

Projeto de Graduação



13 de dezembro de 2023

Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias: Levantamento de Estado da Arte Tecnológico, Aplicações e Desafios.

Victor Soares Rossi



www.ele.puc-rio.br

Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias: Levantamento de Estado da Arte Tecnológico, Aplicações e Desafios.

Aluno: Victor Soares Rossi

Orientador: André Milhorange de Castro

Agradecimentos

Gostaria de expressar meus mais sinceros agradecimentos àqueles que estiveram ao meu lado durante esta jornada acadêmica. Aos meus pais, pelo amor incondicional e apoio incansável, a minha irmã, pelos momentos de incentivo e companheirismo. Aos amigos pelos momentos de estudo, em engenharia e truco. Ao Diretório Acadêmico Adhemar Fonseca, por me permitir conhecer pessoas incríveis e ter experiências inesquecíveis nesse longo período da minha vida. Aos professores, por compartilharem seus conhecimentos e orientações essenciais para meu crescimento acadêmico e pessoal. E aos colegas de curso, pela parceria e troca constante de aprendizados. Sou imensamente grato pelo apoio e carinho de cada um de vocês.

Resumo

O presente trabalho aborda de maneira abrangente as aplicações de sistemas de armazenamento de energia por baterias, explorando as tecnologias disponíveis no mercado e as pesquisas mais recentes. A análise inclui uma visão detalhada das tecnologias de baterias, suas características e potencialidades em diversas aplicações. Examina-se também o cenário atual de produtos disponíveis no mercado, fornecedores líderes e os custos associados a essas soluções.

Palavras-chave: Fontes renováveis variáveis, geração distribuída, reserva de energia, sistemas de armazenamento de energia por baterias.

Battery Energy Storage Systems: Survey of Technological State of the Art, Applications and Challenges

Abstract

The present work comprehensively addresses the applications of battery energy storage systems, exploring the technologies available in the market and the latest research. The analysis includes a detailed overview of battery technologies, their characteristics, and potentialities in various applications. It also examines the current landscape of available products in the market, leading suppliers, and the costs associated with these solutions.

Keywords: Battery energy storage systems, distributed generation, energy reserve, variable renewable sources.

Sumário

1	Introdução	1
a	Considerações Gerais	1
b	Desenvolvimento Histórico	1
c	Estrutura do Texto	1
2	Tecnologias	2
a	Chumbo Ácido	2
b	Níquel Cádmio (NiCd)	3
c	Níquel-Metal-Hidreto(NiMH)	3
d	Íon-Lítio (Li-ion)	4
e	Novas Tecnologias	4
1	Ultra Bateria	4
2	Materiais Energéticos Nanoestruturados em Baterias de Lítio	5
3	Baterias de Base Metal-Ar	5
3	Principais Fornecedores e Produtos	6
a	Tesla	6
b	Moura	7
c	LG	8
d	Ecube	9
e	NGK Insulators	11
f	Outros Fornecedores	12
4	Aplicações	13
a	Aplicações Energéticas	13
1	Arbitragem Tarifária	14
2	Nivelamento de Demanda	14
b	Aplicações de Serviços Ancilares	14
1	Acompanhamento de Carga	14
2	Reserva Rotativa	14
3	Suporte de Tensão	15
4	Partida a Frio	15
5	Regulação de Frequência	15
c	Aplicações em Gestão de Energia para Clientes	15
1	Qualidade de Energia	15
2	Confiabilidade Energética	16
d	Aplicações de Integração de Energias Renováveis	16
5	Conclusões	17

Lista de Figuras

1	Comparativo do desenvolvimento tecnologico de baterias e microprocessadores	2
2	Estrutura da tecnologia da ultra bateria	4
3	Bateria para aplicação de consumidor final.	6
4	Sistema de baterias escalonavel para aplicações em larga escala	7
5	Solução com baterias de Chumbo-Carbono	8
6	Solução com baterias de Lítio-Ferro-Fosfato	8
7	Instalações de referência dos produtos LG	9
8	Alguns dos modelos de baterias disponíveis	10
9	Sistema de baterias de Sódio-Enxofre	11
10	Marcas com disponibilidade de produtos sob medida.	12
11	Diferentes tipos de sistemas de armazenamento estacionário de bateria (cor preta) agrupados de acordo com sua integração aos níveis de rede de Baixa Tensão (BT) e Média Tensão (MT). Aplicações típicas estão listadas em azul, e letras entre parênteses estão vinculadas às famílias de aplicativos conforme definido na legenda da figura. As conexões e transformadores de Alta Tensão (AT) sobrepostos são representados esquematicamente.	13
12	Perfil de carga de um sistema de armazenamento de energia de larga escala utilizado para nivelamento de carga.	14
13	Áreas de operação dos diferentes níveis de regulação de frequência	15

Lista de Tabelas

1	Parâmetros das baterias de base Metal-Ar	5
2	Ficha técnica do modelo Powerwall [Cotação atual do dolar a R\$4,93]	6
3	Ficha técnica do modelo Megapack [Cotação atual do dolar a R\$4,93]	7
4	Ficha técnica dos modelos de baterias disponíveis no catalogo Moura	8
5	Ficha técnica dos modelos de baterias disponíveis no catalogo LG	9
6	Ficha técnica dos modelos de baterias disponíveis no catalogo Ecube	10
7	Ficha técnica dos modelos de baterias disponíveis no catalogo NGK	11

1 Introdução

a Considerações Gerais

Nos últimos anos, testemunhou-se uma transformação significativa no setor de energia elétrica em todo o mundo, impulsionada pela crescente conscientização ambiental, pelo aumento na integração de fontes de energia renovável intermitentes e pela necessidade de uma rede elétrica mais resiliente e flexível. Nesse contexto, os sistemas de armazenamento de energia elétrica por baterias emergem como uma tecnologia-chave na modernização dos sistemas de energia.

A eletrificação de diversos setores, como transportes e indústria, juntamente com a crescente participação de fontes intermitentes, como solar e eólica, na matriz energética global, destacam a necessidade crítica de sistemas de armazenamento de energia eficientes e confiáveis. As baterias têm se mostrado uma solução promissora para enfrentar os desafios de equilibrar a oferta e a demanda de potência elétrica, armazenar energia excedente e fornecer energia de reserva quando necessário.

Este trabalho propõe um levantamento abrangente do estado da arte tecnológico, aplicações e desafios relacionados aos sistemas de armazenamento de energia elétrica por baterias.

b Desenvolvimento Histórico

A história dos sistemas estacionários de armazenamento de energia remonta ao fim do século 20, quando as usinas de energia frequentemente eram desligadas durante a noite, e acumuladores de chumbo-ácido forneciam as cargas residuais nas redes de corrente contínua [1]. As empresas de serviços públicos eventualmente reconheceram a importância da flexibilidade que o armazenamento de energia proporciona nas redes, e a primeira estação central de armazenamento de energia, uma central hidrelétrica reversível, foi colocada em operação em 1929 [2].

Com o subsequente desenvolvimento da indústria de fornecimento de eletricidade, com a busca de economias de escala em grandes estações geradoras centrais, com suas redes extensas de transmissão e distribuição, reduziu-se a intensidade de implementação e desenvolvimento de novas tecnologias de sistemas de armazenamento; fato revertido em tempos relativamente recentes. Até 2005, mais de 200 centrais hidrelétricas reversíveis estavam em operação em todo o mundo, fornecendo um total de mais de 100 GW de capacidade de geração. No entanto, pressões advindas da desregulamentação e preocupações ambientais levaram a um declínio nos investimentos em grandes instalações de centrais hidrelétricas reversíveis [3].

Porém, o interesse na aplicação prática de sistemas de armazenamento de energia elétrica está sendo retomado. As razões incluem as mudanças no ambiente regulatório global de serviços públicos, uma dependência cada vez maior da eletricidade na indústria, comércio e residências, questões de qualidade e fornecimento de energia e o crescimento das energias renováveis intermitentes como fonte importante de abastecimento elétrico. Esses fatores, combinados com a taxa acelerada de desenvolvimento tecnológico, fortalecem os cenários de aplicações práticas de sistemas de armazenamento de energia elétrica por baterias (SAEB). A expectativa de reduções nos custos unitários torna a incorporação das baterias ainda mais atraentes [3].

c Estrutura do Texto

Este estudo apresenta o estado da arte tecnológico, as aplicações e os desafios da implementação de sistemas de armazenamento de energia elétrica por baterias.

No Capítulo 2, as principais tecnologias de baterias modernas são apresentadas, incluindo íon-lítio de próxima geração e outras emergentes. No Capítulo 3, os principais fornecedores e produtos são listados. As aplicações de baterias em sistemas elétricos são discutidas no Capítulo 4. O Capítulo 5 esclarece as conclusões do estudo.

O objetivo deste Trabalho de Conclusão de Curso é fornecer uma visão abrangente e atualizada das capacidades, custos e fornecedores, desafios e oportunidades que envolvem essa tecnologia crítica no cenário da engenharia elétrica e dos sistemas de potência modernos.

2 Tecnologias

As tecnologias de baterias mais comuns incluem chumbo-ácido (Pb), íons de lítio (Li-íon), níquel-cádmio (NiCd) e níquel-metal-hidreto (NiMH). No entanto, o desenvolvimento nesta área tem progredido de forma lenta. Enquanto a Lei de Moore postula que o número de transistores em um circuito integrado dobra a cada dois anos, o aumento na capacidade das baterias de íons de lítio tem sido de aproximadamente 8% ao ano desde sua invenção em 1991. A Figura 1 oferece uma comparação do progresso dessas tecnologias em relação às baterias [4].

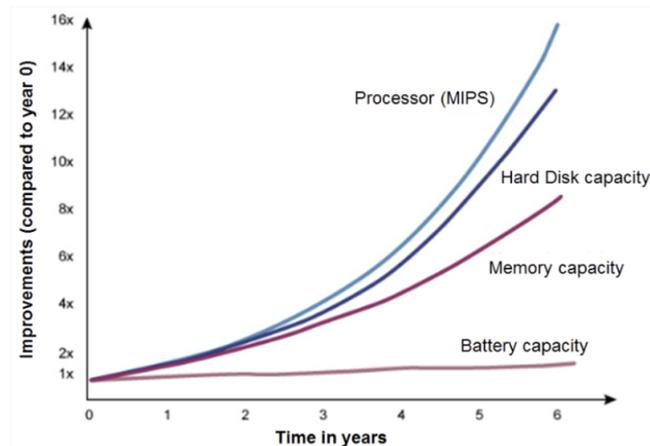


Figura 1: Comparativo do desenvolvimento tecnológico de baterias e microprocessadores [4]

As baterias de íons de lítio têm desempenhado um papel crescente desde sua introdução na década de 1990, gradualmente substituindo seus antecessores baseados em níquel. Apesar de serem mais caras, elas apresentam um custo por ciclo de carga mais favorável quando são necessários ciclos repetitivos, superando as baterias de chumbo-ácido nesse aspecto [4].

Esta evolução no campo das baterias é de grande importância, pois desempenha um papel crucial na viabilização de sistemas de armazenamento de energia mais eficientes e sustentáveis, abrindo caminho para uma gama diversificada de aplicações em sistemas de potência modernos. A seguir, analisaremos com mais detalhes as tecnologias de baterias mais usadas [5].

a Chumbo Ácido

O sistema de bateria de chumbo-ácido é uma das tecnologias mais antigas e amplamente utilizadas para armazenamento de energia. Ele ganhou destaque devido à sua robustez e capacidade de resistir a usos inadequados, tornando-o uma escolha popular em várias aplicações. No entanto, esta tecnologia tem suas próprias limitações e características distintas.

Primeiramente, o ponto forte das baterias de chumbo-ácido reside em sua durabilidade e capacidade de suportar condições adversas. Elas são conhecidas por serem extremamente resistentes a impactos físicos, variações de temperatura e sobrecargas, tornando-as ideais para aplicações onde a confiabilidade é fundamental. Além disso, essas baterias são economicamente acessíveis em comparação com algumas alternativas mais avançadas, tornando-as atraentes para uma ampla gama de aplicações comerciais e industriais.

No entanto, a tecnologia de chumbo-ácido também tem suas desvantagens. Ela possui uma baixa densidade de energia específica, o que significa que a quantidade de energia armazenada por unidade de peso ou volume é relativamente baixa. Isso limita a sua aplicabilidade em aplicações que requerem alta densidade de energia, como veículos elétricos de longa distância. Além disso, as baterias de chumbo-ácido têm um ciclo de vida limitado em comparação com algumas tecnologias mais recentes, o que as torna menos adequadas para aplicações que exigem ciclos de carga e descarga frequentes.

Um importante aspecto ambiental a ser considerado é que o chumbo é um material tóxico e, portanto, não pode ser descartado em aterros sanitários. Isso cria a necessidade de sistemas adequados de reciclagem para garantir que o chumbo seja recuperado e reciclado de maneira responsável, minimizando os impactos ambientais negativos.

Em termos de aplicações, as baterias de chumbo-ácido encontram uso em uma variedade de áreas, como cadeiras de rodas elétricas, carrinhos de golfe, veículos pessoais para transporte em fábricas e instalações industriais, iluminação de emergência e sistemas de alimentação ininterrupta. Cada uma dessas aplicações aproveita as vantagens da robustez e confiabilidade das baterias de chumbo-ácido, adaptando-se às suas limitações específicas [5, 6].

b Níquel Cádmio (NiCd)

As baterias de níquel-cádmio (NiCd) são uma tecnologia de bateria recarregável madura e bem compreendida que tem sido amplamente utilizada em aplicações onde longa vida útil, alta corrente de descarga e a capacidade de operar em condições extremas são essenciais. Elas são conhecidas por sua robustez e durabilidade, destacando-se por serem uma das poucas tecnologias que permitem carregamento ultrarrápido com estresse mínimo. Essas características fazem das baterias NiCd uma escolha confiável para diversas aplicações críticas em várias indústrias.

A longa vida útil é uma das principais vantagens das baterias NiCd. Elas podem resistir a um número significativo de ciclos de carga e descarga, o que as torna ideais para aplicações que exigem um desempenho consistente ao longo do tempo. Além disso, as baterias NiCd podem ser armazenadas em estado carregado por longos períodos sem degradação significativa, tornando-as adequadas para uso em dispositivos de emergência, como sistemas de alimentação ininterrupta.

Outra característica distintiva das baterias NiCd é sua capacidade de fornecer altas correntes de descarga. Isso as torna ideais para aplicações que requerem uma liberação rápida de energia, como ferramentas elétricas, onde a potência é essencial. Além disso, as baterias NiCd podem operar em uma ampla faixa de temperaturas, desde extremamente baixas até muito altas, tornando-as uma escolha viável para aplicações em ambientes adversos, como a aviação.

No entanto, é importante notar que, devido a preocupações ambientais, as baterias NiCd estão sendo substituídas por outras tecnologias mais recentes, como as baterias de íon-lítio. O cádmio, um componente das baterias NiCd, é tóxico e seu uso levanta preocupações em relação ao descarte ambiental. Como resultado, muitos governos e organizações estão promovendo regulamentações estritas para a gestão adequada das baterias NiCd usadas [5, 7].

c Níquel-Metal-Hidreto (NiMH)

As baterias de níquel-metal-hidreto (NiMH) desempenham um papel importante como substitutas das de níquel-cádmio (NiCd), oferecendo diversas vantagens significativas. Em primeiro lugar, as baterias NiMH contêm apenas metais levemente tóxicos em comparação com o cádmio altamente tóxico presente nas baterias NiCd. Isso contribui para uma considerável redução dos riscos ambientais e de saúde associados ao despejo inadequado de baterias, tornando as baterias NiMH uma opção mais sustentável.

Uma das características mais notáveis das baterias NiMH é a capacidade de proporcionar uma maior densidade de energia específica em comparação com as baterias NiCd. Isso significa que as baterias NiMH podem armazenar mais energia em relação ao seu peso e volume, tornando-as ideais para aplicações que demandam alta energia por unidade de peso, como veículos híbridos e elétricos.

Outra aplicação notável das baterias NiMH é a disponibilidade em formatos comuns de células, como as pilhas AA e AAA, tornando-as amplamente utilizadas em dispositivos eletrônicos de consumo. Isso inclui controles remotos, brinquedos, lanternas e muitos outros dispositivos que dependem de fontes de energia portáteis.

No entanto, é importante notar que as baterias NiMH também têm limitações, como a tendência a perder carga ao longo do tempo (autodescarga) mais rapidamente do que as baterias de íon-lítio, por exemplo. Além disso, embora apresentem uma maior densidade de energia do que as baterias NiCd, as baterias NiMH ainda ficam atrás das baterias de íon-lítio em termos de densidade de energia específica [5,7].

d Íon-Lítio (Li-ion)

As baterias de íon-lítio (Li-ion) têm se destacado nos últimos anos e estão substituindo muitas aplicações que anteriormente dependiam de baterias de chumbo e de níquel. Isso se deve a várias vantagens intrínsecas oferecidas por essa tecnologia de armazenamento de energia.

Uma das principais vantagens das baterias de íon-lítio é a alta densidade de energia específica que elas proporcionam. Isso significa que essas baterias podem armazenar uma quantidade significativa de energia em relação ao seu peso e volume, tornando-as ideais para aplicações onde a eficiência energética e a portabilidade são essenciais. Isso inclui dispositivos móveis, como smartphones, laptops, câmeras e veículos elétricos, onde o tamanho e o peso das baterias são fatores críticos.

Além disso, as baterias de íon-lítio têm uma vida útil mais longa e um alto número de ciclos de carga e descarga em comparação com muitas outras tecnologias de bateria. Isso reduz o custo por ciclo ao longo do tempo, tornando as baterias de íon-lítio economicamente atraentes, apesar de seu preço inicial mais alto.

No entanto, as baterias de íon-lítio também apresentam desafios e preocupações relacionadas à segurança. Elas podem ser propensas a superaquecimento e até a situações de incêndio em casos de uso indevido, dano físico ou superaquecimento. Para mitigar esses riscos, as baterias de íon-lítio geralmente requerem um circuito de proteção que monitora a temperatura e a tensão na bateria, interrompendo o carregamento ou a descarga se forem detectadas condições potencialmente perigosas [5, 8].

e Novas Tecnologias

1 Ultra Bateria

Essa tecnologia é essencialmente um híbrido de uma bateria de chumbo ácido, que integra a mesma e um supercapacitor na parte da placa do eletrodo [9].

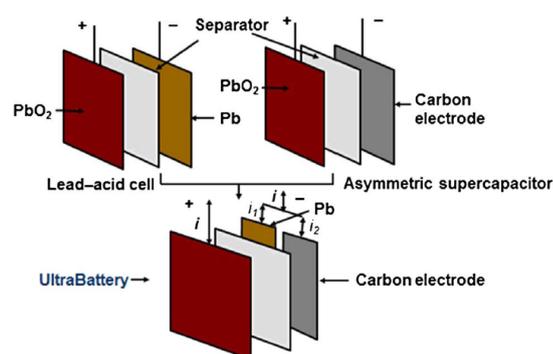


Figura 2: Estrutura da tecnologia da ultra bateria [9]

Uma das vantagens dessa tecnologia é que ela possui uma janela de tensão contínua (CC) menor do que a de um supercapacitor convencional sozinho e, portanto, pode usar sistemas de conversão de corrente contínua para corrente alternada (CC-CA) de custo mais baixo. Além disso, as características do supercapacitor de carbono permitem que o sistema de bateria lide com picos de alta potência e funcione por mais tempo em um estado de carga parcial (ECP), o que é uma das deficiências da bateria de chumbo ácido regulada por válvula convencional (CARV). A capacidade da Ultra Bateria de operar em ECP por mais tempo atenua o efeito deteriorante da tecnologia convencional de chumbo-ácido, que leva a uma vida útil mais curta. A vida útil mais curta da tecnologia convencional de baterias contribui para um maior número de

substituições e impactos ambientais mais elevados nos sistemas de energia fotovoltaica (PV). A Ultra Bateria possui uma capacidade de ciclagem de longa duração e vida útil com substituições menos frequentes, comparado aos sistemas CARV convencionais, e tem um custo de vida útil por quilowatt-hora(kWh) menor, além de poder ser quase completamente reciclada em uma nova bateria (96% especificamente) [9].

2 Materiais Energéticos Nanoestruturados em Baterias de Lítio

As baterias de lítio estão quase atingindo sua densidade de energia teórica devido às restrições impostas pelos materiais anódicos e catódicos. Embora sistemas avançados de baterias, como o lítio metálico (Li-S e Li-O₂), ainda estejam em desenvolvimento, a utilização de materiais nanoestruturados é vista como um meio eficaz para aprimorar o desempenho do sistema de bateria [9].

Em geral, a bateria de íon-lítio apresenta algumas vantagens em relação às tecnologias de bateria de chumbo-ácido e baseadas em Ni, como alta densidade de energia, longa vida útil, etc. No entanto, a tecnologia de bateria de Li de última geração não conseguirá atender às futuras aplicações em termos de alta densidade de energia devido à capacidade específica limitada do anodo de grafite (372 mAh/g) e do cátodo de óxido (100-400 mAh/g) [9].

A tecnologia de bateria de lítio com materiais energéticos nanoestruturados tem o potencial de alcançar uma densidade de energia e potência relativamente elevadas para futuras aplicações de energia elétrica, com um impacto ambiental mínimo. Em uma configuração de bateria de lítio-enxofre (Li-S), por exemplo, o ânodo de lítio e o cátodo de enxofre podem atingir uma elevada densidade de energia específica teórica de 3860 e 1672 mAh/g, respectivamente. Além da possibilidade de alcançar alta densidade de energia, o cátodo de enxofre é prontamente disponível, abundante, economicamente viável e não tóxico. Isso tornará possível que a tecnologia Li-S tenha um impacto ambiental relativamente baixo em comparação com as baterias de chumbo ácido convencionais [9].

3 Baterias de Base Metal-Ar

As baterias de base metal-ar utilizam metal como combustível e o ar como oxidante, sendo consideradas as mais compactas e potencialmente as mais econômicas. São ecologicamente amigáveis, embora tenham uma eficiência de ciclo baixa, inferior a 50%, e uma capacidade de ciclagem de algumas centenas, têm o potencial de alcançar soluções de armazenamento economicamente vantajosas com menos impactos ambientais em comparação com as convencionais baterias de chumbo-ácido [3].

Portanto, há uma necessidade de intensificar as pesquisas para o desenvolvimento adicional das suas eficiência de ciclo e capacidade de ciclagem, visando aplicações de baterias secundárias no futuro. Exemplos desses sistemas incluem o de lítio-ar, zinco-ar, sódio-oxigênio, alumínio-ar, magnésio-ar e sistemas de ferro-ar. Os parâmetros de várias baterias de metal-ar são apresentados na Tabela [1]. Essas baterias têm sido objeto de estudo devido à sua densidade de energia teórica muito alta, cerca de 2 a 10 vezes maior do que a tecnologia de bateria de íon de lítio, o que as torna uma opção promissora de armazenamento de energia para futuras aplicações elétricas, apesar dos desafios técnicos atuais [9].

Bateria	Tensão [V]	Capacidade especifica teorica [Ah/kg]	Densidade de energia teorica [Wh/kg]
Al-ar	2.71	1030	2791
Mg-ar	3.09	920	2843
Zn-ar	1.65	658	1085
Li-ar	2.96	1170	3463
Na-ar	2.27	487	1105
K-ar	2.48	377	935

Tabela 1: Parâmetros das baterias de base Metal-Ar [9]

3 Principais Fornecedores e Produtos

Este capítulo destaca alguns dos principais fornecedores do mercado e os produtos que disponibilizam atualmente. Este levantamento abordará as capacidades individuais do *portfólio* de cada fornecedor, suas especificações técnicas e alguns exemplos de aplicações específicas. A análise desses fornecedores e de seus produtos proporcionará uma compreensão abrangente das ofertas disponíveis no mercado atual, permitindo uma avaliação mais precisa das opções disponíveis para atender às diversas necessidades e exigências do setor.

a Tesla

A Tesla, sediada nos Estados Unidos, iniciou suas operações em 2003, estabelecendo-se como um dos líderes globais em tecnologia de veículos elétricos e soluções de energia sustentável. Com uma abordagem inovadora, a empresa expandiu rapidamente seus horizontes, atuando principalmente nos mercados automotivo e de energia renovável. Seus produtos revolucionários e a visão de um futuro mais sustentável conquistaram uma posição de destaque, refletida em sua presença global e influência significativa no mercado. A seguir estão os dois produtos disponibilizados por este fornecedor [10]:

- Powerwall:



Figura 3: Bateria para aplicação de consumidor final.
[10]

Ficha técnica	
Tensão nominal	120/240 V
Tipo de alimentação	Fase dividida
Frequência	60 Hz
Energia total	14 kWh
Energia disponível	13.5 kWh
Potência ativa máxima contínua	5 kW (carga e descarga)
Potência ativa, pico(10s, fora da rede/backup)	7 kW (carga e descarga)
Potência aparente máxima contínua	5.8 kVA (carga e descarga)
Potência aparente, pico(10s, fora da rede/backup)	7.2 kVA (carga e descarga)
Corrente contínua máxima	24 A
Corrente de falha máxima de saída	32 A
Proteção de sobrecorrente	30 A
Capacidade de inicialização de carga	88 - 106 A LRA
Desequilíbrio para Cargas de Fase Dividida	100%
Faixa de Fator de Potência de Saída	+/- 1.0 (ajustável)
Faixa de Fator de Potência (potência total nominal)	+/- 0.85
Tensão DC da Bateria Interna	50 V
Corrente Máxima de Falha de Alimentação	10 kA
Eficiência de ciclo	90%
Garantia	10 anos
Dimensões(AxCxL)	1150 x 753 x 147 mm
Peso	114 kg
Temperatura de operação	-20°a 50°
Preço [11]	R\$36.892,87 - R\$41.412,00 [/un.]

Tabela 2: Ficha técnica do modelo Powerwall [Cotação atual do dolar a R\$4,93]
[10]

- Megapack



Figura 4: Sistema de baterias escalonavel para aplicações em larga escala [12]

Ficha técnica	
Tensão nominal	480 V AC
Tipo de conexão	Trifásica
Frequência	60 Hz
Energia disponível (2 ou 4 horas de duração)	3.854MWh / 3.916MWh
Potência ativa (2 ou 4 horas de duração)	1.927MW / 0.979MW
Eficiência de ciclo (2 ou 4 horas de duração)	92% / 93.7%
Garantia	20 anos
Dimensões(AxCxL)	2794 x 8813 x 1651 mm
Peso	38101.759 kg
Preço [12]	R\$9.702.338,60 - R\$10.762.288,60 [/un.]

Tabela 3: Ficha técnica do modelo Megapack [Cotação atual do dolar a R\$4,93] [12]

b Moura

A Moura é uma renomada empresa brasileira no ramo de baterias, sediada no Brasil desde sua fundação em 1957. Com mais de seis décadas de experiência, a empresa iniciou suas operações com uma visão inovadora no mercado de acumuladores elétricos. Atualmente, a Moura destaca-se como uma líder no setor, atendendo não apenas o mercado nacional, mas também expandindo sua presença para além das fronteiras brasileiras. Seus principais mercados de atuação incluem não apenas o Brasil, mas também países da América Latina, América do Norte e Europa, fornecendo baterias de alta qualidade para uma variedade de aplicações, desde veículos automotivos até sistemas de energia estacionária. [13].

BESS PbC



Figura 5: Solução com baterias de Chumbo-Carbono [13]

BESS Li



Figura 6: Solução com baterias de Lítio-Ferro-Fosfato [13]

Ficha técnica								
Conexão AC								
Potência nominal [kW]	50	100	100	150	250	500	1000	4390
Número de fases	3							
Tensão nominal	380 V						690 V	
Frequência nominal	60 Hz							
Fator de Potência	0.1 I (indutivo e capacitivo)							
Saída de distorção de corrente	<3%(Pot Nominal)							
Conexão DC								
Tensão máx. de entrada nas baterias [Vdc]	520	520	900	850	900	1500		
Tensão de entrada mín. nas baterias [Vdc]	250	250	500			978		976
Corrente máx. CC nas baterias [A]	150	300	228	330	566	1200		4590
Outras informações								
Química	Chumbo-Carbono				Lítio-Ferro-Fosfato			
Energia nominal [kWh]	300	460	540	920	65	120	138	372
Temperatura de operação[°C]	-20 a 50		-30 a 65		-20 a 50		-30 a 65	
Eficiência[%]	95.50	96.40	95.50	97.20	97.60	98.80	98.93	

Tabela 4: Ficha técnica dos modelos de baterias disponíveis no catalogo Moura [13]

c LG

A LG, empresa multinacional, tem como país sede a Coreia do Sul. Iniciando suas operações em 1958, a LG estabeleceu-se como uma marca global, atuando em diversos setores, desde eletrônicos e eletrodomésticos até soluções para negócios e produtos químicos. Reconhecida por sua inovação e qualidade, a LG conquistou uma presença significativa em mercados-chave em todo o mundo, incluindo Ásia, América do Norte, Europa e América Latina, oferecendo uma ampla gama de produtos e serviços para atender às necessidades dos consumidores em escala global [14].



Figura 7: Instalações de referência dos produtos LG [14]

Ficha técnica					
Modelo	EB25T000N01	EB50T000N00	EB75T000N00	EB01M000N00	EF01M000N01
AC Entrada/Saída					
Potência ativa nominal [kW]	250	500	750	1000	1000
Corrente de saída nominal [A]	515	874	1311	1748	1312
Tensão de saída nominal [Vac]	280	330	330	330	440
Frequência [Hz]	50/60				
Distorção de harmônico de corrente [%]	<2				
Fator de potência	>0.99				
DC Entrada/Saída					
Tensão máx. de entrada [Vdc]	950	900	900	900	1100
Corrente máx. de entrada [A]	476	750	1125	1500	1500
Faixa de tensão DC [V]	550 820	550 820	550 820	550 820	750 1100
Faixa de operação de temperatura [°C]	-20 40				

Tabela 5: Ficha técnica dos modelos de baterias disponíveis no catálogo LG [14]

d Ecube

Com sede em Shijiazhuang, a Ecube iniciou suas operações em alta tecnologia especializada em armazenamento de energia e integração de sistemas de bateria de lítio. Desde sua fundação, em 2007, a empresa se destacou como líder nos mercados de armazenamento de energia industrial e comercial, integração de energias renováveis, sistemas de bateria de lítio para alimentação contínua e pacotes de bateria para veículos especiais. A Ecube possui uma equipe técnica com mais de uma década de experiência, desenvolvendo produtos avançados, incluindo um sistema de gerenciamento de bateria líder na indústria, garantindo segurança, estabilidade e equilíbrio. Seus projetos se expandiram para mercados-chave como Coreia do Sul, Rússia, Países Baixos, Alemanha e Oriente Médio, consolidando sua presença global como fornecedora de soluções de armazenamento de energia inovadoras e sustentáveis. [15].



Figura 8: Alguns dos modelos de baterias disponíveis [15]

Ficha técnica					
Modelos	GRES-75-50	GRES-150-100	GRES-225-150	GRES-300-200	GRES-600-400
Potência ativa nominal	50	100	150	200	400
Tensão nominal [V]	380				
Fator de potência	>0.99 (Tensão nominal)				
Frequência nominal [Hz]	50/60				
Eficiência [%]	95	95	95	95	95
Energia nominal [kWh]	76.8	153.6	230.4	307.2	614.4

Tabela 6: Ficha técnica dos modelos de baterias disponíveis no catalogo Ecube [15]

e NGK Insulators

A NGK Insulators, com sede no Japão, iniciou suas operações em 1919 e tem sido uma figura proeminente no mercado global desde então. Reconhecida por sua excelência em materiais cerâmicos e soluções de isolamento, a empresa estabeleceu sua posição como líder na fabricação de produtos para aplicações elétricas, eletrônicas e de energia. Com uma presença internacional sólida, a NGK Insulators atende a uma ampla gama de mercados em todo o mundo, incluindo setores de energia, automotivo, saúde e tecnologia, oferecendo inovação e qualidade em suas soluções para clientes globais [16].

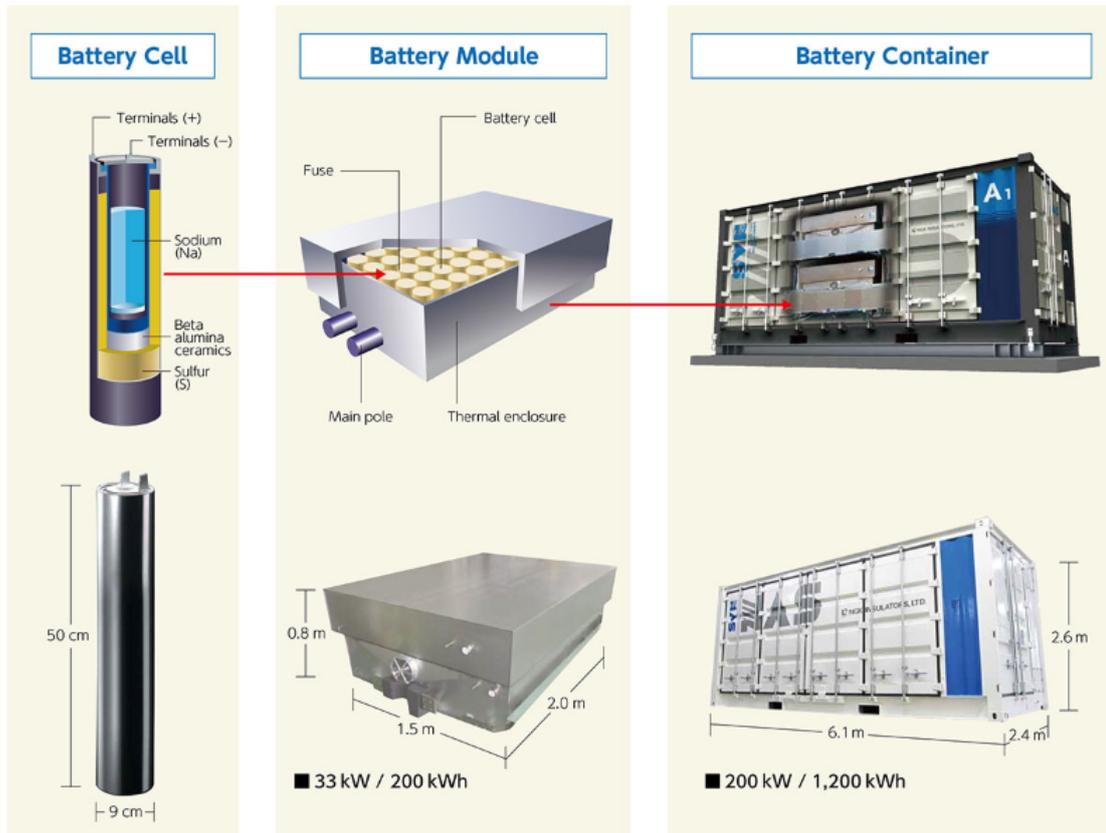


Figura 9: Sistema de baterias de Sódio-Enxofre [16]

Ficha técnica				
Tamanho da subunidade	1.45	2.8	4.35	5.8
Quantidade de containers de baterias conectados	1	2	3	4
Potência ativa nominal [kW]	250	500	750	1000
Energia nominal [kWh]	1450	2900	4350	5800
Tensão nominal [V]	135 228	270 456	405 684	540 912
Corrente nominal [A]	-1200 +1500			

Tabela 7: Ficha técnica dos modelos de baterias disponíveis no catalogo NGK [16]

f Outros Fornecedores

Durante a pesquisa de mercado para este trabalho, foram encontrados outros fornecedores além dos já mencionados anteriormente. No entanto, os mesmos não possuem um catálogo de produtos predefinido, ou seja, trabalham apenas com projetos sob medida, o que quer dizer que seus produtos podem atender a demanda especificada pelo cliente [17–22].



GE Renewable Energy



Figura 10: Marcas com disponibilidade de produtos sob medida.

4 Aplicações

À medida que a demanda por soluções de energia eficientes e sustentáveis continua a crescer, as aplicações de baterias em sistemas de potência se tornaram cada vez mais diversas e cruciais. Esses sistemas versáteis de armazenamento de energia encontram seu lugar em vários setores, incluindo a indústria de geração de energia convencional, recursos de energia distribuída (RED) e sistemas de abastecimento de energia renovável intermitente. Eles desempenham um papel fundamental na gestão de energia, preenchendo lacunas de energia e garantindo a qualidade e confiabilidade da energia.

As aplicações de qualidade de energia estão entre as funções-chave que as baterias fornecem. Além disso, sua integração com sistemas de energia renovável é essencial para a realização de uma infraestrutura de energia mais sustentável e resiliente. Seja em sistemas de geração em grande escala relacionados à transmissão, redes de distribuição ou em locais de usuários finais, as tecnologias de armazenamento de energia se mostram indispensáveis para aprimorar a eficiência geral e a confiabilidade dos sistemas de energia.

Seguindo a abordagem de Palizban [23], a Figura 11 oferece uma visão esquemática da integração de sistemas de armazenamento de energia por bateria (SAEB) em diferentes níveis de rede, atendendo a uma série de tarefas de aplicação nos modernos sistemas de energia [24].

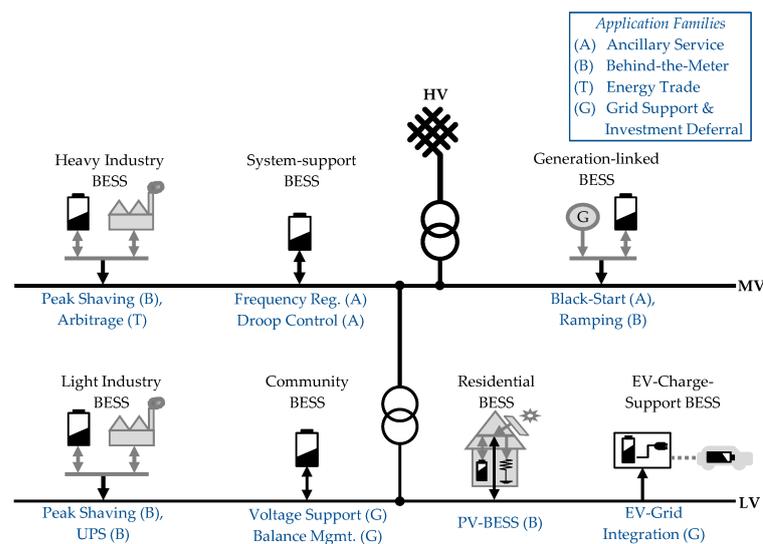


Figura 11: Diferentes tipos de sistemas de armazenamento estacionário de bateria (cor preta) agrupados de acordo com sua integração aos níveis de rede de Baixa Tensão (BT) e Média Tensão (MT). Aplicações típicas estão listadas em azul, e letras entre parênteses estão vinculadas às famílias de aplicativos conforme definido na legenda da figura. As conexões e transformadores de Alta Tensão (AT) sobrepostos são representados esquematicamente.

[24]

a Aplicações Energéticas

A energia em massa é uma aplicação fundamental para integrar uma grande quantidade de variação nas redes modernas. Os dois principais tipos são representados a seguir:

1 Arbitragem Tarifária

A arbitragem tarifária desempenha um papel crucial na otimização econômica e eficiência dos sistemas de geração de energia, que frequentemente envolvem custos substanciais. O armazenamento estratégico de energia em períodos de preços baixos, seguido pela venda durante os picos de demanda, quando a eletricidade atinge valores mais elevados, representa o cerne dessa aplicação. Essa abordagem não apenas reduz os custos operacionais, mas também pode contribuir para a estabilização do sistema elétrico. Em microrredes com fontes de energia renovável, essa prática ganha ainda mais relevância, permitindo o armazenamento de energia excedente gerada durante períodos de demanda reduzida e sua injeção durante fases de escassez, contribuindo assim para uma gestão mais eficaz e sustentável da oferta e demanda de energia [23, 25].

2 Nivelamento de Demanda

O conceito de nivelamento de demanda compartilha semelhanças significativas com a arbitragem tarifária, divergindo no sentido de que o nivelamento de demanda destina-se a atender à carga de pico, sem ter um objetivo econômico, ao contrário da arbitragem tarifária. Essa aplicação contribui para a melhoria do desempenho do sistema, baseando-se em uma capacidade normal e fornecendo suporte à demanda de pico por meio de um SAEB. Enquanto a aplicação de nivelamento de demanda é comumente implementada no lado do consumidor, a arbitragem tarifária é aplicada no lado do fornecimento. [23, 26, 27]

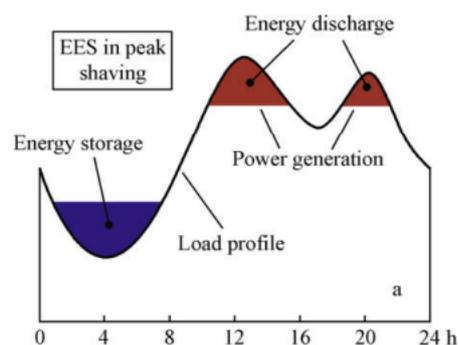


Figura 12: Perfil de carga de um sistema de armazenamento de energia de larga escala utilizado para nivelamento de carga.

[3]

b Aplicações de Serviços Ancilares

Nos sistemas elétricos modernos, oferecer suporte ao sistema durante a transmissão de energia desde sua geração até o consumidor pode ser chamado de serviço ancilar e requer ajustes e reservas flexíveis. Abaixo, são apresentadas diferentes abordagens para essa aplicação:

1 Acompanhamento de Carga

Em comparação com os tipos de geração, os SAEB têm uma resposta rápida a mudanças na carga. Dado que a carga pode sofrer variações frequentes, o armazenamento de energia é mais adequado para aplicações de acompanhamento de carga. Na verdade, nessa aplicação, a responsabilidade do armazenamento de energia é equilibrar a parte de geração e a carga. Outra razão para apoiar a variação da carga usando armazenamento de energia é para que o sistema possa abranger ambos os lados das variações, acompanhando tanto os aumentos quanto as reduções na carga [23, 27].

2 Reserva Rotativa

A reserva rotativa é uma parte da capacidade da fonte que não é utilizada em operação normal [28]. No entanto, a fonte pode suprir uma escassez de energia no sistema ao injetar energia por um período específico. De fato, a escassez de energia é coberta por fontes que operam nesse modo extra de operação. Como a geração de energia deve continuar até que o sistema de *backup* atinja seu valor nominal, o sistema de armazenamento nessa aplicação deve ser capaz de descarregar por um longo período (pelo menos uma hora) [23, 27].

3 Suporte de Tensão

A estabilidade é uma questão importante no sistema de energia e pode ser alcançada ao manter a tensão dentro dos limites permitidos. O controle da potência reativa é necessário para isso e pode ser regulado com precisão com um ESS atuando como recurso de suporte de tensão. Como a potência reativa não pode ser transferida de maneira razoável por longas distâncias, uma aplicação de suporte de tensão é utilizada localmente para lidar com esse problema [27, 29].

4 Partida a Frio

Eventos não planejados podem causar interrupções no fornecimento de energia em todo o sistema ou em uma parte específica. Isso pode resultar em um apagão, comprometendo a estabilidade do sistema. O sistema é restaurado por meio de um processo chamado partida a frio, que envolve o gerenciamento de energia, controle de tensão e balanceamento. Nessa aplicação, o sistema de armazenamento de energia gera energia ativa que pode ser utilizada para energizar linhas de distribuição ou como energia inicial para grandes usinas de energia [23].

5 Regulação de Frequência

O controle de frequência é crucial nos sistemas de energia para lidar com as várias pequenas variações que ocorrem. O sistema de armazenamento de energia em um regulador de frequência auxilia os sistemas de energia corrigindo as variações de frequência dentro dos limites permitidos, por exemplo, para $\pm 0,1$ Hz no Nordel (Norte da Europa) ou $\pm 0,2$ Hz no UCTE (Continente Europeu) [30, 31]. Existem três tipos de regulação de frequência: primária, secundária e terciária [32]. Estas são ilustradas na Figura 13. O controle da reserva primária tem a responsabilidade de criar um equilíbrio entre geração e demanda e de restaurar a frequência dentro de 5 a 30 segundos para o controle do gerador [33, 34]. A reserva secundária possui dois objetivos: serve como reserva para a regulação primária e garante que a frequência seja ajustada para 60 Hz, evitando desequilíbrios na interconexão. Este nível de controle reage às reservas de controle primário por 5 a 15 minutos e, em seguida, deve estar pronto para correção de frequência dentro dos limites permitidos [34, 35]. No último nível, a reserva terciária tem o mesmo objetivo da reserva secundária e também visa equilibrar carga e geração, ajudando assim a manter o sistema sincronizado. Este nível de reserva é operado manualmente e deve atingir sua meta em 15 a 60 minutos, dependendo do país.

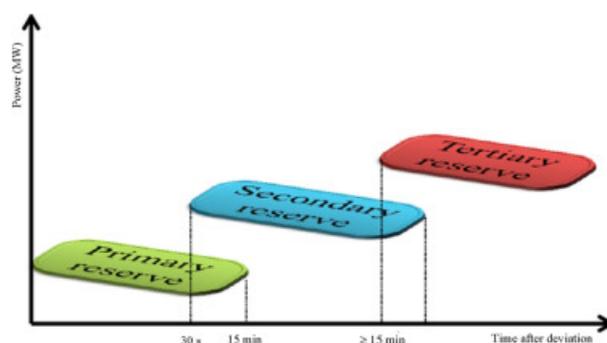


Figura 13: Áreas de operação dos diferentes níveis de regulação de frequência [23]

c Aplicações em Gestão de Energia para Clientes

As aplicações de gestão de energia são fundamentadas na qualidade e confiabilidade da entrega de energia ao consumidor, detalhadas a seguir:

1 Qualidade de Energia

Fica claro que há variações na geração e nas fontes de energia, especialmente no caso de recursos energéticos renováveis, que são dependentes das condições ambientais. De fato, as oscilações nos sistemas de geração de energia levantam preocupações em relação à qualidade de energia, principalmente no que diz respeito aos harmônicos de tensão e à variação de tensão. Para gerenciar esse problema,

o armazenamento de energia surge como a primeira alternativa para lidar com essas variações. Essa aplicação contribui para proteger cargas subsequentes contra eventos de curta duração e aprimorar a qualidade da energia fornecida [23, 36–38].

2 Confiabilidade Energética

O princípio da confiabilidade energética é semelhante ao da qualidade de energia, mas a confiabilidade energética segue a qualidade de energia em sequência. Isso significa que o tempo necessário para restaurar a energia com esta aplicação é mais longo do que o tempo requerido pela aplicação de qualidade de energia. O sistema de armazenamento de energia nesta aplicação deve possuir energia de alta confiabilidade com a melhor qualidade possível [23, 39–41].

d Aplicações de Integração de Energias Renováveis

Existem muitas flutuações na energia gerada por fontes de energias renováveis as quais podem ser compensadas por SAEB. Essas aplicações são divididas em duas categorias distintas: deslocamento temporal e reforço de capacidade. A aplicação de deslocamento temporal gerencia o problema por meio de diferentes técnicas de armazenamento de energia. Armazena energia quando a demanda é menor do que a geração e injeta essa energia no sistema durante períodos de escassez. Nesta aplicação, o armazenamento de energia pode ser instalado em qualquer lugar do sistema, seja próximo à fonte ou à carga. A responsabilidade da aplicação de reforço de capacidade é suavizar a potência e a saída de voltagem da energia renovável ao longo de um curto período de tempo utilizando um sistema de armazenamento de energia. A potência de saída das fontes de energia renováveis é adicionada ao armazenamento de energia e sustenta a carga. Essa combinação também pode contribuir para melhorar a qualidade da energia [23, 42–44].

5 Conclusões

É evidente o crescente interesse e avanços significativos em tecnologias de baterias para várias aplicações. Tanto as soluções disponíveis no mercado quanto as tecnologias em pesquisa destacam-se por sua diversidade e potencial inovador. A variedade de produtos no mercado reflete a rápida evolução das tecnologias de baterias, oferecendo opções para armazenamento de energia em diferentes escalas e requisitos.

As tecnologias emergentes, impulsionadas por pesquisa contínua, prometem revolucionar ainda mais o cenário de armazenamento de energia. Os avanços na eficiência, vida útil, densidade de energia e custos estão moldando um futuro onde os sistemas de armazenamento de energia por baterias serão ainda mais acessíveis e viáveis em várias indústrias, desde setores residenciais e comerciais até aplicações de grande escala na rede elétrica.

Fornecedores líderes nesse mercado estão competindo para oferecer produtos cada vez mais avançados, com uma gama diversificada de opções que atendem às necessidades específicas de armazenamento de energia. No entanto, os custos associados a esses sistemas ainda são um fator crítico a ser considerado para sua adoção em larga escala.

Em suma, os sistemas de armazenamento de energia por baterias representam uma peça fundamental no cenário energético atual e futuro. Com uma pesquisa contínua e o compromisso crescente com a inovação, essas tecnologias estão pavimentando o caminho para uma rede elétrica mais eficiente, sustentável e resiliente, alimentando um futuro onde a energia seja acessível, confiável e amiga do ambiente.

Referências

- [1] J. Baker and A. Collinson, "Electrical energy storage at the turn of the millennium," *Power Engineering Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 107–112, 1999.
- [2] J. Ahearne, "Storage of electric energy, report on research and development of energy technologies," *International Union of Pure and Applied Physics*, vol. 76, p. 86, 2004.
- [3] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in natural science*, vol. 19, no. 3, pp. 291–312, 2009.
- [4] I. Buchmann, "BU-002: Introduction." *www.batteryuniversity.com*, 2021.
- [5] —, "BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries." *www.batteryuniversity.com*, 2021.
- [6] —, "BU-201: How does the Lead Acid Battery Work?." *www.batteryuniversity.com*, 2021.
- [7] —, "BU-203: Nickel-based Batteries." *www.batteryuniversity.com*, 2021.
- [8] —, "BU-204: How do Lithium Batteries Work?." *www.batteryuniversity.com*, 2021.
- [9] D. Akinyele, J. Belikov, and Y. Levron, "Battery storage technologies for electrical applications: Impact in stand-alone photovoltaic systems," *Energies*, vol. 10, no. 11, p. 1760, 2017.
- [10] Tesla, "Tesla [online]," Disponível em: <https://www.tesla.com>, 2023, acessado em: 2023-12-02.
- [11] —, "Tesla powerwall price," [Online] Disponível em: <https://www.tesla.com/powerwall/design>, 2023, Acessado em: 2023-12-06.
- [12] "Tesla megapack price [online]," Disponível em: <https://www.tesla.com/megapack/design>, 2023, acessado em: 2023-12-06.
- [13] Moura, "Moura catálogo moura bess [online]," Disponível em: <https://www.moura.com.br/produtos/bess>, 2023, acessado em: 2023-12-07.
- [14] LG, "LG lg energy storage system [online]," Disponível em: <https://www.lg.com/pt/baterias-ESS/>, 2023, acessado em: 2023-12-07.
- [15] Ecube, "Ecube ecube product specification [online]," Disponível em: <http://tinyurl.com/4jcf8mzh>, 2023, acessado em: 2023-12-07.
- [16] NGK Insulators, "NGK ngk nas battery system [online]," Disponível em: <https://www.ngk-insulators.com/en/product/nas.html>, 2023, acessado em: 2023-12-07.
- [17] BLJ Solar, "BLJ Solar commercial and industrial energy storage solution [online]," Disponível em: https://www.bljsolar.com/commercial-and-industrial-energy-storage/?gclid=Cj0KQCQiA35urBhDCARIsAOU7QwmKKp1T1u9_wLEOx8_2sMAAj0xe5wBTmsnXFZ7Sslq3AB8Kuffc_waAjIDEALw_wcB, 2023, acessado em: 2023-12-07.
- [18] GE, "GE Renewable Energy ge's flexreservoir solution [online]," Disponível em: <https://www.ge.com/renewableenergy/solar-storage/flexreservoir>, 2023, acessado em: 2023-12-07.
- [19] Celltech, "Celltech energy storage systems [online]," Disponível em: <https://celltech-group.com/batteries-and-power-solutions/energy-storage-systems/>, 2023, acessado em: 2023-12-07.
- [20] Honeywell, "HoneyWell honeywell's battery energy storage system [online]," Disponível em: <http://tinyurl.com/yvnjr3b3>, 2023, acessado em: 2023-12-07.
- [21] Johnson Controls, "Johnson Controls distributed energy storage [online]," Disponível em: https://www.johnsoncontrols.com/en_ca/distributed-energy-storage/des-l1000, 2023, acessado em: 2023-12-07.
- [22] Siemens, "Siemens Energy bluevault energy storage solutions [online]," Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/bluevault.html>, 2023, acessado em: 2023-12-07.
- [23] O. Palizban and K. Kauhaniemi, "Energy storage systems in modern grids—matrix of technologies and applications," *Journal of Energy Storage*, vol. 6, pp. 248–259, 2016.
- [24] H. C. Hesse, M. Schimpe, D. Kucevic, and A. Jossen, "Lithium-ion battery storage for the grid—a review of stationary battery storage system design tailored for applications in modern power grids," *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 2107, 2017.

- [25] M. Bragard, N. Soltau, S. Thomas, and R. W. De Doncker, "The balance of renewable sources and user demands in grids: Power electronics for modular battery energy storage systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 3049–3056, 2010.
- [26] J. Makansi and J. Abboud, "Energy storage," *Energy Storage Council White Paper*, 2002.
- [27] J. Eyer and G. Corey, "Energy storage for the electricity grid: Benefits and market potential assessment guide," *Sandia National Laboratories*, vol. 20, no. 10, p. 5, 2010.
- [28] O. Gomis-Bellmunt, R. Villafafila-Robles, and A. Sumper, "A review of energy storage technologies for wind power applications," 2012.
- [29] A. A. Akhil, G. Huff, A. B. Currier, B. C. Kaun, D. M. Rastler, S. B. Chen, A. L. Cotter, D. T. Bradshaw, and W. D. Gauntlett, *DOE/EPRI 2013 electricity storage handbook in collaboration with NRECA*. Sandia National Laboratories Albuquerque, NM, USA, 2013, vol. 1.
- [30] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T.-L. Lee, and P. C. Loh, "Advanced control architectures for intelligent microgrids—part i: Decentralized and hierarchical control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1254–1262, 2012.
- [31] J. M. Guerrero, P. C. Loh, T.-L. Lee, and M. Chandorkar, "Advanced control architectures for intelligent microgrids—part ii: Power quality, energy storage, and ac/dc microgrids," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1263–1270, 2012.
- [32] D. Energinet, "Ancillary services to be delivered in denmark tender conditions," *Technical report, Energinet, Fredericia*, 2012.
- [33] P. F. Ribeiro, B. K. Johnson, M. L. Crow, A. Arsoy, and Y. Liu, "Energy storage systems for advanced power applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 89, no. 12, pp. 1744–1756, 2001.
- [34] F. D. Galiana, F. Bouffard, J. M. Arroyo, and J. F. Restrepo, "Scheduling and pricing of coupled energy and primary, secondary, and tertiary reserves," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, no. 11, pp. 1970–1983, 2005.
- [35] Y. G. Rebours, D. S. Kirschen, M. Trotignon, and S. Rossignol, "A survey of frequency and voltage control ancillary services—part i: Technical features," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 22, no. 1, pp. 350–357, 2007.
- [36] H. Bevrani, A. Ghosh, and G. Ledwich, "Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives," *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 5, pp. 438–457, 2010.
- [37] Y. Atwa, E. El-Saadany, M. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization," *IEEE transactions on power systems*, vol. 25, no. 1, pp. 360–370, 2009.
- [38] J. Mundackal, A. C. Varghese, P. Sreekala, and V. Reshmi, "Grid power quality improvement and battery energy storage in wind energy systems," in *2013 Annual International Conference on Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy*. IEEE, 2013, pp. 1–6.
- [39] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galván, R. C. PortilloGuisado, M. M. Prats, J. I. León, and N. Moreno-Alfonso, "Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1002–1016, 2006.
- [40] A. Moreno-Munoz, *Power quality*. Springer, 2007.
- [41] R. E. Brown, *Electric power distribution reliability*. CRC press, 2017, vol. 1.
- [42] R. M. Strzelecki, *Power electronics in smart electrical energy networks*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [43] C. A. Hill, M. C. Such, D. Chen, J. Gonzalez, and W. M. Grady, "Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation," *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 3, no. 2, pp. 850–857, 2012.
- [44] J. P. Barton and D. G. Infield, "Energy storage and its use with intermittent renewable energy," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 441–448, 2004.