplo, os volantes de inércia (Flywheels), geralmente utilizados para regulação de frequência (RAHMAN *et al.*, 2020). Esses possuem uma alta eficiência (80–90%) para aplicações de curto prazo (segundos a minutos), rápido tempo de resposta e vida útil elevada, tornando o seu uso favorável para essa aplicação.

Os tópicos adiante, tem como objetivo abordar um pouco sobre as tecnologias propriamente ditas, apresentando os sistemas mecânicos (hidrelétricas reversíveis, ar comprimido e volantes de inércia), térmicos, elétricos (supercapacitores e supercondutores) e químicos (hidrogênio verde e baterias).

Figura 13 – Eficiências *versus* Ciclo de vida

Fonte: (BARNES; LEVINE, 2011)

Tabela 5 – Características das tecnologias de armazenamento

Tecnologia	Potência Nominal (MW)	Tempo do armazenamento	Tempo de vida (Anos)	Autodescarga (%)	Eficiência (%)	Tempo de resposta
PHS	100 - 5000	h - dias	40 - 60	~0	70 - 90	min
CAES	5 - 300	h - dias	20 - 40	~0	80 - 90	seg / min
Flywheel	0 - 10	ms - min	15	1,3 - 100	40 - 60	ms
Chumbo-Ácido (Pb-A)	0 - 20	min - h	2 - 10	0,1 - 0,3	70 - 80	ms
Níquel Cádmio (Ni-Cl)	0 - 40	min - h	2 - 10	0,05 - 20	60 - 80	ms
Sódio Enxofre (Na-S)	0,05 - 8	min - h	2 - 10	0,05 - 20	70 - 80	ms
Íons de Lítio (Li-Ion)	0 - 50	min - h	2 - 10	0,01 - 0,03	70 - 90	ms
Fluxo (VFRB)	0,03 - 3	min - h	2 - 10	0,01 - 0,03	60 - 70	ms
Hidrogênio (H2V)	0 - 50	min - h	5 - 15	0 - 4	20 - 50	seg / min
Supercapacitor	0 - 0,03	ms - min	30 - 40	20 - 40	80 - 90	ms
SMES	0 - 10	ms - min	40	10 - 15	70 - 80	ms
Térmicas	50 - 250	min - h	5 - 40	10 - 15	30 - 80	seg / min

Fonte: (BEARDSALL *et al.*, 2015b; RAHMAN *et al.*, 2020)

3.1 Sistemas Mecânicos para Armazenamento de Energia

Diversos sistemas de armazenamento de energia utilizam meios mecânicos tanto para transformar a energia elétrica em mecânica quanto mecânica em elétrica, isso por meio dos princípios como diferença de altura, velocidade ou até mesmo pressão do ar. Os sistemas mecânicos são compostos por Usina Hidrelétrica Reversível (PHS), Armazenamento de Energia por Flywheel (FESS) e Armazenamento de Energia por Ar Comprimido (CAES). As siglas das tecnologias são oriundas do inglês, sendo *Pumped Hydro Storage - PHS*, *Flywheel Energy Storage System — FESS* e *Compressed Air Energy Storage — CAES*.

3.1.1 Volantes de Inércia

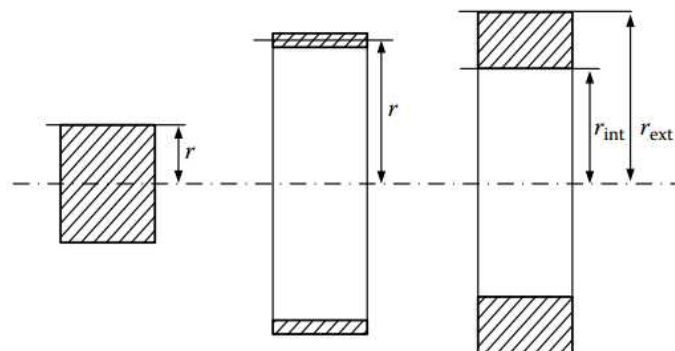
Os volantes de inércia, amplamente conhecidos por FESS, do inglês *Flywheel Energy Storage System*, armazenam energia mediante uma massa cilíndrica que tem o seu eixo acoplado a uma máquina elétrica, a qual pode operar como motor ou gerador. No momento em que o seu eixo acelera, a máquina funciona como motor, absorvendo energia e armazenando na forma de energia cinética. De forma contrária, quando a máquina desacelera passa a funcionar como gerador, assim a mesma encontra-se fornecendo energia.

A energia armazenada pelos volantes pode ser descrita pela equação (3.1), onde temos I representando o momento de inércia das partes rotativas e ω a velocidade angular. Pode-se observar que a energia é definida pela velocidade de operação máxima e mínima do volante.

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

O momento de inércia depende da massa e forma geométrica. A Figura 14 apresenta as diferentes formas que devem ser levadas consideração. Definido a forma geométrica que será utilizada, pode-se calcular a inércia a partir das relações (3.2) para cilindro sólido, (3.3) para cilindro vazio com paredes finas e (3.4) para cilindro vazio com paredes grossas, onde m é a massa e r o raio do cilindro. Para o caso do cilindro vazio com paredes grossas temos r_{ext} como raio externo e r_{int} como raio interno.

Figura 14 – Diferentes formas para o FESS



Fonte: (RUFER, 2017)

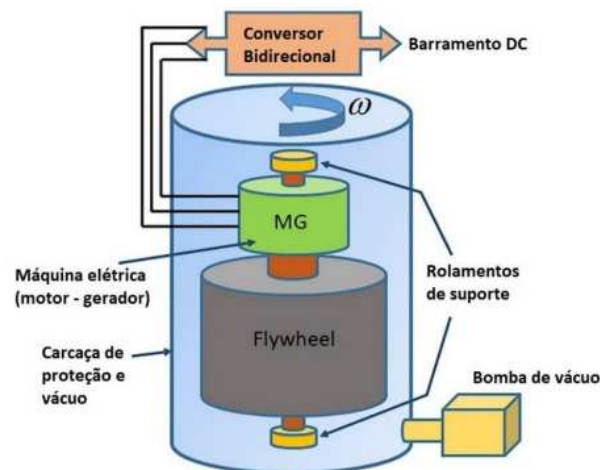
$$I = \frac{1}{2}mr^2 \quad (3.2)$$

$$I = mr^2 \quad (3.3)$$

$$I = \frac{1}{2}m(r_{ext}^2 + r_{int}^2) \quad (3.4)$$

Um volante de inércia é composto por uma máquina elétrica acoplada a uma massa rotativa. Com a ajuda de um conversor eletrônico de potência, o torque de acionamento da máquina (positivo para carregar e negativo para descarregar) pode ser imposto permitindo o controle. O sistema compõem um encapsulamento para reduzir parcialmente as perdas aerodinâmicas do volante e do motor. Uma representação esquemática de tal tecnologia é dada na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de um FESS



Fonte: (AL Shaqsi *et al.*, 2020)

O Flywheel pode ajudar a controlar a frequência da rede e garantir a qualidade da energia fornecida. É empregado principalmente com geração de energia renovável, onde as flutuações de eletricidade são altas e frequentes. As vantagens do FESS são: alta potência e densidade de energia, longa vida e pouca manutenção periódica, alta taxa de carga e descarga,

alta potência de saída, grande capacidade de armazenamento de energia e baixo impacto ao meio ambiente.

A eficiência depende do tempo de armazenamento de energia, sendo que uma eficiência média de 85% pode diminuir para 78% e 45% após 5 h e 24h (um dia inteiro) respectivamente (RUFER, 2017). Portanto, os volantes são ineficientes para armazenar energia elétrica a longo prazo, mas podem ser usados em combinação com outros dispositivos para armazenamento de curto prazo.

Os volantes são uma tecnologia menos madura em comparação com as baterias, com custo atual elevado e pouco competitivo no mercado. No entanto, o custo do sistema pode ser reduzido usando volantes de pequena capacidade. O uso dos flywheels pode crescer com o significativo na demanda global por energia elétrica, que muitas vezes cria lacunas entre demanda e oferta de energia, levando a necessidade de backups de energia.

3.1.2 Usinas Hidrelétricas Reversíveis

As hidrelétricas tornaram-se uma importante fonte para a geração de eletricidade, sendo intensamente desenvolvida, de dezenas de quilowatts a dezenas de gigawatts. O armazenamento de energia hidrobombeado é realizado por meio das usinas hidrelétricas reversíveis, sendo estas um meio para armazenamento de energia em grande escala (OLABI *et al.*, 2021).

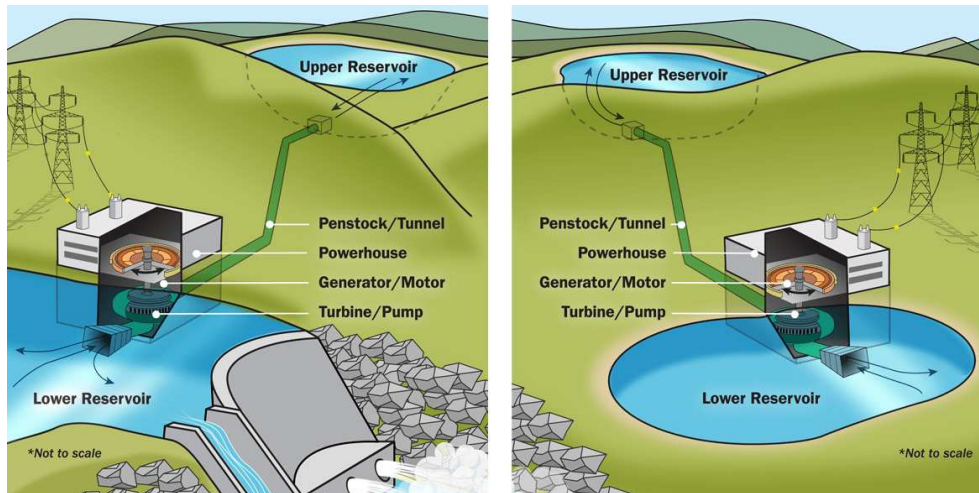
Embora outras tecnologias para armazenamento, além das hidrelétricas reversíveis, estejam sendo desenvolvidas, a maioria atende apenas aplicações de pequena e média escala. A PHS é atualmente a tecnologia mais madura e difundida para armazenamento de energia em grande escala, possuindo a maior capacidade instalada no mundo.

O sistema é composto por reservatórios de água em diferentes altitudes e interligados por um conjunto de bombas e turbinas reversíveis, além dos condutos forçados e outros equipamentos. A Figura 16 apresenta dois sistemas de hidrobombeamento, um tendo seu ciclo fechado (*closed-loop*) e outro um ciclo aberto (*open-loop*). Quando em ciclo fechado, a água é bombeada/escoada entre dois reservatórios sem nenhuma ligação ao rio. Assim, o volume possui um limite máximo de acordo com reservatórios, não podendo ser alterado.

Quando em ciclo aberto, temos algo mais similar as hidrelétricas. O reservatório superior depende da água bombeada do reservatório inferior, estando este ligado diretamente a vazão do rio e assim tornando a operação mais flexível. A energia armazenada E pode ser descrita através da equação (3.5), onde temos (ρ) densidade da água, (g) gravidade, (H) altura e

(V) volume de água armazenada no reservatório superior.

Figura 16 – Diagrama simplificado de um PHS



Fonte: (DOE, 2023a)

$$E = \rho gHV \quad (3.5)$$

Em momentos de alta demanda de energia ou de interrupções não planejadas, a água do reservatório superior é liberada para a turbina ser acionada, gerando assim a energia. Por outro lado, quando a demanda é baixa, a água presente no reservatório inferior é bombeada para o reservatório superior para reuso posteriormente.

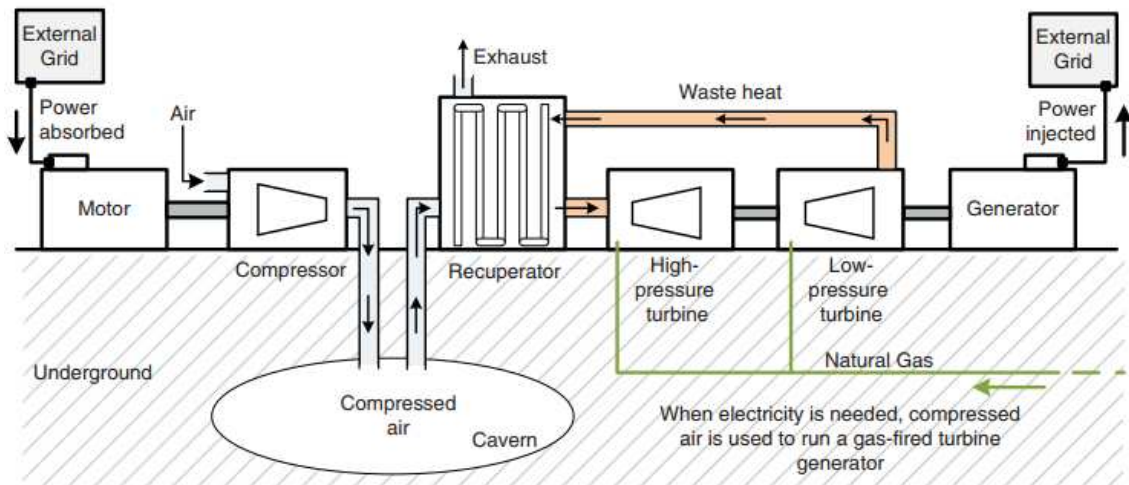
A eficiência das usinas reversíveis é em torno de 75% a 80%, apresentando vida útil entre 40 e 60 anos. Cabe citar que estes sistemas apresentam restrições ambientais e geográficas, assim como as hidrelétricas, e que o custo de implantação varia conforme o tamanho da usina, local da construção e a infraestrutura necessária, tendo em vista que estas possuem requisitos adicionais para armazenamento de energia, diferente das hidrelétricas convencionais.

3.1.3 Ar Comprimido

O CAES utiliza turbinas a gás para expansão e compressão do ar. A energia é armazenada através da compressão do ar, em um reservatório subterrâneo a altas pressões (4,0 a 8,0 MPa), ou em tanques de aço acima do solo em locais sem condições para o armazenamento subterrâneo (WAN *et al.*, 2020).

O processo que envolve a retirada de ar comprimido de cavernas, sendo posteriormente aquecido e expandido por meio de um conjunto de turbinas de alta e baixa pressão, permite a conversão da maior parte desse ar em energia elétrica por meio de um gerador (GONZALEZ, 2016). O vapor a ser liberado para a atmosfera pode ser captado por meio de um recuperador e reaproveitado. A Figura 17 apresenta um esquema do sistema descrito.

Figura 17 – Diagrama CAES e princípio de operação



Fonte: (GONZALEZ, 2016)

Essa tecnologia possui como característica bem interessante a sua vida útil de aproximadamente 40 anos, com uma eficiência entre 40% a 70%. Como a autodescarga do sistema é muito baixa, os sistemas CAES competem com as hidrelétricas reversíveis como sistema de armazenamento de longo prazo (GONZALEZ, 2016).

Em comparação as outras tecnologias, o CAES tem um longo período de armazenamento, baixo custo de capital e alta eficiência. A potência armazenada pelo CAES está na faixa de 50 a 300 MW, e os custos de capital para sua instalação variam dependendo do tipo de armazenamento subterrâneo, geralmente de US\$ 400 a US\$ 800 por kW. A densidade de energia específica típica é de 3-6 Wh/litro ou 0,5-2 W/litro (ZOBAA, 2013).

Semelhante a PHS, a principal barreira para a implementação em larga escala do CAES é a dependência de geografia favorável, como cavernas (ZHANG *et al.*, 2021). Além disso, o CAES não é um sistema independente, por estar associado à usina de turbina a gás, não sendo interessante o uso em usinas a carvão, visto que a queima de combustível fóssil leva à emissão de gases poluentes, tornando o sistema menos atraente.

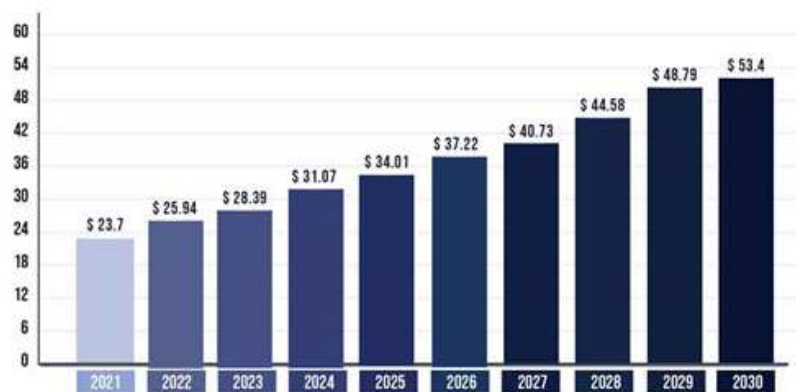
Atualmente existem duas grandes instalações de CAES em operação no mundo. Em

Huntorf, Alemanha, a instalação entrega uma potência de 290MW, operando a uma faixa de pressão de 4,8-6,6 MPa. Já em McIntosh, EUA, existe uma instalação fornecendo 110MW (BAZDAR *et al.*, 2022). Os sistemas por ar comprimido podem ser aplicados para nivelamento de carga, reserva de capacidade e gerenciamento de energia.

3.2 Armazenamento de Energia Térmica

O Armazenamento de Energia Térmica (TESS) tem a capacidade de armazenar energia aquecendo ou resfriando uma substância, que pode ser liberada posteriormente quando necessário. Essa tecnologia é adequada para uso em setores industriais, comerciais e residenciais, como sistemas de aquecimento ou resfriamento. O mercado global de armazenamento de energia térmica foi estimado em US\$ 23,7 bilhões em 2021 e deve ultrapassar cerca de US\$ 53,4 bilhões até o ano de 2030, crescendo a uma taxa anual notável de 9,45% durante o período de previsão de 2022 a 2030, como pode ser visto na Figura 18 (RESEARCH, 2023).

Figura 18 – Crescimento TESS, 2021 a 2030 (US\$ Bilhões)



Fonte: (RESEARCH, 2023)

Há três formas de armazenar energia térmica, sendo estas em calor sensível, calor latente e reações químicas (JOUHARA *et al.*, 2020). O calor sensível é o mais desenvolvido e simples, porém tem menor densidade de armazenamento, já o termoquímico é o menos desenvolvido que oferece um maior potencial para densidade de armazenamento. A quantidade de energia armazenada depende do material, capacidade específica do calor do material e a variação de temperatura (FERREIRA, 2020).

O sistema de calor sensível é baseado na elevação da temperatura de um material (sólido, líquido ou gasoso) para armazenar calor e liberá-lo com redução da temperatura. Nos casos em que deseja-se armazenar grandes quantidades de energia é necessário um volume de

material extremamente elevado, onde o calor armazenado pode ser obtido pela Equação:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot (T_f - T_i) \quad (3.6)$$

Pode-se observar na tabela 6 os parâmetros de capacidade, potência, eficiência e duração de energia armazenada pelos sistemas de armazenamento de energia térmica.

Tabela 6 – Parâmetros do TESS

Tipo	Capacidade (kWh/t)	Potência (MW)	Eff. (%)	Duração
Sensível	10 - 50	0,001 - 10	50 - 90	dias / meses
Latente	50 - 150	0,001 - 1	75 - 90	horas / meses
Reação termoquímica	120 - 250	0,01 - 10	75 - 100	horas / dias

Fonte: (JOUHARA *et al.*, 2020)

A capacidade térmica C do meio de armazenamento é dada pela razão entre o calor armazenado ΔQ e a variação de temperatura ΔT . Observa-se na Equação (3.6) que o calor e a temperatura relacionam-se linearmente, e que a capacidade térmica está ligada diretamente a quantidade do material utilizado. Pode-se ver na Tabela 7 algumas substâncias que, ao adicionar calor, sua temperatura aumenta em quantidade diferente. Essa alteração é conhecida como capacidade de calor (C). A substância absorve ou perde calor com a mudança da temperatura (T).

Tabela 7 – Calor específico (C_p) a 25°C

Substância	Fase	C_p (J/gK)
Ar	gás	1,0035
Alumínio	sólido	0,897
Dióxido de Carbono	gás	0,839
Hidrogênio	gás	14,3
Nitrogênio	gás	1,04
Urânio	sólido	0,116
Água	líquido	4,1813

Fonte: (JOUHARA *et al.*, 2020)

O calor latente está ligado a mudança de fase (sólido para líquido ou líquido para gasoso) em uma faixa de temperatura específica do material. Comparado ao sistema de calor sensível, este possui alta densidade de energia devido à alta quantidade de calor requerida para realização da mudança de fase, e também muito maior que a capacidade de calor específico (JOUHARA *et al.*, 2020). O calor armazenado é igual à diferença de entalpia ΔH entre a fase sólida e líquida, apresentado na Equação 3.7.

$$\Delta Q = \Delta H = m\Delta h \quad (3.7)$$

Os materiais que mudam a fase líquido-gasoso são caracterizados por alta densidade de armazenamento de energia. Assim, eles são mais propensos a serem usados do que sólidos e líquidos (JOUHARA *et al.*, 2020). A capacidade de calor latente de um material pode ser definida pela Equação:

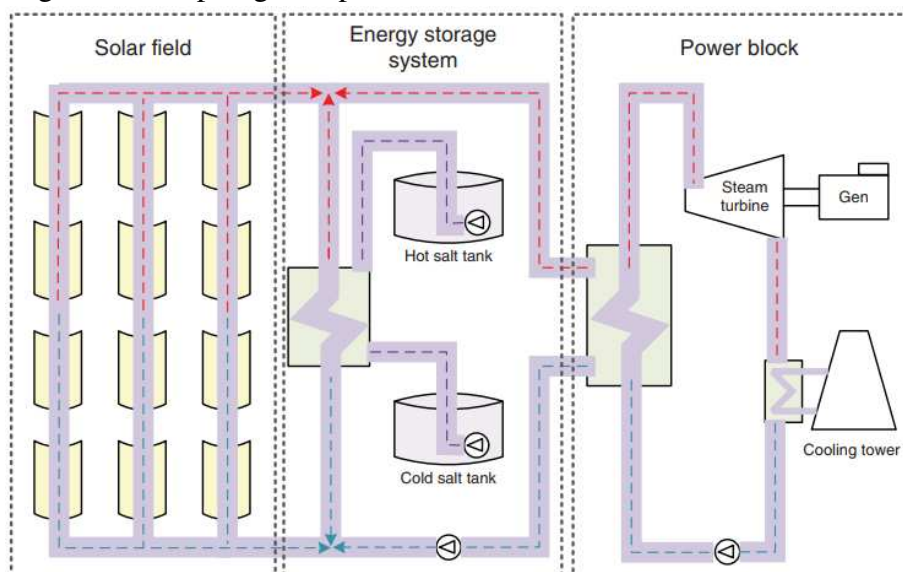
$$Q = mC_p dT(s) + mL + mC_p dT \quad (3.8)$$

Onde m é a massa do material de mudança de fase (kg), L é a entalpia de fusão e dT é a diferença de temperatura. A Equação 3.8 descreve o calor sensível da fase sólida, o calor latente de fusão e o calor sensível da fase líquida (JOUHARA *et al.*, 2020).

O armazenamento de energia termoquímica é caracterizado por alta densidade de energia, alta eficiência energética e alta temperatura operacional, sendo obtido por meio de uma reação química reversível. Nas ligações químicas das moléculas envolvidas no ciclo de carga e descarga, a energia química é retida, mas a eficiência da reação diminui com o tempo.

O armazenamento por meio térmico, no que tange a geração de energia renovável, é considerado um meio adequado com a utilização da energia solar. As usinas heliotérmicas podem utilizar o armazenamento para gerar energia quando a solar não for suficiente. Para essas usinas, o armazenamento não é necessário, mas é uma das vantagens em relação a outros tipos de energia, pois a única que transforma a radiação solar em calor, podendo ser armazenada.

Figura 19 – Topologia de planta solar térmica



Fonte: (GONZALEZ, 2016)

As usinas heliotérmicas têm como principal conceito o aquecimento de um mate-

rial com alto calor específico. Uma vez aquecido, esse material retém calor por um período considerável antes de resfriar. Portanto, essa energia térmica pode ser aproveitada, mesmo na ausência de radiação solar, como durante a noite, para produzir vapor e acionar uma turbina. Essa abordagem se torna interessante, por estender a capacidade de operação das instalações solares. Além disso, torna as usinas solares térmicas despacháveis, ou seja, aptas a serem controladas de forma flexível, uma vez que é possível armazenar energia para posterior geração.

3.3 Armazenamento de Energia por Meio Elétrico

Os supercapacitores e supercondutores oferecem abordagens distintas para armazenamento. Enquanto os supercapacitores proporcionam rápida carga e descarga, ideais para aplicações de resposta instantânea, os supercondutores apresentam a notável capacidade de conduzir corrente elétrica sem perdas quando operam em temperaturas extremamente baixas. Os próximos subtópicos abordarão essas duas tecnologias.

3.3.1 Supercapacitor

Os supercapacitores, também conhecidos como capacitores eletroquímicos ou de dupla camada, são dispositivos de armazenamento de energia que possuem alta densidade e alta taxa de transferência em comparação com os capacitores convencionais. O princípio do armazenamento é o mesmo dos capacitores convencionais, com exceção que o material isolante é substituído por um eletrólito.

Estes são baseados em células eletroquímicas que contêm dois eletrodos condutores, um eletrólito e uma membrana que permite a movimentação de íons entre os eletrodos, semelhante às baterias. A principal diferença entre supercapacitores e baterias reside no fato de que nenhuma reação química ocorre nas células, sendo a energia armazenada eletrostaticamente (GONZALEZ, 2016).

Assim como um capacitor convencional, a capacitância de um supercapacitor é determinado pelos parâmetros dimensionais, sendo diretamente proporcional à área das placas (A) e inversamente proporcional à distância (d) que as separa (ver equação 3.9), sendo ϵ a constante dielétrica.

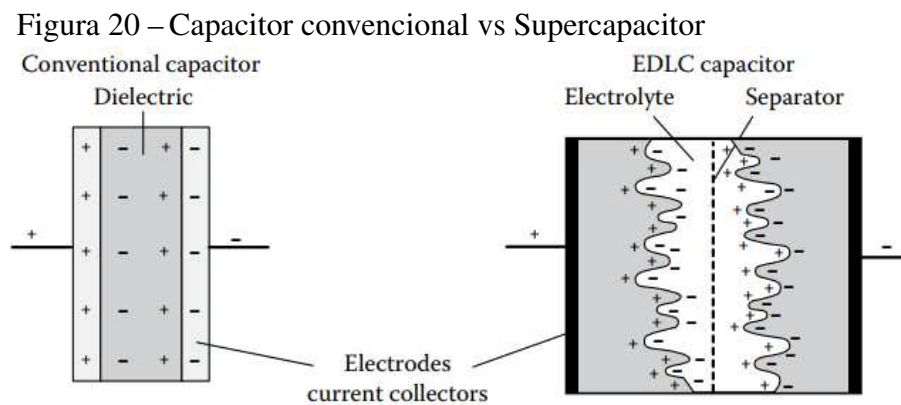
$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (3.9)$$

No caso dos supercapacitores, o valor da capacitância (C) é elevado devido à área superficial dos eletrodos ser maior e a distância entre as placas ser menor. Assim, esses dispositivos conseguem armazenar uma quantidade de energia muito maior do que qualquer capacitor convencional de mesma massa ou volume.

Sabe-se que a quantidade de carga (Q) pode ser descrita pelo produto da capacitância (C) e a tensão (V) entre as placas, e a energia armazenada (W) é proporcional a capacitância e ao quadrado da tensão do eletrodo. Logo temos a Equação (3.10) para a quantidade de carga e a Equação (3.11) para a energia armazenada. A diferença de um o capacitor convencional e o supercapacitor é apresentado na Figura 20, onde é possível notar que o supercapacitor possui área maior e a mudança de um dielétrico para o eletrólito.

$$Q = CV \quad (3.10)$$

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \quad (3.11)$$



Fonte: (RUFER, 2017)

As vantagens dos supercapacitores, incluem alta densidade de potência (500–5000W/kg), alta eficiência (85–97%), rápido tempo de resposta (< 5 ms), longa vida útil (cerca de 40 anos) e curto tempo de carregamento. Suas desvantagens incluem uma alta taxa de autodescarga (5-40%/dia), alto custo de capital (US\$ 6.000/kWh) e a energia armazenada pode fornecer apenas alguns minutos de energia (ZHANG *et al.*, 2021).

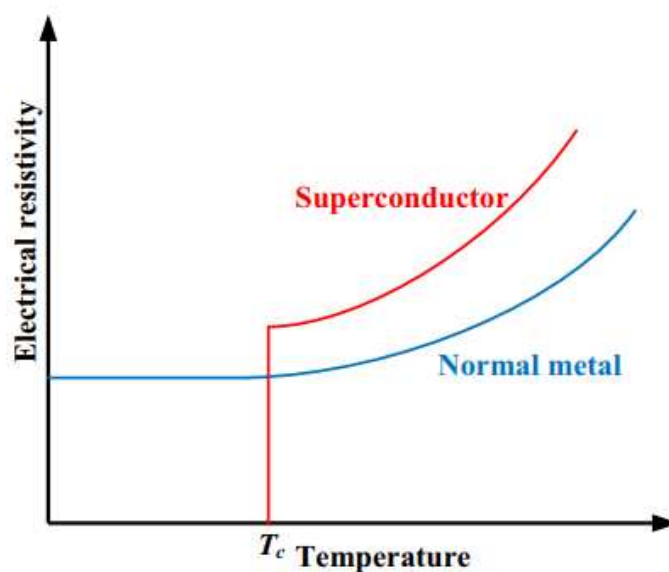
Devido às suas características, os supercapacitores são adequados para aplicações com um número elevado de ciclos curtos de carga e descarga. Por outro lado, a energia

armazenada nos supercapacitores deve ser usada rapidamente devido a autodescarga de aproximadamente 5% que os torna inadequados para aplicações que requerem armazenamento de energia por períodos longos. Logo, os supercapacitores são uma boa fonte de potência e com uma dinâmica rápida, mas não são a melhor escolha quando se trata de armazenamento de grandes volumes de energia.

3.3.2 Supercondutores

SMES, do inglês *Superconducting magnetic energy storage*, é um sistema no qual a energia é armazenada em um campo magnético. Esse campo surge com a passagem de uma corrente elétrica que flui por uma bobina supercondutora a baixas temperaturas. Os materiais supercondutores têm como características sua resistência quase desprezível em baixas temperaturas.

Figura 21 – Resistividade *versus* Temperatura

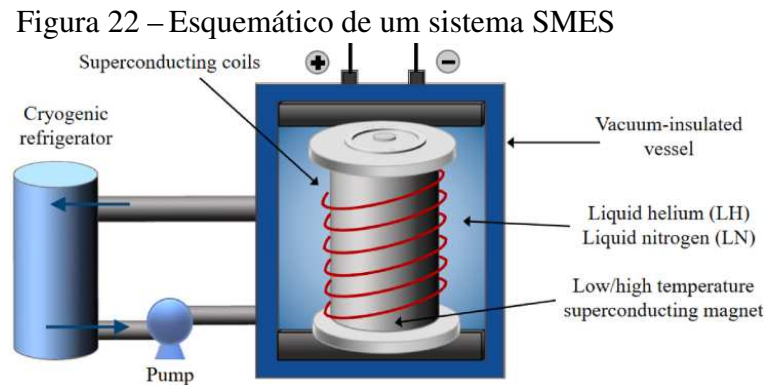


Fonte: (ADETOKUN *et al.*, 2022)

A Figura 21 mostra um gráfico de resistividade elétrica contra temperatura para supercondutores. O gráfico mostra como a resistividade se aproxima rapidamente de zero em temperaturas críticas em oposição aos metais normais, afirmando assim a relação com a baixa temperatura. Dessa maneira, o campo magnético na bobina pode ser criado com uma corrente pequena fluindo através dela.

O armazenamento de energia por meio do supercondutor é geralmente composto por uma bobina supercondutora, conversor de potência, sistema de vácuo e sistema de resfriamento a

nitrogênio ou hélio líquido, como ilustra a Figura 22. A energia armazenada é determinada pela indutância (L) (em henry) da bobina e a corrente elétrica (I) (em ampere) que flui pela bobina. A expressão que representa essa descrição é dada na Equação 3.12.



Fonte: (ZHANG *et al.*, 2021)

$$E = \frac{1}{2}LI^2 \quad (3.12)$$

Ao falar do SMES, vale ressaltar que existem dois tipos, dependendo da temperatura de trabalho, podendo ser de alta temperatura ou baixa temperatura, sendo esses tipos de sistema resfriados a base de nitrogênio líquido ou hélio líquido, respectivamente. Os sistemas de alta temperatura trabalham em torno de 70K (-203,15°C), enquanto os de baixa temperatura em torno de 5K (-268,15°C). Um aspecto fundamental para o bom funcionamento do sistema é manter essas baixas temperaturas de operação (GONZALEZ, 2016).

As vantagens do SMES incluem resposta instantânea às solicitações de carga e descarga, alta densidade de potência (4000 W/L), alta eficiência (95–98%) e vida útil elevada (30 anos). As desvantagens incluem alto custo de capital (US\$ 104/kWh), alta taxa de autodescarga (10 – 15%/dia), bobinas sensíveis a mudanças de temperatura (ZHANG *et al.*, 2021). Tais características tornam os sistemas SMES adequados para aplicações envolvendo altas potências, e requerem tempos de descarga inferiores a 1 segundo.

Os SMES são uma tecnologia de armazenamento de energia em estágio de desenvolvimento, ainda de custo elevado em função tanto dos fios supercondutores como dos sistemas de refrigeração requeridos.

3.4 Sistemas de Armazenamento de Energia Química

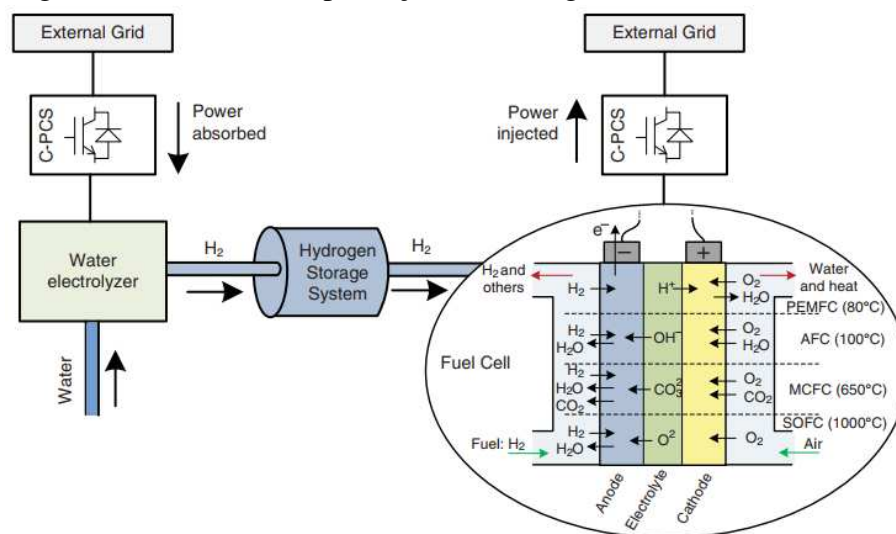
No cenário do armazenamento de energia, duas tecnologias têm se destacado nesse cenário: hidrogênio verde e as baterias. O hidrogênio verde, produzido através da eletrólise utilizando energia renovável, oferece uma forma versátil e sustentável de armazenamento. Por outro lado, as baterias continuam a evoluir, fornecendo soluções eficazes para armazenar energia em pequena e grande escala ou para alimentar veículos elétricos.

3.4.1 Hidrogênio

O armazenamento de energia por hidrogênio, ou hidrogênio verde, é obtido através da eletrólise da água, onde a eletricidade provem de fontes renováveis, como energia solar ou eólica, podendo também ser obtido por hidroeletricidade e biomassa de rejeito (INFOMONEY, 2023).

Um sistema de armazenamento de hidrogênio é, geralmente, composto por um conversor eletroquímico, depósito de armazenamento e uma célula de combustível. Essa última consome o agente redutor e o oxidante, que reagem na presença de um eletrólito no processo de geração de energia elétrica. Uma célula de combustível reversível, como a célula de hidrogênio, utiliza o hidrogênio e oxigênio para gerar eletricidade e água, e no processo inverso consome água e eletricidade para produzir hidrogênio e oxigênio, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Processo de produção do Hidrogênio



Fonte: (GONZALEZ, 2016)

A geração do hidrogênio verde por eletrólise consiste na decomposição das moléculas

de água (H_2O) em oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2), devendo a água utilizada conter sais e minerais para conduzir a eletricidade. Dois eletrodos submersos na água e conectados a uma fonte de energia aplicam uma corrente contínua, causando a dissociação das moléculas, pela atração que os eletrodos exercem sobre os de cargas opostas.

Esse processo, pouparia a emissão de 830 milhões de toneladas anuais de CO_2 produzidos pela queima de combustíveis fósseis. Da mesma forma, substituir todo o H_2 cinza mundial significaria 3.000 TWh renováveis adicionais por ano, porém ainda há dúvidas se tal processo é economicamente viável (IBERDROLA, 2023).

O hidrogênio verde gerado atualmente é de duas a três vezes mais caro do que a energia gerada a partir de combustíveis fósseis. Estima-se que os custos de produção do hidrogênio verde podem cair 62% até 2030, para US\$ 1,4 e US\$ 2,3 por quilo. Nesse patamar, a paridade entre o custo do hidrogênio verde e do hidrogênio cinza pode ocorrer entre 2028 e 2034, com projeções abaixo de US\$ 1 por quilo em 2040 (H2BRASIL, 2023).

Uma série de projetos estão sendo planejados ao redor do mundo países como Austrália, Holanda, Alemanha, China, Arábia Saudita e Chile. Dentre os projetos, destaca-se o NorthH2, da petrolífera anglo-holandesa Shell, no porto do Ems, que prevê a construção de 10GW de eletrolisadores. O projeto tem a meta de produzir 1GW até 2027 e 4GW até 2030, utilizando a energia eólica offshore (BRASIL, 2023).

No Brasil, há 10 projetos em desenvolvimento, sendo oito usinas comerciais e dois pilotos. Oito situam-se no nordeste nos estados da Bahia, Pernambuco e Ceará, sendo o último o líder. Estima-se que somem mais US\$ 30 bilhões em investimentos, de acordo com levantamento do Instituto Nacional de Energia Limpa (EPBR, 2023).

Devido o Brasil ser rico em fontes de energia limpa, busca-se ainda aumentar esse portfólio como, por exemplo, a implantação de parques eólicos offshore, trazendo oportunidades promissoras de diversificação da matriz energética do país, podendo este recurso ser grande aliado para a produção de hidrogênio verde.

3.4.2 BESS

Os sistemas de armazenamento de energia por baterias, do inglês battery energy storage system (BESS), é um acumulador químico ligado em série ou paralelo, que tem a capacidade de transformar, por meio de reações químicas (oxidação-redução), a energia química em energia elétrica, ou vice-versa, com baixo valor de emissões prejudiciais ao ambiente, sem

ruído, e solicitando pouca manutenção (SILVA, 2008).

Os BESS estão se tornando cada vez mais relevantes como uma das principais soluções para a efetiva integração da grande quantidade de energia renovável (IRENA, 2023). Atualmente, há uma variedade de baterias disponíveis no mercado, e suas características técnicas e desempenho variam conforme a tecnologia, fabricante e fornecedor. O uso de baterias para armazenamento de energia é considerada uma tecnologia já consolidada, mas isso não significa que o desenvolvimento desta se encontra estagnada.

As baterias são atrativas pela diversidade de tecnologias disponíveis no mercado, cujo tempo de descarga pode variar de segundos até dias, enquanto a capacidade de armazenamento pode variar de quilowatts até dezenas de megawatts. Dada a variedade, é importante distinguir baterias quanto a capacidade de carga, sendo assim classificadas como primárias e secundárias.

As baterias primárias são sujeitas à inversão das reações eletrolíticas e devem ser descartadas após sua descarga completa (CARNEIRO *et al.*, 2017). Sua vantagem é a densidade de energia e densidade específica de energia que são superiores a das secundárias. Já as baterias secundárias, ao contrário das baterias primárias, são caracterizadas pela ocorrência de reações reversíveis, gerando reagentes químicos reconvertidos a quantidades próximas da inicial.

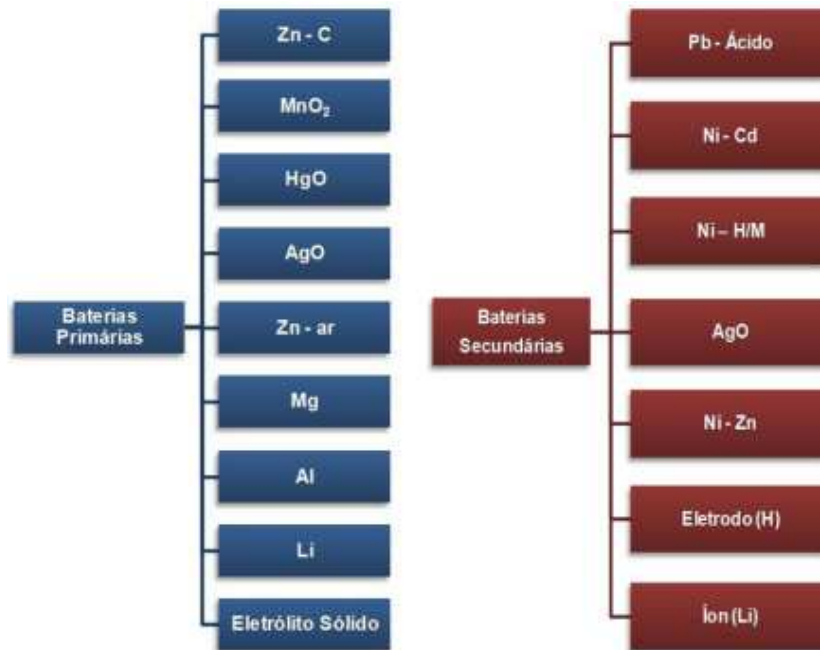
Sendo assim, as baterias secundárias podem ser recarregadas e apresentar ciclos de vida mais longos. A Figura 24 apresenta os principais tipos de baterias primárias e secundárias, sendo o nosso foco as secundárias. Já a Figura 25 apresenta uma comparação da densidade específica de energia entre os tipos primários e secundários.

As baterias se distinguem pelos seus diferentes aspectos construtivos, sendo as mais conhecidas as de chumbo-ácido (Pb-A), íons de lítio (Li-íon), níquel-cádmio (NiCd), sódio e enxofre (NaS). Dentre essas as de chumbo-ácido (Pb-A) são as de tecnologia mais antigas e utilizadas. Entretanto, atualmente as baterias íons de lítio (Li-íon) são empregadas em muitas aplicações.

As baterias de **Chumbo-Ácido (Pb-A)** apresentam desvantagens como a baixa densidade energética (são pesadas e volumosas) e seu tempo de vida curto, dependendo da profundidade de descarga (DoD). Uma vantagem importante é o seu baixo custo em comparação com os custos de outros tipos de baterias. São muito empregadas em sistemas de energia offgrid, no atendimento a populações menos favorecidas em locais de difícil acesso.

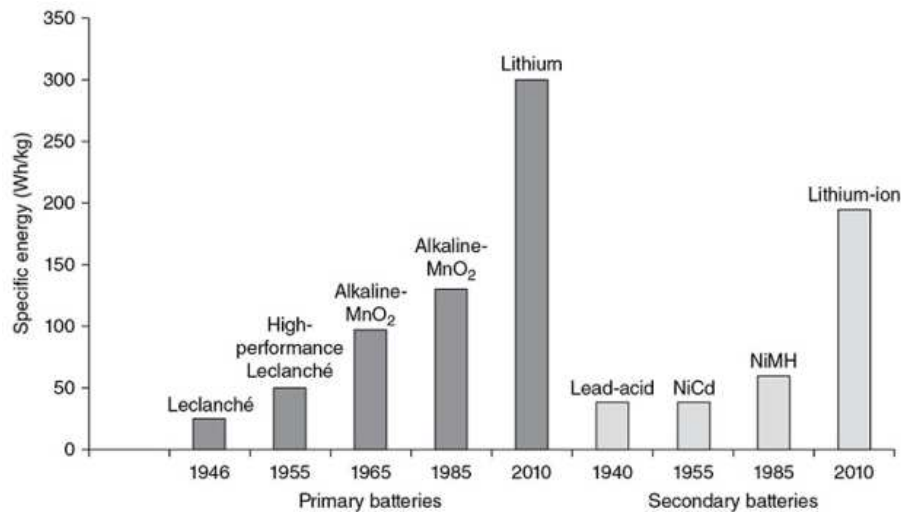
Essas baterias podem ser encontradas em diversas configurações, sendo as mais comuns as ventiladas, que usam eletrólito líquido, as baterias de gel reguladas por válvula

Figura 24 – Baterias primárias e secundárias



Fonte: (CARNEIRO *et al.*, 2017)

Figura 25 – Comparativo de densidades entre primárias e secundárias



Fonte: (BEARD, 2019)

(VRLA) e as baterias com eletrólito embebido em manta de fibra de vidro (AGM). As baterias VRLA possuem como principal característica a segurança, tendo sido recomendadas para ambientes fechados sem ventilação especial, exceto onde exista calor excessivo (VIEW,). A bateria AGM foi projetada para veículos de alta desempenho, e exigem muito das baterias, como os carros com start stop (MOURA,).

As de **Níquel-Cádmio (NiCd)** foram empregadas em equipamentos eletrônicos, sendo substituídas pela tecnologia de níquel-metal-hidreto (NiMH), que apresenta características semelhantes com a vantagem da não utilização do cádmio, material tóxico que oferece dificul-

dades para o descarte das baterias (SOLAR,). Outro problema é que a bateria de NiCd tem o efeito memória, que reduz a sua capacidade de armazenamento.

Uma bateria de **Sódio-Enxofre (NaS)**, é referida como uma “bateria de sal fundido” construída a partir de sódio líquido (Na) e enxofre (S). Diferentemente, essa possui o ânodo e o cátodo líquidos e o eletrólito sólido. Possui densidade de energia elevada quando comparada a eficiência do PbA em carga/descarga de 89% a 92%, bom ciclo de vida e extremamente robusta. Sua desvantagem é que, por trabalhar com os eletrodos líquidos, sua temperatura operacional é de 300°C a 350°C, além de que possui autodescarga maior (MITCHELL *et al.*, 2017).

As baterias **Íons de Lítio (Li-íon)** superam outros tipos de baterias recarregáveis em aspectos como a capacidade de armazenamento de energia, o número de ciclos de operação, a velocidade de carregamento e o custo-benefício. Seu maior problema é a segurança comprometida pelo eletrólito inflamável, requerendo o uso de sistemas eletrônicos de controle e monitoramento.

Entretanto, a tecnologia de íons de lítio possibilitou o avanço dos sistemas de armazenamento de energia, principalmente associados às fontes renováveis intermitentes (solar e eólica), assim como a popularização dos veículos elétricos. Estão disponíveis no mercado dentro da tecnologia de íons de lítio várias combinações químicas.

Cada combinação tem suas próprias características elétricas. Os produtos químicos mais populares para baterias de íon-lítio são: lítio e óxido de cobalto (LCO); lítio e óxido de manganês (LMO); lítio, níquel, manganês e cobalto (NCM); lítio, ferro e fosfato (LFP); lítio e titânio (LTO) (SOLAR,).

A Tabela 8 traz informações das baterias de íons de lítio que foram listadas. Pode-se observar que, dependendo do composto que for utilizados, a performance será diferente. Como exemplo, olhando para as baterias LTO, estas possuem alta capacidade de carga e descarga, tempo de vida longo, mas baixo valor de tensão por célula (STAN *et al.*, 2014).

Tabela 8 – Características e propriedades das baterias Íon de Lítio usando diversas químicas

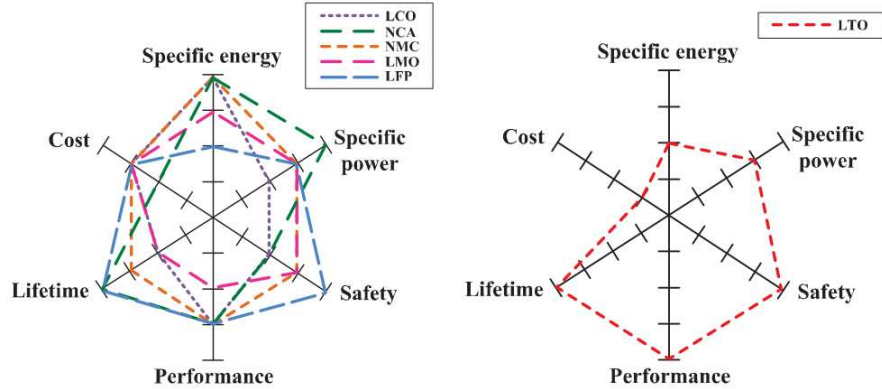
Tipo	Tensão nominal (V)	Temperatura de operação (°C)	Carga/Descarga (C-rate)	Energia específica (Wh/kg)	Tempo de vida (Ciclos)	Aplicações
LCO	3,6	0 - 55	1C	170 - 190	500	Celulares, câmeras, notebooks
LMO	3,7	0 - 55	5C	140 - 180	1000 - 2000	Celulares, câmeras, notebooks
NCM	3,7	0 - 55	5C	130 - 150	2000 +	EV, PHEV
LFP	3,2	0 - 55	10C	90 - 130	3000 +	Grid, EV, PHEV
LTO	2,7	-40 - 55	30C	70	15000 +	HEV, Grid

Fonte: (MITCHELL *et al.*, 2017)

Além da Tabela 8, é possível comparar as tecnologias também a partir da Figura 26. Apresentado um gráfico em forma de hexágono para efeito comparativo do desempenho das

tecnologias no que versa sobre energia específica, potência específica, segurança, ciclo de vida, desempenho e custo.

Figura 26 – Comparação das químicas de Íons de Lítio



Fonte: (STAN *et al.*, 2014)

Por esse motivo, usando os carros elétricos como exemplo, empresas estão usando químicas diferente, tendo em vista que não é possível ter todas as características apresentadas no hexágono. A Figura 27 apresenta alguns veículos elétricos e percebe-se que cada um pode usar uma tecnologia diferente. Diante dessa discussão, abordando baterias para armazenamento de energia e mobilidade elétrica, cabe ainda abordar a diferença entre baterias estacionárias e automotivas.

Figura 27 – Modelos de carros elétricos e química aplicada

QUÍMICA	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Manganese Oxide	Lithium Nickel Manganese	Lithium Iron Phosphate	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide	Lithium Titanate
Abreviação	$LiCoO_2$	$LiMn_2O_4$	$LiNiMnCoO_2$	$LiFePO_4$	$LiNiCoAlO_2$	Li_2TiO_3
Acrônimo	(LCO)	(LMO)	(NMC)	(LFP)	(NCA)	(LTO)
	Nissan Leaf	BMW i3	Renault Z Zoe			
	Tesla Model S	Smart	BYD E6			

Fonte: (GESEP, 2021)

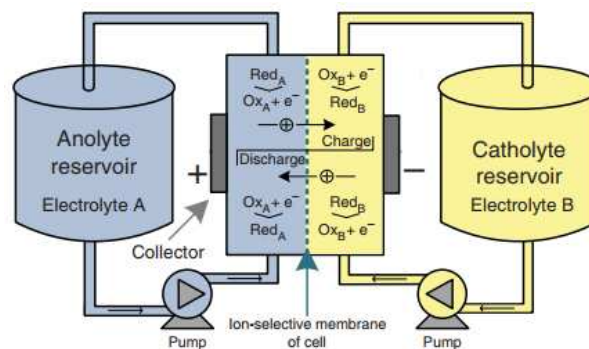
Apesar de possuírem a mesma tecnologia, é importante compreender que tais baterias

são recomendadas para aplicações distintas. As estacionárias possuem um ciclo de vida maior do que as automotivas para atender às funcionalidades a que são destinadas, como sistemas de telecomunicações e de energias alternativas, por exemplo. Por isso, elas proporcionam segurança de fornecimento e acúmulo de energia necessária para quando é solicitada.

As baterias automotivas são projetadas para estarem sempre carregadas e fornecerem grandes correntes em curtos períodos, como na partida do motor. Uma vez que o motor esteja funcionando, o alternador encarrega-se de mantê-la sempre carregada. Por sua vez, as baterias estacionárias são projetadas para ciclos de descarga profundos e suportam quantidades maiores de ciclos de carga e descarga, o que não vale para automotivas.

Outro tipo de bateria, são as baterias de fluxo, que diferem das demais pelo fato de que o eletrólito é armazenado em tanques, sendo necessário bombear os eletrólitos para entrarem em contato com dois eletrodos separados por uma membrana. Esta membrana permite o fluxo de íons, mas não deixa as soluções se misturarem.

Figura 28 – Estrutura da bateria de fluxo



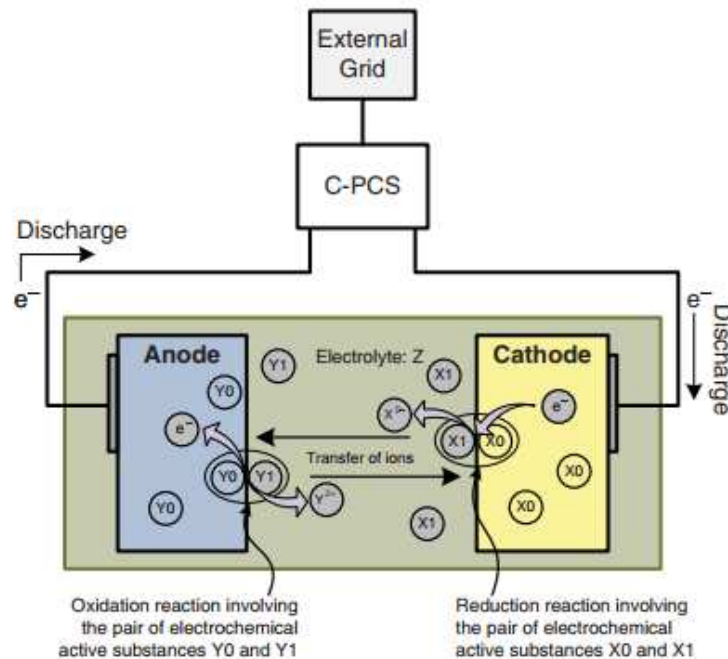
Fonte: (GONZALEZ, 2016)

O volume dos tanques determina a quantidade de energia que pode ser armazenada. A potência desse tipo de bateria é superior às baterias convencionais. As principais baterias nessa categoria são zinco-bromo (ZnBr) e redox de vanádio (VRB). Um esquema desse tipo de bateria é apresentado na Figura 28.

As baterias são compostas por três componentes, sendo constituídas por dois eletrodos (ânodo e cátodo), uma substância eletrolítica (eletrólito, geralmente uma solução líquida) e um separador. A partir da Figura 29 é possível visualizar a composição da bateria, bem como o seu princípio de operação.

Nos eletrodos, durante a descarga, ocorrem reações de oxidação no ânodo da bateria (o eletrodo negativo), que é o eletrodo que capta os elétrons perdidos pelo componente. Por

Figura 29 – Estrutura de bateria e princípio de operação



Fonte: (GONZALEZ, 2016)

outro lado, as reações de redução ocorrem no cátodo da bateria (o eletrodo positivo), que é o eletrodo que fornece os elétrons ganhos pelo componente reduzido.

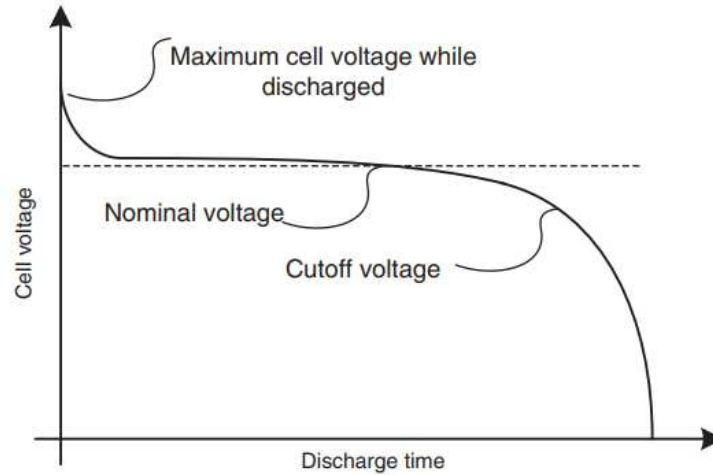
O eletrólito, além de fazer com que as substâncias ganhem ou percam elétrons, leva as reações a produzirem íons, partículas com cargas elétricas não neutras. Para garantir o equilíbrio entre as substâncias do ânodo e do cátodo, esses íons são trocados entre eles. As baterias são compostas por várias células, em série ou em paralelo para atingir as características elétricas desejadas.

No momento da escolha de uma bateria ou dimensionamento de um banco de baterias, faz-se necessário ter conhecimento dos parâmetros que podem afetar a configuração do sistema e sua vida útil como, por exemplo, a temperatura e velocidade de descarga. Esses dois fatores impactam diretamente na capacidade de armazenamento do sistema em diferentes condições. Logo, ao realizar um dimensionamento é necessária atenção às condições no sistema está inserido e o comportamento do mesmo.

Devemos observar que, ao contrário das baterias primárias, as baterias recarregáveis não podem ser descarregadas por completo, tendo em vista que isso comprometerá a vida do armazenador. Além da profundidade de descarga estar relacionada ao ciclo de vida da bateria, deve-se observar também a faixa de tensão para não ocorrerem danos aos equipamentos. Sendo assim, existe uma faixa máxima de tensão que a mesma deve operar, bem como uma faixa

mínima chamada tensão de corte. Como exemplo, as baterias de 12V devem operar de 13,8V até 10,5V (tensão de corte). A Figura 30 apresenta essa característica de forma genérica.

Figura 30 – Faixa de tensão para operação de bateria



Fonte: (GONZALEZ, 2016)

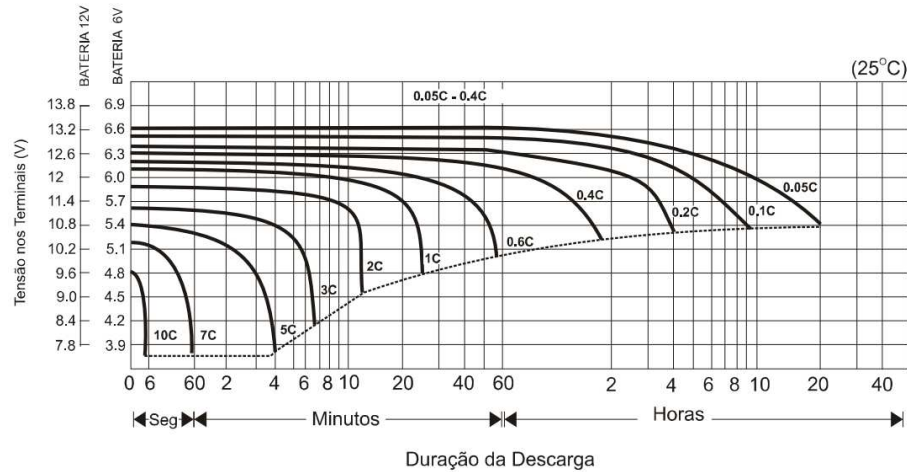
Como o comportamento da bateria não é linear, ou seja, quanto maior for a corrente de descarga, menor será sua capacidade e autonomia, não é trivial falar em uma bateria de 100Ah. Deve-se falar, por exemplo, em uma bateria de 100Ah com autonomia de 20 horas e tensão de corte 10,5V, o que também pode ser escrito como 100Ah C20 $V_{\text{corte}}=10,5V$. Esta bateria permitirá descargas de $100/20 = 5A$ durante 20 horas, quando a mesma irá atingir 10,5V.

Sabendo que, quanto maior a corrente de descarga, menor será sua capacidade e autonomia, o inverso também é válido e podemos avaliar essa característica pelo chamado C-rate (C_r), uma expressão que passou a ser usada para estabelecer uma base comum para a taxa de descarga entre baterias. Uma bateria de 60Ah e $C_r = 1$, significa que a bateria foi descarregada com uma corrente de 60A em 1 hora. Caso $C_r = 5$, essa bateria foi descarregada com uma corrente de 300A em 0,2 horas, ou seja, 12 minutos. A Figura 31 apresenta essa característica.

Outro fator importante é a temperatura de operação da bateria, pois sua capacidade e vida útil dependem dela. A medida em que a temperatura ambiente aumenta, a capacidade nominal da bateria também aumenta, o mesmo vale caso contrário. A Figura 32 mostra os efeitos da temperatura em relação à capacidade da bateria. Há uma curva para cada corrente de descarga, onde a corrente de descarga é dada como um percentual da capacidade (C).

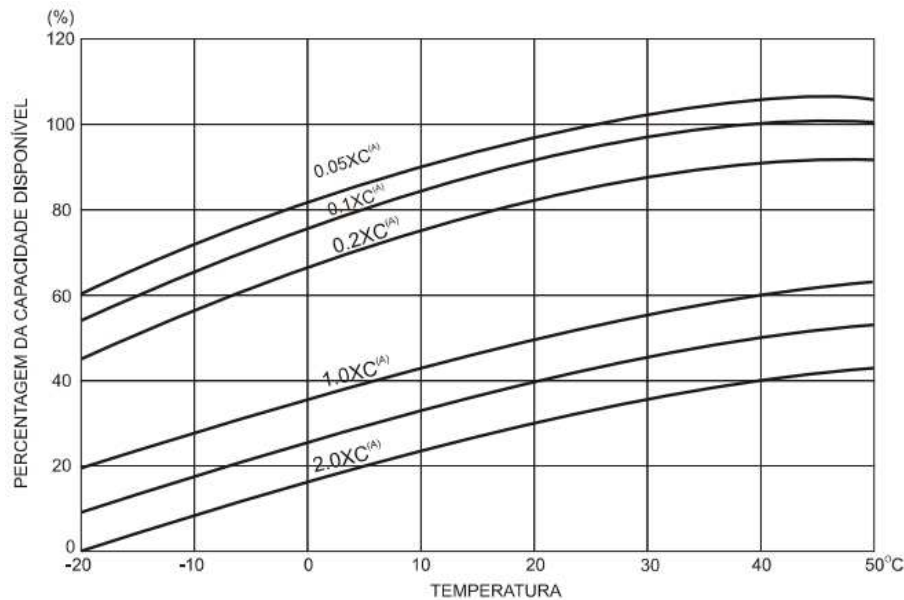
As baterias são naturalmente instáveis, ou seja, mesmo estando sem nenhuma carga, perde lentamente a energia armazenada e pode vir a se descarregar completamente. Por essa razão, é recomendada uma recarga sempre que a bateria permanecer em circuito aberto por mais

Figura 31 – Curvas de descarga



Fonte: (UNICOBA)

Figura 32 – Temperatura versus Capacidade

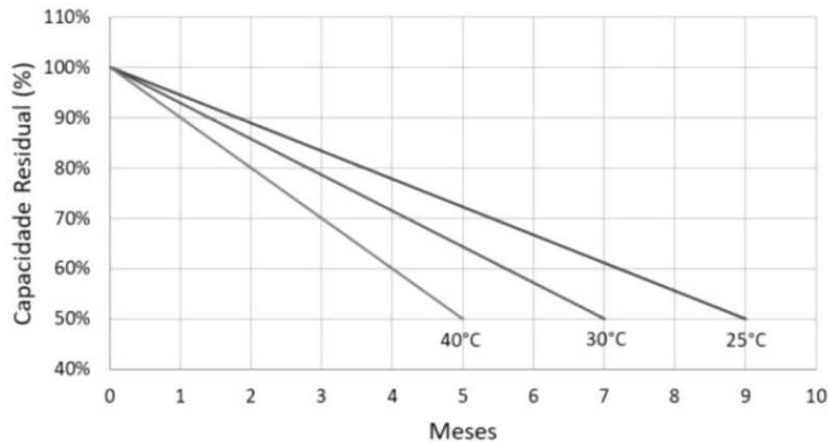


Fonte: (UNICOBA)

de 120 dias. A Figura 33 apresenta a relação entre temperatura sob a qual estão armazenadas.

Para finalizar, será ilustrado o processo de dimensionamento de bancos de baterias, para um banco de baterias com tensão de 24V, para atender uma carga de 3346Wh/dia com fornecimento monofásico a 220V, com autonomia para dois dias.

Primeiramente, pode-se calcular a energia a ser consumida pelas 48 horas (2 dias) partir da Equação 3.13. Onde, (E_a) energia armazenada, (E_c) energia consumida e (P_d) profundidade de descarga. Em seguida, é possível calcular a capacidade de armazenamento do banco de baterias pela Equação 3.14.

Figura 33 – Autodescarga *versus* Tempo

Fonte: (MOURA)

$$E_a = \frac{E_c}{P_d} = \frac{(3346 \cdot 2)}{0,3} = 22306Wh \quad (3.13)$$

$$C_{banco} = \frac{E_a}{U_{banco}} = \frac{22306}{24} = 930Ah \quad (3.14)$$

Com essas informações é possível calcular o número de baterias em série e paralelo que irão compor esse banco. É necessário saber a tensão e capacidade da bateria que será utilizada. Com a tensão do banco de baterias e da bateria que será utilizada é possível calcular o número de baterias em série. Para determinar a quantidade em paralelo o raciocínio é o mesmo, porém, utilizando a capacidade do banco e da bateria. A bateria utilizada para o exemplo possuirá uma tensão de 12V e 220Ah. Com isso, pode-se calcular o número de baterias em série (N_{bs}) pela Equação 3.15 e o número de baterias em paralelo pela Equação 3.16.

$$N_{bs} = \frac{U_{banco}}{U_{bateria}} = \frac{24}{12} = 2 \quad (3.15)$$

$$N_{bp} = \frac{C_{banco}}{C_{bateria}} = \frac{750}{220} = 4,24 \approx 4 \quad (3.16)$$

Logo, o número de baterias total é obtido pelo produto entre o número de baterias em série e o número de baterias em paralelo, totalizando 8 baterias. As baterias escolhidas foram do modelo DF4001 para 20 horas da Freedom, apresentado na Figura 34, onde é apresentado em termos de capacidade.

Figura 34 – Capacidade em ampère hora a diferentes regimes de descarga

Modelo	HORAS															MINUTOS			
	100	20	10	9	8	7	6	5	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1	45	30	15
DF300	30	26	24	23,8	23,5	23,1	22,8	22	21,9	21,6	21	21	20,5	20	19,2	18	15,8	12,5	10
DF500	40	36	30	29,9	29,8	29,7	29,4	28,8	27,7	27	26,6	25,8	24,8	24	22,5	20	19	16,5	13
DF700	50	45	41	40,5	40	39,5	39,2	37,5	37,1	36,8	35	34,5	34	32,5	31,5	27	24	21,5	16,3
DF1000	70	60	54	51,8	51,6	51,1	49,2	49	47,3	46	43,8	43,5	42,5	38	37,8	35	31,9	27,5	21
DF1500	93	80	76	73,8	72	70	69	66	65,3	64	63,7	63	62,5	59	57	54	51,8	45	32,5
DF2000	115	105	94	92	91,8	91	87	85	82,8	81,2	79,1	75	73,8	69	66	60	56,3	48	37,5
DF2500	165	150	130	129,8	129,6	126	120	115	112,5	112	108,5	102	100	94	87	81	74,3	65	50
DF3000	185	170	156	153	152	150	148,2	140	135	132	126	123	120	114	108	95	84	76	57,8
DF4001	240	220	200	193,5	192	185,5	180	175	171	166	161	156	150	144	135	120	108,8	95,5	72

Fonte: Freedom

4 APLICAÇÕES

Esse capítulo tem como objetivo trazer exemplos de aplicações reais com informações encontradas sobre o empreendimento. Sistemas de armazenamento de energia são usados para diversas aplicações, seja na distribuição, transmissão, serviços ancilares e gerenciamento. A Tabela 9 fornece uma visão do número de projetos por tipo de armazenamento para diferentes serviços. Essa tabela oferece informações sobre a aplicação de sistemas de armazenamento de energia em diversos contextos.

Tabela 9 – Número de projetos por tipo de serviço

Serviço	Químico	Mecânico	Térmico
Time shift	395	303	97
Suporte de tensão	95	32	16
Reserva operacional (Não girante)	21	5	9
Reserva operacional (Girante)	49	51	13
Reserva operacional (Complementar)	42	13	6
Regulação de Frequência	137	52	24
Black Start	27	14	4
Controle de estabilidade	14	6	-
Alívio do congestionamento da transmissão	16	2	3
Adiamento de investimentos	22	4	6
Gerenciamento da demanda	13	4	2
Microrredes	76	16	12

Fonte: Elaborada pelo autor.

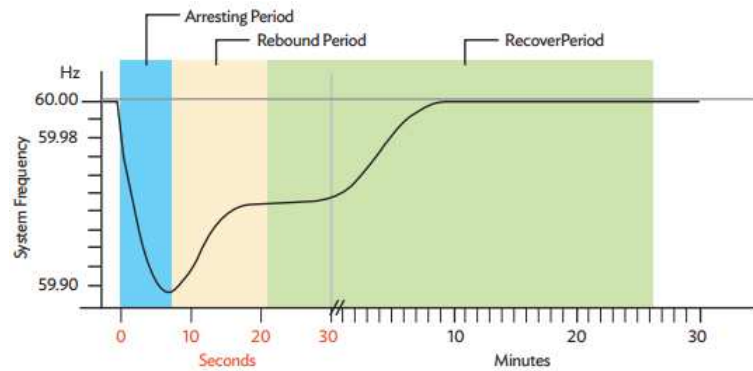
Abaixo, uma breve definição de alguns serviços listados na tabela, visando fornecer um melhor entendimento sobre as suas respectivas funções e aplicações.

Time shifting, uma aplicação bastante comum, que consiste em armazenar energia quando o preço de mercado está baixo, absorvendo energia da rede, carregando o sistema de armazenamento de modo que a energia possa ser utilizada ou vendida em momento posterior, quando o custo for mais elevado.

Regulação de frequência, é o ajuste constante da potência no tempo para manter a frequência do sistema, garantindo a estabilidade da rede. Se a demanda exceder a oferta, a frequência do sistema cai, podendo ocasionar quedas de energia e apagões. Se a geração superar a demanda dos consumidores, a frequência do sistema aumentará.

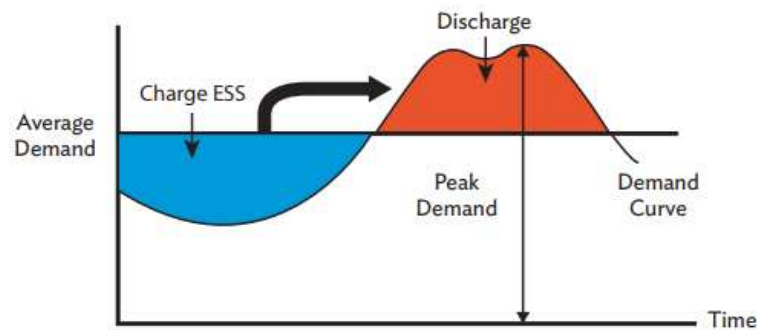
Peak shaving, também conhecido como corte de pico, ajuda a adiar investimentos na expansão ou reforço da rede, seja no sistema de transmissão ou distribuição. Além disso, ajuda também no alívio de congestionamento da rede. Esse congestionamento ocorre quando a energia não pode ser entregue a todas ou a algumas cargas devido à rede não estar adequada.

Figura 35 – Queda de frequência e restauração



Fonte: (BANK, 2018)

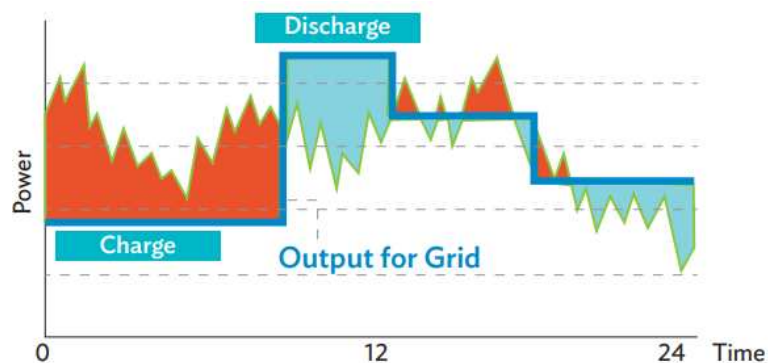
Figura 36 – Corte de pico



Fonte: (BANK, 2018)

Load Leveling, também conhecido como nivelamento de carga, refere-se ao processo de carga e descarga nas horas de ponta e horas fora de ponta. No nivelamento de carga, os consumidores são incentivados a mudar o consumo para horas do dia em que as tarifas são baixas, sem quaisquer alterações no perfil de carga do consumidor.

Figura 37 – Nivelamento de carga



Fonte: (BANK, 2018)

Para o **Suporte de tensão**, normalmente é necessário gerar energia reativa para compensar a reatância na rede. Essa geração pode ser substituída por armazenamento de energia,

sendo estrategicamente inserido dentro da rede em locais centrais ou por múltiplos sistemas de armazenamento próximos de grandes cargas, numa abordagem distribuída. Os sistemas de armazenamento utilizados para suporte de tensão devem conseguir operar com fator de potência não unitário, para fornecer e absorver energia reativa.

Reserva operacional está ligada a operação de uma rede elétrica, requerendo capacidade de reserva útil quando alguma parte dos recursos normais de fornecimento elétrico ficar indisponível.

Black start, trata-se de um auto reestabelecimento, quando no caso de uma falha na rede, o sistema de armazenamento atue restauração independente da rede externa.

Os serviços fornecidos pelo SAE, que podem ser ao nível dos sistemas de geração, transmissão e distribuição, bem como ao nível do consumidor estão apresentados na Tabela 10. Essa Tabela tem como objetivo apresentar onde os serviços estão inseridos como, por exemplo, o load leveling, um serviço de gerenciamento de energia. Já o suporte de tensão, este é um serviço considerado auxiliar que está inserido na área de Distribuição de energia.

Tabela 10 – Serviços e benefícios do SAE

Ancilares	Transmissão	Distribuição	Gerenciamento
Suporte de tensão	Alívio de congestionamento	Suporte de tensão	Load leveling
Regulação de frequência	Prorroga invest. transmissão	Prorroga invest. distribuição	Peak shaving
Reserva operacional	Controla amortec. de estabilidade	Confiabilidade	Energia reserva
Black Start	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1 Sistemas Mecânicos

Como referência de armazenamento por meio do hidrobombeamento, a Figura 38 apresenta a Hidrelétrica Reversível de Bath County Pumped Storage Station, localizada na Virgínia, Estados Unidos. Esse sistema de armazenamento de energia é o maior dos Estados Unidos, com uma capacidade de 24 Gigawatts-hora (GWh) e 3 GW de potência (ENGENHARIA, 2023). A energia é armazenada quando a água é bombeada para o reservatório superior durante os períodos de baixa demanda e liberada quando a demanda de energia aumenta.

A usina de Bath County foi concebida em 1960 para complementação de termelétricas a carvão e usinas nucleares, e para atendimento de uma demanda de ponta crescente na época. Formada por dois reservatórios com uma distância aproximada de 2,8 quilômetros, com

Figura 38 – Usina Hidrelétrica Reversível de Bath County



Fonte: (ENGENHARIA, 2023)

um desnível natural de 380 metros, criando condições muito favoráveis para a implantação da usina.

Segundo a *International Water Power & Dam Construction*, há quatro usinas hidrelétricas reversíveis construídas no Brasil, estando as características dessas usinas, com relação à potência e equipamentos, apresentadas na Tabela 11 (CANALES *et al.*, 2015).

Tabela 11 – Usinas hidrelétricas reversíveis construídas no Brasil

Nome	Inaugurada	Equipamento projetado	Potência Turbinas (MW)	Potência Bombas (MW)	Altura de Queda (m)
Edgar de Souza	1955	1 Francis	14,8	13,3	24
Pedreira	1939	6 Francis	78,5	42,6	25
Traição	1940	4 Kaplan	7,3	9,4	4
Vigário	1952	4 Francis	90,8	72	36

Fonte: (CANALES *et al.*, 2015)

O complexo Henry Borden, localizado no sopé da Serra do Mar, em Cubatão, é composto por duas usinas de alta queda (720 m), denominadas de Externa e Subterrânea, com 14 grupos de geradores acionados por turbinas Pelton, perfazendo uma capacidade instalada de 889 MW. Na década de 1930, para aumentar a capacidade de geração desta usina, foram realizadas obras: retificação e reversão do Rio Pinheiros, a construção das usinas elevatórias de Pedreira e de Traição e a formação do Reservatório Billings, com capacidade de 1200 hm³ e área inundada de 130 km².

A usina de Pedreira, considerada a primeira reversível do mundo, foi inaugurada em 1939, entrando em operação a unidade 4. Posteriormente foram instaladas as demais unidades, num total de oito, sendo sete reversíveis e uma que funciona como bomba. Todas as unidades

Figura 39 – Complexo Henry Burden



Fonte: (EMAE, 2023)

são dotadas com turbinas de rotor tipo Francis, movidas por motores síncronos.

Figura 40 – Usina elevatória de Pedreira



Fonte: (EMAE, 2023)

A usina elevatória de Traição, inaugurada em 1940, tem como objetivo reverter o curso das águas dos rios Tietê e Pinheiros, para serem encaminhadas à usina elevatória de Pedreira e depois ao Reservatório Billings. Do ponto de vista energético, a reversão do rio tem como propósito manter volumes d'água nos reservatórios do Rio das Pedras e Billings suficientes para garantir a geração na Usina Henry Borden.

Hoje, o bombeamento para operação do sistema de reversão só é acionado quando as vazões provocadas pelas chuvas elevam o nível das águas dos rios Pinheiros e Tietê, podendo

Figura 41 – Usina elevatória de Traição



Fonte: (EMAE, 2023)

provocar enchentes na região. Isso ocorreu devido o crescimento populacional da cidade de São Paulo e o aumento significativo do volume de esgoto doméstico a ser recolhido e tratado.

Este fato levou o esgoto sem tratamento diretamente aos cursos de água, originando a poluição do Rio Pinheiros, e por esta razão, as águas do Canal Pinheiros não podem mais ser bombeadas continuamente para o Reservatório Billings. Esta medida diminui a capacidade de geração da usina de Henry Bordem em aproximadamente 75% e, conseqüentemente, afetou a operação das usinas de Pedreira e Traição (RCIPEA, 2021).

Sabendo do imenso potencial hídrico que o Brasil possui, o Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) verificou o potencial hidrelétrico ainda disponível no país para implantação de UHRs, avaliando topografia, rede fluvial, dados de hidrologia, estimativa de custos de infraestrutura e otimização dos componentes. O estudo é intitulado como: A Viabilidade das Usinas Reversíveis no Sistema Interligado Nacional.

Conforme o modelo computacional utilizado para essa avaliação, existe um grande potencial para UHRs. A Figura 42 e 43 apresenta a UHR Assunção, que está localizada no município de Itapipoca, na latitude -3.5761 e na longitude -39.632, no estado do Ceará, a 120 km de Fortaleza, a 80 km de Sobral e da costa onde ocorre geração eólica onshore e possui grande potencial para geração eólica offshore.

Este projeto apresenta os objetivos centrais de gerar energia elétrica durante a ponta para Fortaleza e reduzir investimentos em transmissão da geração eólica realizada no CE para

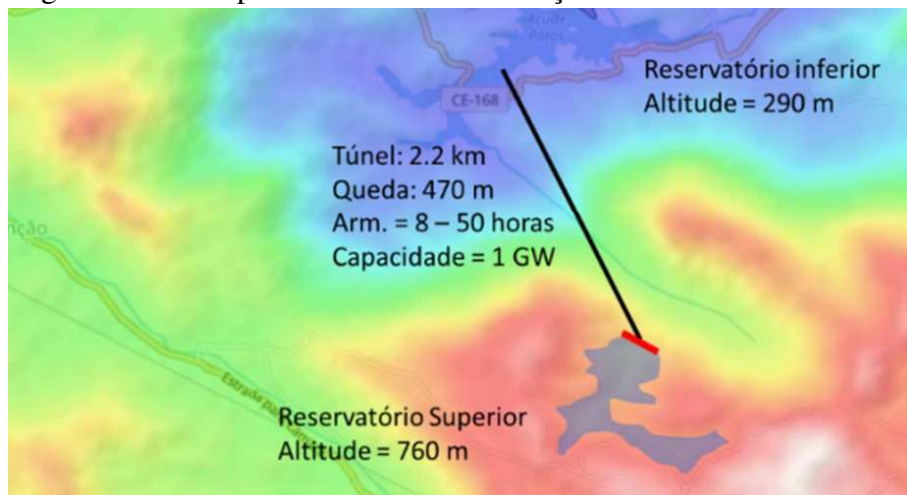
a Região Sudeste e para outras regiões do país. Sobre as características técnicas, a cota do reservatório superior da usina fica a 760 metros de altitude e a altitude da barragem inferior é 290 metros, resultando em uma queda de 470 metros. Os reservatórios têm uma capacidade de armazenamento energético de 7,5 GWh, uma capacidade instalada de 1 GW. O projeto da UHR de Assunção é um dos identificados pelos pesquisadores, não sendo o único. Outros projetos, informações mais detalhadas podem ser vistos no estudo, o qual tornou-se um livro, apontado na referência (BRANDAO *et al.*, 2021).

Figura 42 – Localização da UHR Assunção



Fonte: (BRANDAO *et al.*, 2021)

Figura 43 – Componentes da UHR Assunção



Fonte: (BRANDAO *et al.*, 2021)

As aplicações dos flywheels abrangem setores, desde transportes até sistemas de energia renovável e infraestrutura. Na inserção nas redes dos sistemas das fontes renováveis de energia, o flywheel pode ser aplicado para regulação de frequência. A Beacon Power LLC foi pioneira no uso de volantes para esse fim com usinas de 20MW localizadas em Stephentown, Nova York e Hazel Township, Pensilvânia. A usina de Stephentown fornece aproximadamente

10% das necessidades gerais de regulação de frequência de Nova York. A Figura 44 apresenta a planta da usina.

Figura 44 – Planta de 20MW para regulação de frequência da Beacon Power



Fonte: (POWER, 2020)

Por último, temos exemplos de CAES em operação, a usina de Huntorf, Alemanha e a usina de McIntosh, Alabama.

A usina de Huntorf teve a sua obra concluída em 1978, sendo considerada a primeira instalação CAES do mundo. Essa possui uma potência nominal de 290MW, sendo adaptada em 2007 para alcançar 320 MW. Seu reservatório é composto por duas cavernas que somam 310.000 m³ e proporciona uma capacidade de fornecimento em potência máxima por um período de duas horas.

Inicialmente a CAES foi projetada para fornecer serviços de *blackstart* e *peak shaving*, servindo de apoio a unidades de geração de energia termelétricas nucleares e a carvão. Atualmente ela serve como reserva para as unidades industriais circundantes. A Figura 45 apresenta uma vista aérea da central de Huntorf.

A usina McIntosh é considerada a primeira planta CAES americana, de 110 MW foi construída pela *Alabama Electric Cooperative*, no sudoeste do Alabama e está em operação desde 1991. Foi projetada para fornecer tal potência por um período de 26 horas, utilizando como reservatório uma única caverna de sal de 538 mil metros cúbicos, projetada para operar entre 45 e 74 bar.

A planta de McIntosh foi desenvolvida para fornecer eletricidade nos períodos de alta demanda (horário de ponta), com a eletricidade armazenada gerada durante períodos de menor demanda (horário fora de ponta) e, portanto, custos mais baixos. A usina foi construída acima de uma caverna de sal localizada a 1.500 pés de profundidade. A usina usa o ar comprimido combinado com gás natural para gerar e fornecer energia (EMC, 2023).

Figura 45 – Vista aérea da planta CAES de Huntorf



Fonte: (SăVESCU *et al.*, 2019)

Figura 46 – Vista da planta CAES de McIntosh



Fonte: (EMC, 2023)

4.2 Sistemas Térmicos

No que tange a aplicações práticas, alguns países do mundo já exploram as usinas heliotérmicas associadas ao armazenamento. Como exemplo, a Alemanha em 2010 saiu de 11,7 TWh para 19 TWh, já a Itália subiu de 1,9 TWh para 9,4 TWh. Japão, Espanha, China e outros países também exploram essa maneira de aproveitar o recurso solar para geração e armazenamento de energia (SOLARPACES, 2023).

A central solar térmica AndaSol I, apresentada na Figura 47, tem uma potência nominal de 50 MW e pode ser operada com energia do seu armazenamento térmico durante

7,5 horas. A usina produz aproximadamente 179 GWh por ano e fornece eletricidade para até 200.000 pessoas. O campo coletor da usina cobre uma superfície de 1.500 por 1.300 metros. Os coletores consistem em uma estrutura de aço com espelhos de vidro curvos anexados.

Figura 47 – Usina heliotermica AndaSol I



Fonte: (ZOU *et al.*, 2019)

A Companhia Energética de São Paulo (CESP) colocou em operação uma planta piloto de geração termosolar (ENERGIA, 2023). A usina tem 0,5 MW de capacidade, sendo a primeira do Brasil a usar a fonte. O sistema usa calhas parabólicas formadas por painéis compostos por espelhos côncavos que seguem a posição do sol. A usina da CESP começou a ser desenvolvida em 2017 e recebeu investimentos de R\$ 57 milhões, no âmbito de um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica.

4.3 Sistemas Elétricos

Como meio de preencher a lacuna entre capacitores e baterias, os supercapacitores podem ser usados em uma grande variedade de aplicações. Eles podem ser encontrados principalmente em aplicações que exigem altos ciclos de carga e descarga em curto prazo, mais especificamente de segundos a minutos. Os supercapacitores são amplamente utilizados em veículos elétricos e trens elétricos (*power trains*) para a recuperação de energia através da frenagem regenerativa, uma vez que existe a possibilidade de carregamento ultrarrápido.

Como exemplo prático, a empresa responsável pela Long Island Rail Road (LIRR), situada em Nova York, está testando o uso do supercapacitor como sistema de energia para

Figura 48 – Usina heliotermica da CESP



Fonte: (ENERGIA, 2023)

os volantes de seus trens. Essa ideia surgiu, na tentativa de evitar quedas de tensão durante a aceleração de um trem e reduzir o pico de uso de energia, por isso um banco de supercapacitor de 2 MW está sendo testado contra volantes que fornecem 2,5 MW de potência. Ambos os sistemas devem fornecer energia contínua por 30 segundos em sua respectiva capacidade de megawatt e recarregar totalmente ao mesmo tempo. O objetivo é alcançar uma variação na tensão nominal de no máximo 10%, ter baixa manutenção e um ciclo de vida de aproximadamente 20 anos (REZENDE *et al.*, 2022).

Outro exemplo prático parte do fabricante Skeleton. Este possui dois produtos para armazenamento de energia a base de supercapacitores, sendo o primeiro SkelGrid, um sistema de armazenamento de energia que pode ser usado para energia de backup de curto prazo ou para aumentar a qualidade da energia para aplicações industriais ou infraestrutura. Em seguida temos o ElevatorKERS, um sistema que reduz a energia do elevador em até 70% com o movimento de subida e descida (SKELETON,).

Partindo para o uso dos supercondutores, em (ADETOKUN *et al.*, 2022) é citado que os supercondutores de baixa temperatura (*Low Temperature Superconductor-LTS*) já foram implantados em uma escala de 10 MW. O Japão já possui mais de três sistemas LTS desde 2011 para fornecer compensação instantânea de queda de tensão de cargas industriais críticas.

Algumas aplicações usam a tecnologia dos supercondutores de baixa temperatura como, por exemplo, na medicina são os aparelhos de ressonância magnética e na física os aceleradores de partículas e reatores de fusão (FERREIRA, 2015). No entanto, o custo conside-

ravelmente alto do sistema LTS e de criogenia a base de hélio líquido diminuiu a penetração no mercado, perdendo espaço para outros materiais não supercondutores.

No entanto, com o avanço para os supercondutores de temperatura elevada (*High Temperature Superconductor-HTS*) e a aplicação de criogenia que utiliza nitrogênio líquido, um recurso mais acessível e disponível em abundância, os materiais supercondutores estão adentrando o mercado de maneira competitiva, ampliando consideravelmente suas aplicações. Agora, eles desempenham papel significativo não somente em sistemas elétricos e de transporte, mas também em setores industriais e de telecomunicações. Além disso, estão abrindo novas perspectivas no âmbito médico e em pesquisas científicas (FERREIRA, 2015).

Um exemplo de aplicação de SMES foi realizado no estado norte-americano de Wisconsin, aonde unidades foram instaladas para melhorar a estabilidade de um sistema de transmissão, sujeito a variações de tensão produzida pela operação de uma unidade de fabricação de papel. A combinação das unidades resulta em uma capacidade de aproximadamente 20 MWh, capaz de suprir 40 MW por trinta minutos ou 20 MW por duas horas (JUNIOR, 2012). Além disso, o uso de SMES combinado a outros sistemas de armazenamento em grande escala está ampliando o leque de aplicações dessas tecnologias.

4.4 Sistemas Químicos

Iniciando por BESS, o sistema da Sembcorp é o maior SAE do Sudeste Asiático na região de Banyan e Sakra. A instalação, que iniciou suas operações em dezembro de 2022, tem uma capacidade máxima de armazenamento de 285 megawatts-hora (MWh) e pode atender cerca de 24.000 domicílios de quatro cômodos por um dia, em uma única descarga (SEMBCORP, 2023).

Seu tempo de resposta para armazenar e fornecer energia em milissegundos mitiga a intermitência solar causada pela mudança das condições climáticas no clima tropical de Cingapura. Também pode fornecer reservas para a rede elétrica, liberando usinas de geração de energia para gerar mais eletricidade para atender à demanda, quando necessário (SEMBCORP, 2023). A Figura 49 apresenta uma vista do empreendimento da Sembcorp em Singapura.

No Brasil, tem avançado o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia por baterias, incentivando também a pesquisa e desenvolvimento (P&D). Como exemplo, pode-se citar o projeto do grupo Moura em parceria com o ITEM (Instituto de Tecnologia Edson Mororó Moura). Este explora o potencial de integração da energia fotovoltaica, geração a

Figura 49 – BESS 285 MWh Semdcorp em Singapura



Fonte: (SEMBCORP, 2023)

diesel e armazenamento de energia, atendendo as áreas isoladas com maior eficiência. O projeto consiste em um sistema fotovoltaico de 310 kWp em capacidade instalada, com um BESS de 250 kW / 560 kWh e um grupo gerador de 75 kVA (SOLAR, 2023a).

Outro exemplo, foi a inauguração do primeiro BESS em larga escala pela Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (ISA CTEEP), na subestação de Registro (SP). Esse projeto atuará em picos de consumo do Litoral Sul Paulista a fim de evitar interrupções e ampliar a integração de fontes renováveis. Os sistemas de baterias têm 30 MW de potência, capazes de entregar energia de 60 MWh por duas horas. É estimado que cerca de dois milhões de pessoas serão diretamente beneficiadas. Ao todo são 180 racks de baterias de lítio (SOLAR, 2023b).

Figura 50 – BESS ISA CTEEP



Fonte: (GONZALEZ, 2016)

Devido à crescente busca pela redução de gases poluentes e economia em relação a abastecimento, os veículos elétricos gradualmente vêm conquistando espaço, sendo o custo das baterias uma barreira. O Volvo EX30 é vendido no Brasil com duas variações de bateria. A versão E40, a mais barata, parte de R\$ 219.950 em pacote único. Sua bateria de lítio-ferro-fosfato (LFP) tem 51 kWh de capacidade e abastece um único motor elétrico traseiro que desenvolve 276 cv de potência. A autonomia declarada é de 350 km em ciclo WLTP, mas deve ser consideravelmente menor quando o EX30 for avaliado pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) (LIRA, 2023).

Figura 51 – Volvo EX30



Fonte: (LIRA, 2023)

Modelos intermediários e topo de linha serão vendidos no pacote E60. Neste caso, a bateria de níquel-cobalto-manganês (NMC) tem 69 kWh e proporciona autonomia de 480 km (em ciclo WLTP). Seu motor elétrico traseiro desenvolve os mesmos 276 cv da versão E40. A diferença fica por conta da aceleração de 0 a 100 km/h, que acontece em 5,7 segundos na versão E40 e 5,3 s na E60 (LIRA, 2023).

Os tanques de hidrogênio comprimido são capazes de armazenar energia durante longos períodos e, além disso, são mais simples de manejar que as baterias de íons de lítio porque são mais leves. A grande versatilidade do hidrogênio permite seu uso em nichos de consumo que são mais difíceis de descarbonizar como: transporte pesado, aviação ou transporte marítimo.

Há diferentes projetos neste sentido, como os Cryoplanes, promovidos pela União Europeia (UE), que planeja introduzi-los em aviões de passageiros. Uma das metas traçadas pela gigante francesa Airbus, está previsto que em 2035 seja possível realizar viagens em seus aviões comerciais movidos a hidrogênio. Os aviões de concept ZEROe, apresentados na Figura 52, tem

o potencial de reduzir significativamente o impacto ambiental por parte da aviação.

Figura 52 – Aviões da Airbus ZEROe



Fonte: (VINHOLES, 2023)

Abordando sobre sistema de geração, a empresa australiana Lavo é uma das pioneiras na utilização e sistema de geração e armazenamento de hidrogênio para uso residencial. A empresa anunciou a comercialização do *Lavo Green Energy Storage System*, um produto para residências que possuem sistemas fotovoltaicos instalados. A tecnologia armazena o excesso de energia utilizando hidrogênio, 324 kg e deve ficar do lado de fora da casa, sendo possível conectar o sistema fotovoltaico e a água da casa.

Figura 53 – Lavo Green Energy Storage System

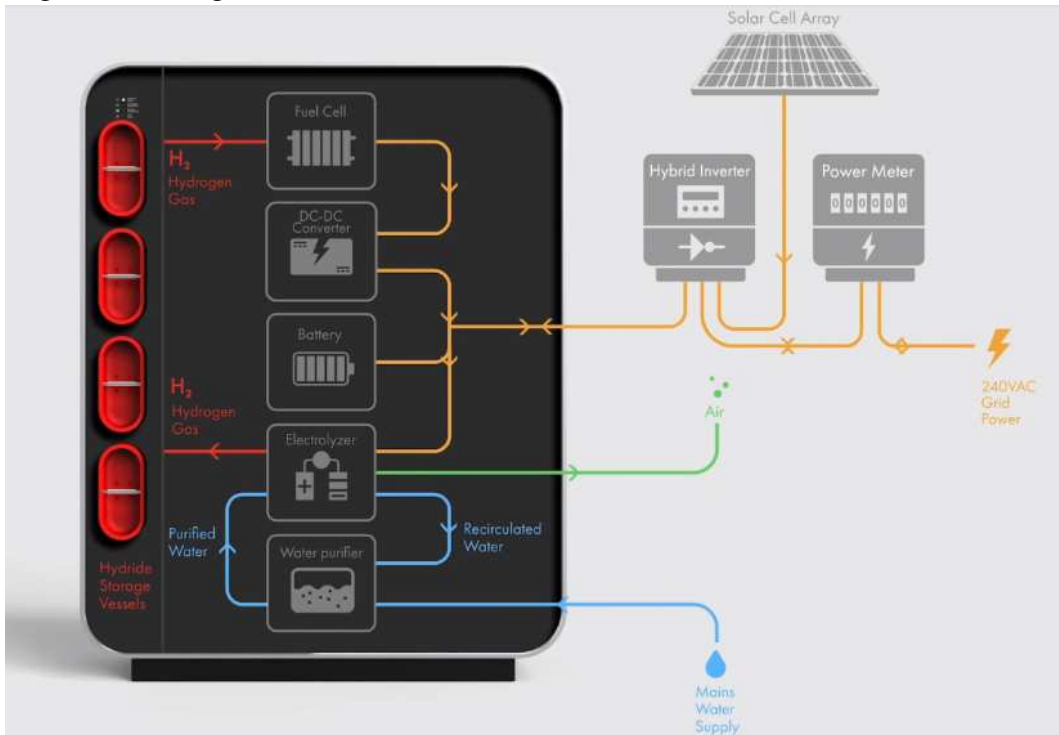


Fonte: (INDUSTRY, 2023)

O sistema usa o excesso de energia gerada para o processo de eletrólise da água, liberando oxigênio e armazenando o hidrogênio. Quando necessário, o hidrogênio é convertido

em eletricidade por meio de uma célula a combustível. Além disso, o sistema consegue armazenar cerca de 40 quilowatts-hora de energia, o suficiente para abastecer uma casa australiana média por 2 dias. A Figura 54 apresenta o diagrama do sistema funcional do sistema.

Figura 54 – Diagrama do sistema Lavo



Fonte: (INDUSTRY, 2023)

1. **Célula de combustível:** Usada para converter a energia armazenada no hidrogênio em energia elétrica.
2. **Conversor CC-CC:** Um sistema de conversão de energia é usado para regular a saída elétrica da célula de combustível.
3. **Bateria:** Uma bateria tradicional de íons de lítio para um tempo de resposta rápido. Um sistema híbrido de armazenamento de energia oferece benefícios de ambas as tecnologias de armazenamento.
4. **Inversor híbrido:** Gerencia o fluxo de energia elétrica entre o painel de células solares, o LAVO™ e a residência.
5. **Eletrolisador:** converte o excesso de energia elétrica do sistema solar através da eletrólise, onde a energia é armazenada como hidrogênio e o oxigênio é liberado na atmosfera.
6. **Purificador de água:** Trata a água para o eletrolisador funcionar a partir do abastecimento de água padrão.
7. **Lavo hidreto:** Liga metálica que armazena e regula o hidrogênio a uma pressão de 30 bar.

5 DESAFIOS E PERSPECTIVAS NO SETOR

O mercado para o armazenamento de energia deve ultrapassar os 100 milhões de dólares até 2024, proporcionando a redução de emissões seria da ordem de 1 milhão de toneladas de CO₂/ano para cada 1 GW de total de sistemas instalados, contribuindo para um futuro mais sustentável.

As fontes de energia solar e eólica com sistemas para armazenamento de energia podem fornecer energia quando não há sol ou vento. No entanto, a depender da tecnologia utilizada, o armazenamento só pode fornecer algumas horas de capacidade devido ao seu custo proibitivo. Portanto, os geradores a diesel ainda são muito utilizados.

O aumento das fontes renováveis tem gerado uma necessidade crescente de serviços auxiliares na rede elétrica e com isso o papel do armazenamento também está a crescer. Os sistemas de armazenamento de energia só produzirão benefícios práticos se houver uma regulamentação e integração eficiente desses aos sistemas de transmissão e distribuição.

Nos Estados Unidos, olhando para a compra e venda de energia, em 2018 a Comissão Federal Reguladora de Energia (FERC) ordenou que as Organizações Regionais de Transmissão (RTO) criassem regras que permitam os sistemas de armazenamento a comprar e vender energia em condições aproximadamente iguais.

O governo central da China lançou a sua primeira política nacional sobre armazenamento de energia em 2017. O documento estabelece metas de desenvolvimento para os próximos 10 anos e identifica o armazenamento de energia como fundamental para modernizar a rede elétrica da China e garantir a confiabilidade e segurança da rede.

Narendra Modi, primeiro-ministro da Índia em 2014, anunciou uma meta nacional para instalar 100 GW de capacidade solar fotovoltaica até 2022, o que tornaria o país um dos maiores mercados de energia solar do mundo. A Greenko Energies recebeu aprovação estatal para um projeto de armazenamento solar e eólico de 2,75 GW em Andhra Pradesh. Apesar deste progresso, muitos projetos de energias renováveis e de armazenamento foram adiados ou cancelados devido à falta de financiamento e infraestrutura de rede subdesenvolvidas.

Ao contrário dos Estados Unidos e da China, não existem políticas que regulam o armazenamento de energia na Índia. Em Janeiro de 2017, o principal órgão regulador federal da Índia, a Comissão Reguladora Central de Eletricidade, emitiu um documento de consulta que estabelece um quadro para a introdução de sistemas de armazenamento de energia em baterias. Esse documento discute modelos tarifários, a viabilidade comercial do armazenamento

e mudanças políticas, entre outros assuntos.

No entanto, a falta de diretivas continuará a tornar a instalação de projetos de armazenamento um desafio a medida que os investidores regras para uma concorrência justa e aberta podem proporcionar. Para invocar a confiança dos investidores nas tecnologias renováveis e reforçar a estabilidade da rede, é interessante que os projetos estejam associados a sistemas para armazenamento.

No cenário brasileiro, a demanda pelas tecnologias deve aumentar nos próximos anos, acompanhando a tendência mundial. Contudo, há ainda barreiras regulatórias, tributárias e a ausência de monetização adequada dos benefícios e serviços. Em 17 de junho de 2023 a ANEEL promoveu um webinar para discutir os desafios regulatórios da implementação de tecnologias de armazenamento de energia no Brasil, e constatou a demanda por regulamentação específica para armazenamento de energia pela rede elétrica.

Nesse contexto, o tema passou a ter prioridade na agenda regulatória deve ser aberta uma consulta pública para AIR (Análise de Impacto Regulatório) bem como uma consulta pública ligada a resolução normativa. A regulamentação para o uso de armazenamento de energia em baterias está prevista para o primeiro semestre de 2024.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho trouxe a importância do armazenamento de energia para a transição de uma economia mais sustentável e de baixo carbono, destacando a necessidade de encontrar maneiras eficientes de armazenar e utilizar a energia produzida por fontes renováveis, bem como os principais desafios e perspectivas futuras para o setor de energia. Além disso, apresenta as principais tecnologias de armazenamento de energia disponíveis atualmente, suas vantagens e desvantagens, e exemplos de aplicações em diferentes contextos.

As tecnologias de armazenamento de energia são importantes para permitir a integração de fontes renováveis de energia intermitentes e não despacháveis, bem como para melhorar a estabilidade, flexibilidade e confiabilidade da rede elétrica. Estas podem ser usadas em uma variedade de aplicações, incluindo distribuição, transmissão, serviços ancilares, gerenciamento, armazenamento residencial, veículos elétricos e aplicações industriais. A escolha da tecnologia de armazenamento de energia mais adequada depende dos parâmetros específicos do sistema e do uso desejado.

A tecnologia de armazenamento de energia em grande escala mais madura e difundida no mundo é a PHS, que utiliza reservatórios de água em diferentes altitudes e interligados por bombas e turbinas reversíveis. Embora existam outras tecnologias em desenvolvimento, a PHS é considerada a mais adequada para aplicações em larga escala, devido à sua alta capacidade de armazenamento e flexibilidade operacional. No entanto, é importante ressaltar que cada tecnologia tem suas vantagens e desvantagens, e a escolha da melhor opção depende das características específicas de cada projeto.

Concluimos que a tecnologia de hidrogênio verde tem um grande potencial para se tornar uma fonte de energia importante para a transição energética global. Embora ainda haja desafios a serem superados, como a redução dos custos de produção e a criação de infraestrutura para armazenamento e distribuição, o hidrogênio verde já está sendo utilizado em diversos setores, como transporte e indústria, o que indica um forte interesse e investimento nessa tecnologia.

Apesar dos avanços e benefícios proporcionados pelas tecnologias de armazenamento de energia, ainda existem desafios a serem superados. O custo dessas tecnologias ainda é um fator limitante para sua adoção, e a infraestrutura de rede precisa ser aprimorada para suportar a integração eficiente desses sistemas. Além disso, é necessário um marco regulatório adequado para incentivar o desenvolvimento e a implementação dessas tecnologias.

REFERÊNCIAS

- ABRAGEL. **Aneel aprova 23 propostas no P&D sobre armazenamento de energia**. 2017. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: <https://www.abragel.org.br/aneel-aprova-23-propostas-no-pd-sobre-armazenamento-de-energia>.
- ADETOKUN, B. B.; OGHORADA, O.; ABUBAKAR, S. J. Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications. **Journal of Energy Storage**, v. 55, p. 105663, 2022. ISSN 2352-152X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22016516>.
- AGENCY, I. E. **Energy Storage**. 2023. Acesso em 02 Abr. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/energy-storage>.
- AGENCY, I. E. **Grid-Scale Storage**. 2023. Acesso em: 02 de Abr. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/grid-scale-storage>.
- AL Shaqsi, A. Z.; SOPIAN, K.; AL-HINAI, A. Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. **Energy Reports**, v. 6, p. 288–306, 2020. ISSN 2352-4847. SI:Energy Storage - driving towards a clean energy future. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484720312464>.
- ANEEL. **Consolidação das contribuições recebidas no âmbito da Tomada de Subsídios nº011/2020**. 2020. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: <https://aneel.gov.br>.
- ANEEL. **Projetos de Chamada Estratégica**. 2022. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/pesquisa-e-desenvolvimento/projetos-de-chamada-estrategica>.
- ANEEL. **Matriz elétrica brasileira apresenta expansão de 2.746 MW no primeiro trimestre de 2023**. 2023. Acesso em 10 jun 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/matriz-eletrica-brasileira-apresenta-expansao-de-2-746-mw-no-primeiro-trimestre-de-2023>.
- ANEEL. **Tomada de Subsídios 011/2020**. 2023. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: <https://aneel.gov.br>.
- ARSOLAR. **Demanda de energia elétrica no Brasil – Período 2019-2050**. Acesso em: 06 de Jan. 2023. Disponível em: <https://www.arsolar.com.br/demanda-de-energia-eletrica-no-brasil-periodo-2019-2050>.
- BANK, A. D. **Handbook on Battery Energy Storage System**. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.22617/TCS189791-2>.
- BARNES, F.; LEVINE, J. **Large energy storage systems handbook**. [S. l.: s. n.], 2011. 1-237 p.
- BAZDAR, E.; SAMETI, M.; NASIRI, F.; HAGHIGHAT, F. Compressed air energy storage in integrated energy systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, p. 112701, 2022. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122005901>.

BEARD, K. **Linden's Handbook of Batteries, Fifth Edition**. McGraw-Hill Education, 2019. ISBN 9781260115925. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=WKeVtAEACAAJ>.

BEARDSALL, J. C.; GOULD, C. A.; AL-TAI, M. Energy storage systems: A review of the technology and its application in power systems. In: **2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**. [S. l.: s. n.], 2015. p. 1–6.

BEARDSALL, J. C.; GOULD, C. A.; AL-TAI, M. Energy storage systems: A review of the technology and its application in power systems. In: **2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**. [S. l.: s. n.], 2015. p. 1–6.

BRANDAO, R.; CASTRO, N. de; HUNT, J. A viabilidade das usinas reversíveis no sistema interligado nacional (2021). In: . [S. l.: s. n.], 2021.

BRASIL, B. N. **Hidrogênio verde: os 6 países que lideram a produção do 'combustível do futuro**. 2023. Acesso em: 22 de Mai. 2023. Disponível em: <https://www.bbc.com/portuguese/geral-56604972>.

CANALENERGIA. **Armazenamento de energia elétrica no Brasil deverá aumentar nos próximos anos**. 2022. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53232275/armazenamento-de-energia-eletrica-no-brasil-devera-aumentar-nos-proximos-anos>.

CANALES, F. A.; BELUCO, A.; MENDES, C. A. B. Usinas hidrelétricas reversíveis no Brasil e no mundo: aplicação e perspectivas. **REGET/UFMS: Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, p. 1230–1249, 2015. ISSN 22361170. Disponível em: <https://www.projetouhr.com.br/asel/16002-87523-1-PB.pdf>.

CARNEIRO, R. L.; MOLINA, J. H. A.; ANTONIASSI, B.; MAGDALENA, A. G.; PINTO, E. M. Aspectos essenciais das baterias chumbo-acido e princípios físico-químicos e termodinâmicos do seu funcionamento. **Revista Virtual de Química**, 2017.

DOE. **Department of Energy**. 2023. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: <https://www.sandia.gov/ess>.

DOE. **DOE Global Energy Storage Database**. 2023. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: <https://sandia.gov/ess-ssl/gesdb/public>.

ECONÔMICO, M. **Os leilões para contratação de energia vão incluir armazenamento em baterias**. 2022. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: <https://movimentoeconomico.com.br/geral/redacao/2022/09/20/os-leiloes-para-contratacao-de-energia-vaoincluir-armazenamento-em-baterias>.

EMAE. **Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A.** 2023. Acesso em: 07 de Nov. 2023. Disponível em: <http://emae.com.br/>.

EMC, B. **Compressed air energy storage technology: Generating electricity out of thin air**. 2023. Acesso em: 23 de Jul. 2023. Disponível em: <https://www.baldwinemc.com/compressed-air-energy-storage-technology-generating-electricity-out-of-thin-air>.

ENERGIA, C. **Termossolar entra em operação em São Paulo**. 2023. Acesso em: 14 de Ago. 2023. Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53206464/termossolar-entra-em-operacao-em-sao-paulo3>.

ENGENHARIA, B. da. **O que são usinas hidrelétricas reversíveis: Como funcionam e para que servem?** 2023. Acesso em: 09 de Abr. 2023. Disponível em: <https://engenharia360.com/o-que-sao-usinas-hidreletricas-reversiveis/>.

EPBR. **Hidrogênio verde: conheça 10 projetos promissores em desenvolvimento no Brasil.** 2023. Acesso em: 22 de Mai. 2023. Disponível em: <https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-conheca-10-projetos-promissores-em-desenvolvimento-no-brasil>.

EPE. **Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2030: Micro e Minigeração Distribuída Baterias, 2020.** 2023. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/topico-522/Caderno\%20MMGD\%20Baterias\%20-\%20PDE\%202030\%20Rev.pdf>.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2030.** 2023. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE\%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf.

FERREIRA, A. Z. Estudo de utilizaÇÃo de supercondutores para a transmissÃo de energia elÉtrica. 2015.

FERREIRA, H. R. Tecnologias de armazenamento térmico para usinas heliotérmicas. **Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020.** Conversão Térmica com Concentradores - Equipamentos e sistemas de conversão heliotérmica para eletricidade. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/806>.

GESEP. **Gerência de especialistas em sistemas elétricos de potência.** 2021. Acesso em: 05 de Nov. 2023. Disponível em: https://www.gesep.ufv.br/?page_id=1506.

GLOBALDATA. **Global Top 10 Upcoming Energy Storage Projects Market by 2030.** 2023. Acesso em: 08 de Abr. 2023. Disponível em: <https://www.globaldata.com/data-insights/oil-and-gas/global-top-10-upcoming-energy-storage-projects-market-by-2030>.

GONZALEZ, F. D. **Energy Storage in Power System.** [S. l.]: Wiley, 2016. v. 1.

H2BRASIL. **Desafios do Hidrogênio Verde.** 2023. Acesso em: 22 de Mai. 2023. Disponível em: <https://www.h2verdebrasil.com.br/desafios-do-hidrogenio-verde>.

IBERDROLA. **O hidrogênio verde: uma alternativa para reduzir as emissões e cuidar do nosso planeta.** 2023. Acesso em: 22 de Mai. 2023. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/hidrogenio-verde>.

INDUSTRY, D. . **POWER YOUR LIFE WITH LAVO.** 2023. Acesso em: 07 de Nov. 2023. Disponível em: <https://www.design-industry.com.au/lavo>.

INFOMONEY. **O que é hidrogênio verde e como o Brasil pode se tornar uma potência nesse setor.** 2023. Acesso em: 22 de Mai. 2023. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/negocios/o-que-e-hidrogenio-verde-e-como-o-brasil-pode-se-tornar-uma-potencia-nesse-setor>.

IRENA. **Armazenamento de bateria abre caminho para um futuro com energia renovável.** 2023. Acesso em: 01 de Mai. 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/news/articles/2020/Mar/Battery-storage-paves-way-for-a-renewable-powered-future>.

JOUHARA, H.; GÓRA, A. Żabnieńska; KHORDEHGAH, N.; AHMAD, D.; LIPINSKI, T. Latent thermal energy storage technologies and applications: A review. **International Journal of Thermofluids**, v. 5-6, p. 100039, 2020. ISSN 2666-2027. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202720300264>.

JUNIOR, E. A. de A. Impacto econômico das aplicações de supercondutividade de alta temperatura no sistema elétrico brasileiro. **Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2012.

LIRA, C. **Volvo EX30 é SUV elétrico de luxo com preço de Volkswagen e Jeep; leia o teste**. 2023. Acesso em: 07 de Nov. 2023. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/testes/review/2023/11/volvo-ex30-e-suv-eletrico-de-luxo-com-preco-de-volkswagen-e-jeep-leia-o-teste.ghtml>.

MITCHELL, P. J.; WATERS, J. E.; ESPOSITO, D.; MICHAEL, D. **Energy Storage Roadmap Report**. [S. l.]: Energy Systems Network, 2017. Disponível em: <https://energysystemsnetwork.com/projects/energy-storage-roadmap-report/>.

MOURA. **Entenda o que é bateria AGM e descubra se você precisa de uma**. Acesso em: 05 de Nov. 2023. Disponível em: <https://www.moura.com.br/blog/bateria-agm>.

OLABI, A.; ONUMAEGBU, C.; WILBERFORCE, T.; RAMADAN, M.; ABDELKAREEM, M. A.; Al – Alami, A. H. Critical review of energy storage systems. **Energy**, v. 214, p. 118987, 2021. ISSN 0360-5442. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220320946>.

POWER, B. **Hazle Township, Pennsylvania**. 2020. Acesso em: 07 de Nov. 2023. Disponível em: <https://beaconpower.com/hazle-township-pennsylvania/>.

RAHMAN, M. M.; ONI, A. O.; GEMECHU, E.; KUMAR, A. Assessment of energy storage technologies: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 223, p. 113295, 2020. ISSN 0196-8904. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420308347>.

RCIPEA. **Novas tecnologias e infraestrutura do setor elétrico brasileiro – armazenamento de energia em baterias**. 2021. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11111>.

RESEARCH, P. **Thermal Energy Storage Market**. 2023. Acesso em: 30 de Jan. 2023. Disponível em: <https://www.precedenceresearch.com/thermal-energy-storage-market>.

REZENDE, I. H. W. S.; BORGES, L. E. P.; PEREIRA, R. P. Supercapacitors: Review. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 15, p. e226111537069, Nov. 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/37069>.

RUFER, A. **Energy Storage: Systems and Components**. 1. ed. [S. l.]: CRC, 2017.

SEMBCORP. **Southeast Asia’s Largest Energy Storage System Officially Opens**. 2023. Acesso em: 08 de Abr. 2023. Disponível em: <https://www.sembcorp.com/en/media/media-releases/energy/2023/february/southeast-asia-s-largest-energy-storage-system-officially-opens/>.

SILVA, B. F. G. da. Estudo de soluções alternativas de armazenamento de energia para diferentes horizontes temporais. 2008. 2008. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/58466>.

SKELETON. **Energy storage solutions for a net-zero future**. Acesso em: 26 de Mai. 2023. Disponível em: <https://www.skeletontech.com/en/solutions>.

SOLAR, C. **Armazenamento de energia: tecnologias de baterias elétricas**. Acesso em: 05 de Nov. 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/armazenamento-de-energia-tecnologias-de-baterias-eletricas>.

SOLAR, C. **1ª microrrede integrando energia FV, diesel e baterias é colocada em funcionamento no PE**. 2023. Acesso em: 21 de Mai. 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/1a-microrrede-integrando-energia-fv-diesel-e-baterias-e-colocada-em-funcionamento-no-pe>.

SOLAR, C. **Primeiro sistema de baterias em larga escala do Brasil entra em operação**. 2023. Acesso em: 21 de Mai. 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/primeiro-sistema-de-baterias-em-larga-escala-do-brasil-entra-em-operacao>.

SOLAR, C. **Solar ultrapassa eólica e se torna 2ª maior fonte da matriz elétrica brasileira**. 2023. Acesso em: 16 de Jan. 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/solar-ultrapassa-eolica-e-se-torna-2a-maior-fonte-da-matriz-eletrica-brasileira/>.

SOLARPACES. **CSP Projects Around the World**. 2023. Acesso em: 14 de Ago. 2023. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-heliotermica-entenda-como-funciona>.

STAN, A.-I.; ŚWIERCZYŃSKI, M.; STROE, D.-I.; TEODORESCU, R.; ANDREASEN, S. J. Lithium ion battery chemistries from renewable energy storage to automotive and back-up power applications — an overview. In: **2014 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)**. [S. l.: s. n.], 2014. p. 713–720. ISSN 1842-0133.

SĂVESCU, C.; VLADUCA, I.; IONESCU, D.; PETRESCU, V.; NICULESCU, F.; NECHIFOR, C.; VATASELU, G.; HANEK, M. Compressed air energy storage installation for renewable energy generation. v. 112, p. 02010, 08 2019.

VIEW, P. **Bateria Estacionária, VRLA e AGM: Conheça os principais tipos de baterias de energia**. Acesso em: 05 de Nov. 2023. Disponível em: <https://powerviewsistemas.com.br/eficiencia-energetica/bateria-estacionaria-vrla-e-agm-conheca-os-principais-tipos-de-baterias-de-energia>.

VINHOLES, T. **Empresas britânicas formam aliança para impulsionar a aviação movida a hidrogênio**. 2023. Acesso em: 07 de Nov. 2023. Disponível em: <https://www.airway.com.br/empresas-britanicas-formam-alianca-para-impulsionar-a-aviacao-movida-a-hidrogenio/>.

WAN, L.; ZHANG, W.; XU, Z. Overview of key technologies and applications of hydrogen energy storage in integrated energy systems. In: **2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)**. [S. l.: s. n.], 2020. p. 1–5.

YANG, B.; PAN, J.; ZHU, Y.; HUANG, X.; WANG, C.; GUO, C.; GUO, Y. A review of energy storage system study. In: **2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)**. [S. l.: s. n.], 2020. p. 2858–2863.

ZHANG, Z.; DING, T.; ZHOU, Q.; SUN, Y.; QU, M.; ZENG, Z.; JU, Y.; LI, L.; WANG, K.; CHI, F. A review of technologies and applications on versatile energy storage systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 148, p. 111263, 2021. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121005505>.

ZOBAA, A. F. **Energy Storage**. Rijeka: IntechOpen, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/2550>.

ZOU, Q.; LI, Z.; WU, H.; ZOU, F.; WU, B. Wind-induced response and pedestal internal force analysis of a trough solar collector. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 193, p. 103950, 2019. ISSN 0167-6105. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610519305380>.