v7.n12.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS (BESS)

BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS (BESS)

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN BATERÍAS (BESS)

Vinicius Caetano[1], Valdecy Cardoso Dos Santos[1]

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i12.9500

PUBLICADO: 12/2026

RESUMO

A crescente participação de fontes renováveis variáveis na matriz elétrica amplia a necessidade de soluções capazes de proporcionar flexibilidade, confiabilidade e melhor equilíbrio entre geração e consumo. Nesse contexto, os Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias, conhecidos como BESS (Battery Energy Storage Systems), constituem uma alternativa tecnológica aplicável desde sistemas de pequena escala até instalações de grande porte conectadas à rede elétrica. Este trabalho tem como objetivo analisar o funcionamento, as principais tecnologias, as aplicações e os benefícios dos BESS, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. A pesquisa é de natureza bibliográfica, exploratória e qualitativa, baseada em literatura técnica, documentos institucionais e fontes especializadas. A análise aborda a composição dos sistemas, o processo de carga e descarga, o papel dos sistemas de gerenciamento de baterias, as características de tecnologias como íons de lítio e chumbo-ácido e alternativas emergentes, além de aplicações relacionadas à integração de fontes renováveis, controle de demanda, qualidade da energia e continuidade do fornecimento. Os resultados da revisão indicam que os BESS podem contribuir para a flexibilidade operacional das redes, para o aproveitamento de excedentes de geração e para a prestação de serviços auxiliares. Entretanto, sua aplicação envolve desafios relacionados ao custo, degradação, segurança, disponibilidade de matérias-primas, reciclagem, requisitos de conexão e regulamentação. No Brasil, a evolução regulatória recente reforça a importância do armazenamento como elemento do planejamento do setor elétrico. Conclui-se que a utilização de BESS deve ser analisada de forma integrada, considerando características técnicas, econômicas, ambientais e regulatórias de cada aplicação.

PALAVRAS-CHAVE: Baterias de íons de lítio. Armazenamento de Energia. Sistema solar.

ABSTRACT

The increasing participation of variable renewable energy sources in electricity systems heightens the need for solutions capable of providing flexibility, reliability and better balance between generation and consumption. In this context, Battery Energy Storage Systems (BESS) are a technological alternative applicable from small-scale systems to large grid-connected installations. This study aims to analyze the operation, main technologies, applications and benefits of BESS, considering technical, economic and environmental aspects. The research is bibliographic, exploratory and qualitative, based on technical literature, institutional documents and specialized sources. The analysis addresses system components, charging and discharging processes, battery management systems, characteristics of lithium-ion and lead-acid batteries and emerging alternatives, as well as applications related to renewable integration, demand management, power quality and supply continuity.

[1] Universidade de Araraquara.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

The review indicates that BESS can contribute to grid flexibility, use of generation surpluses and provision of ancillary services. However, their application involves challenges related to cost, degradation, safety, raw materials, recycling, grid connection and regulation. In Brazil, recent regulatory developments reinforce the relevance of storage in power-system planning. It is concluded that BESS applications should be assessed in an integrated manner, considering the technical, economic, environmental and regulatory characteristics of each project.

KEYWORDS: Lithium-ion batteries. Energy storage. Solar system.

RESUMEN

La creciente participación de fuentes renovables variables en la matriz eléctrica aumenta la necesidad de soluciones capaces de proporcionar flexibilidad, confiabilidad y un mejor equilibrio entre generación y consumo. En este contexto, los Sistemas de Almacenamiento de Energía en Baterías (BESS) constituyen una alternativa tecnológica aplicable desde sistemas de pequeña escala hasta instalaciones de gran tamaño conectadas a la red eléctrica. Este trabajo analiza el funcionamiento, las principales tecnologías, las aplicaciones y los beneficios de los BESS, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales. La investigación es bibliográfica, exploratoria y cualitativa, basada en literatura técnica, documentos institucionales y fuentes especializadas. El análisis aborda los componentes del sistema, los procesos de carga y descarga, los sistemas de gestión de baterías, las características de tecnologías como ion-litio y plomo-ácido y alternativas emergentes, además de aplicaciones relacionadas con la integración de fuentes renovables, la gestión de la demanda, la calidad de la energía y la continuidad del suministro. La revisión indica que los BESS pueden contribuir a la flexibilidad operativa de las redes, al aprovechamiento de excedentes de generación y a la prestación de servicios auxiliares. Sin embargo, su aplicación presenta desafíos relacionados con costos, degradación, seguridad, materias primas, reciclaje, conexión a la red y regulación. Se concluye que cada aplicación debe evaluarse de forma integrada, considerando sus características técnicas, económicas, ambientales y regulatorias.

PALABRAS CLAVE: *Baterías de iones de litio. Almacenamiento de energía. Sistema solar.*

1. INTRODUÇÃO

A expansão da demanda por energia elétrica e a necessidade de reduzir impactos associados ao uso de combustíveis fósseis têm estimulado a diversificação das matrizes energéticas e a ampliação da participação de fontes renováveis. Fontes como solar fotovoltaica e eólica apresentam vantagens relacionadas à redução das emissões durante a operação, mas possuem características de variabilidade que introduzem desafios ao planejamento e à operação dos sistemas elétricos.

Nesse cenário, os sistemas de armazenamento de energia assumem papel relevante porque permitem deslocar temporalmente a disponibilidade da energia. Entre as diferentes tecnologias de armazenamento, os sistemas baseados em baterias destacam-se pela capacidade de resposta rápida, modularidade e possibilidade de aplicação em diferentes escalas. A Agência Internacional de Energia (IEA) registra forte expansão do armazenamento por baterias e aponta sua importância para a flexibilidade dos sistemas elétricos e para a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

integração de fontes renováveis. Em 2025, foram adicionados globalmente 108 GW de capacidade de armazenamento por baterias, segundo a IEA (2026).

Um BESS não corresponde apenas ao conjunto de células eletroquímicas. O sistema normalmente envolve baterias, sistemas de conversão de potência, sistemas de gerenciamento de baterias, dispositivos de proteção, controle e monitoramento. A integração desses elementos permite realizar funções como armazenamento e posterior entrega de energia, controle de demanda, suporte à rede e fornecimento de energia de reserva.

No Brasil, o tema também adquiriu relevância regulatória. A ANEEL informa que, em 2026, foram estabelecidos procedimentos para sistemas de armazenamento de energia elétrica autônomos por baterias e para sistemas colocalizados a centrais geradoras (ANEEL, 2026a; 2026b), indicando uma evolução do enquadramento institucional da tecnologia.

Diante desse contexto, este trabalho apresenta uma revisão estruturada sobre os sistemas BESS, buscando relacionar seus fundamentos técnicos às aplicações práticas e aos principais benefícios e limitações. A proposta é superar uma abordagem exclusivamente descritiva, organizando a literatura em eixos de análise que permitam discutir quando e por que o armazenamento por baterias pode ser útil ao sistema elétrico.

1.1. Problema de pesquisa

Em que medida os Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) podem contribuir para a flexibilidade, estabilidade, confiabilidade e melhor utilização da energia elétrica, considerando simultaneamente suas características técnicas, aplicações, custos, impactos ambientais e desafios de implementação?

1.2. Hipótese

Considera-se como hipótese que a utilização de BESS pode favorecer uma gestão mais flexível da energia elétrica, permitindo deslocar energia no tempo, apoiar a integração de fontes renováveis variáveis e prestar serviços de suporte à rede. Entretanto, os benefícios dependem das características da aplicação, da tecnologia empregada, do regime de operação, dos custos e das condições regulatórias e ambientais.

1.3. Objetivo geral

Analisar o funcionamento, as principais tecnologias, as aplicações, os benefícios e os desafios dos Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS), considerando sua contribuição para o desempenho e a flexibilidade dos sistemas elétricos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1.4. Objetivos específicos

• Descrever o princípio de funcionamento e os principais componentes de um sistema BESS.

• Caracterizar as principais tecnologias de baterias utilizadas ou estudadas para armazenamento estacionário.

• Identificar aplicações dos BESS na geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica.

• Discutir a contribuição dos BESS para a integração de fontes renováveis e para a estabilidade e qualidade da energia.

• Analisar aspectos econômicos relacionados à implantação e operação dos sistemas de armazenamento.

• Discutir aspectos ambientais, de segurança, degradação, vida útil e destinação das baterias.

• Apresentar os principais desafios e perspectivas para a expansão dos BESS, com atenção ao contexto brasileiro.

1.5. Justificativa

A relevância do tema está associada à transformação dos sistemas elétricos e ao crescimento de fontes de geração cuja produção varia conforme condições ambientais. A necessidade de flexibilidade aumenta quando geração e consumo não coincidem temporalmente. O armazenamento permite introduzir um elemento de controle sobre essa diferença, armazenando energia em determinados períodos e disponibilizando-a posteriormente.

Além da função de deslocamento de energia, baterias podem responder rapidamente a variações de potência e participar de serviços associados à operação da rede. Por isso, estudar BESS envolve não apenas a tecnologia eletroquímica, mas também eletrônica de potência, controle, proteção, planejamento, economia e aspectos ambientais. A atualização regulatória brasileira torna a análise ainda mais pertinente, pois cria condições institucionais específicas para a implantação de sistemas de armazenamento.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Armazenamento de energia e BESS

O armazenamento de energia consiste na conversão de energia para uma forma que possa ser mantida e posteriormente reconvertida para utilização. No setor elétrico, essa

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

capacidade é relevante porque geração e consumo precisam permanecer equilibrados continuamente. Os sistemas de armazenamento podem utilizar diferentes princípios físicos, incluindo tecnologias eletroquímicas, mecânicas, térmicas e eletromagnéticas.

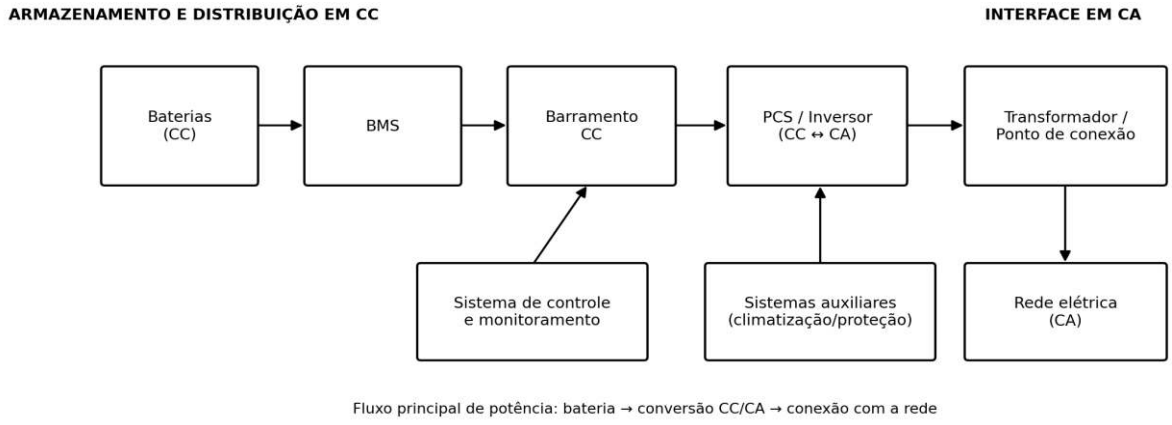
Os BESS utilizam baterias eletroquímicas como elemento central. A energia elétrica é convertida em energia química durante o carregamento e reconvertida em energia elétrica durante a descarga. O desempenho do conjunto depende não somente das células, mas também do sistema de conversão, gerenciamento, proteção e controle.

A literatura técnica destaca que os BESS podem atuar em sistemas isolados e conectados à rede, contribuindo para o equilíbrio entre oferta e demanda, integração de fontes renováveis e continuidade do fornecimento. A IEA também identifica as baterias como uma das tecnologias de armazenamento de crescimento mais rápido.

2.2. Funcionamento dos sistemas BESS

A arquitetura elétrica de um BESS integra o armazenamento eletroquímico, o sistema de gerenciamento, o barramento em corrente contínua, o sistema de conversão de potência e a interface com a rede elétrica.

Figura 1. Diagrama esquemático da arquitetura elétrica completa de um BESS



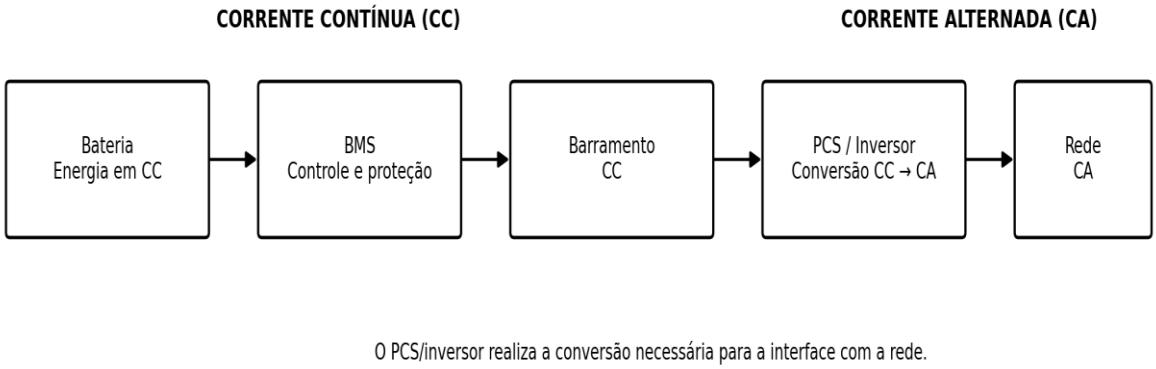
Fonte: Elaborado pelos autores com base na Matrix energia (2026).

É importante distinguir os regimes elétricos presentes no sistema. No interior das baterias e no barramento de armazenamento, a energia é disponibilizada em Corrente Contínua (CC). O BMS monitora e controla grandezas como tensão, corrente, temperatura e estado de carga, enquanto o barramento CC interliga o armazenamento ao sistema de conversão. Para que a energia seja transferida para a rede elétrica convencional, o PCS (Power Conversion System),

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

também denominado inversor bidirecional, realiza a conversão entre CC e Corrente Alternada (CA). Assim, na interface de conexão com a rede, a energia passa a ser tratada em CA, compatibilizando o BESS com as características elétricas do sistema ao qual está conectado.

Figura 2. Diagrama em blocos do fluxo de energia e da conversão entre CC e CA em um BESS



Fonte: Elaborado pelos autores com base na Matrix energia (2026).

Durante o carregamento, o sistema de conversão de potência recebe energia elétrica e a disponibiliza às baterias em condições controladas. A energia é armazenada por meio de reações eletroquímicas. Durante a descarga, o processo é invertido e a energia química é convertida novamente em eletricidade, passando pelo sistema de conversão antes de ser entregue à carga ou à rede.

O controle do processo precisa respeitar limites de tensão, corrente, temperatura e estado de carga. O gerenciamento adequado desses parâmetros influencia a segurança, o desempenho e a vida útil das baterias. Em sistemas de maior porte, a coordenação entre baterias, conversores e controles externos é fundamental para atender às funções previstas no projeto.

2.3. Principais componentes

Tabela 1. Principais componentes de um sistema BESS e suas funções.

Componente	**Função principal**
Módulos/racks de baterias	Armazenar energia por meio de processos eletroquímicos.
BMS	Monitorar e gerenciar tensão, corrente, temperatura e estado de carga das baterias.
PCS/inversor	Realizar a conversão entre energia elétrica em corrente contínua e alternada.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Sistema de proteção	Limitar condições anormais e contribuir para a segurança elétrica.
Sistema de controle	Coordenar a operação do BESS conforme a estratégia de uso.
Monitoramento	Registrar grandezas elétricas e operacionais e apoiar diagnóstico e manutenção.
Sistemas auxiliares	Fornecer funções necessárias à operação, incluindo controle térmico quando aplicável.

Fonte: Elaborado pelos autores com base na Matrix energia (2026).

2.4. Tecnologias de baterias

2.4.1. Baterias de íons de lítio

As baterias de íons de lítio apresentam elevada densidade energética, eficiência e capacidade de resposta, características que favoreceram sua expansão em aplicações móveis e estacionárias. Dentro dessa família existem diferentes químicas, cada uma com características próprias. A IEA (2026) informa que as baterias de fosfato de ferro-lítio (LFP) representaram cerca de 90% das novas implantações de armazenamento por baterias em 2025, destacando seu custo e adequação a ciclos frequentes.

Apesar das vantagens, as baterias de lítio exigem sistemas de gerenciamento e controle térmico adequados. Também existem desafios relacionados à disponibilidade e processamento de matérias-primas, segurança e destinação ao final da vida útil.

2.4.2. Baterias de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido são uma tecnologia consolidada, com ampla disponibilidade e processos de reciclagem estabelecidos. Sua menor densidade energética e características de vida útil podem limitar aplicações que demandem elevada densidade de armazenamento ou ciclos intensivos. Ainda assim, podem ser utilizadas em determinadas aplicações de backup e sistemas de menor escala.

2.4.3. Baterias de fluxo

Baterias de fluxo armazenam energia em eletrólitos líquidos e apresentam características que podem favorecer aplicações estacionárias de maior duração. A potência e a energia podem ser dimensionadas com maior independência do que em algumas arquiteturas convencionais, embora o sistema envolva equipamentos auxiliares e maior complexidade de instalação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.4.4. Outras tecnologias

Também são estudadas tecnologias como sódio-enxofre, sódio-íon e baterias de estado sólido. A escolha tecnológica deve considerar duração do armazenamento, potência requerida, número de ciclos, eficiência, segurança, custo, disponibilidade de materiais e condições de operação. Assim, não existe uma única tecnologia adequada para todas as aplicações.

2.5. Aplicações dos BESS

Os BESS podem ser utilizados em diferentes pontos do sistema elétrico. Em instalações residenciais e comerciais, podem armazenar energia de sistemas fotovoltaicos e deslocar seu uso para horários de maior demanda. Em aplicações industriais, podem apoiar gerenciamento de demanda e continuidade do fornecimento. Em escala de rede, podem prestar serviços associados à flexibilidade, controle de potência e integração de fontes renováveis.

Tabela 2. Principais aplicações dos sistemas BESS.

Aplicação	Objetivo	Característica relevante
Arbitragem/deslocamento temporal	Armazenar em um período e utilizar em outro	Energia e duração do armazenamento
Integração solar/eólica	Reduzir efeitos da variabilidade temporal	Flexibilidade e resposta rápida
Gerenciamento de demanda	Reduzir demanda em determinados períodos	Potência disponível
Backup	Manter cargas durante interrupções	Confiabilidade e tempo de resposta
Regulação e suporte à rede	Apoiar equilíbrio e controle do sistema	Resposta rápida
Postergação de investimentos	Reduzir necessidade imediata de reforços em situações específicas	Localização e capacidade do sistema

Fonte: Elaborado pelos autores com base na Matrix energia (2026).

2.6. Estabilidade e qualidade da energia

A resposta rápida dos BESS permite que eles atuem em situações em que a diferença entre geração e consumo muda rapidamente. Dependendo do projeto e dos controles empregados, baterias podem contribuir para regulação de frequência, controle de tensão e redução de oscilações. Esses serviços dependem das características do conversor, do ponto de conexão e das regras de operação.

É importante, entretanto, evitar a interpretação de que qualquer BESS automaticamente melhora todos os indicadores elétricos. O resultado depende da estratégia de controle, localização, capacidade de potência, estado de carga e interação com os demais equipamentos da rede.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.7. Aspectos econômicos

A análise econômica de um BESS deve considerar investimento inicial, custos de operação e manutenção, substituição ou degradação dos módulos, eficiência, vida útil, valor da energia deslocada e receitas associadas aos serviços prestados. A simples comparação do preço da bateria por unidade de energia não é suficiente para avaliar a viabilidade do projeto.

A redução de custos observada no mercado de baterias contribuiu para a expansão dos BESS. A IEA informa que, em 2025, os preços médios das baterias caíram e que os sistemas estacionários apresentaram quedas expressivas de preço em relação a 2020. Ainda assim, custos locais, financiamento, conexão à rede e modelo de remuneração influenciam a viabilidade de cada projeto.

2.8. Aspectos ambientais

Os BESS podem contribuir indiretamente para a redução de emissões quando permitem maior integração de fontes renováveis ou reduzem a necessidade de geração mais intensiva em emissões. Entretanto, essa contribuição não elimina os impactos associados à fabricação das baterias, à mineração e processamento de materiais, ao transporte, ao consumo de energia e ao fim de vida.

A avaliação ambiental deve, portanto, considerar o ciclo de vida. A reciclagem e o reaproveitamento de materiais podem reduzir a necessidade de matérias-primas primárias, mas sua efetividade depende da tecnologia, da infraestrutura de coleta e dos processos disponíveis.

2.9. Segurança, degradação e vida útil

A degradação representa uma redução gradual da capacidade e/ou do desempenho da bateria ao longo da operação. Temperatura, profundidade de descarga, corrente, número de ciclos e condições de armazenamento influenciam esse processo. Por essa razão, o dimensionamento e o controle devem considerar não apenas a capacidade nominal inicial, mas o comportamento esperado ao longo da vida do projeto.

A segurança também é um aspecto central. Sistemas baseados em baterias devem incorporar monitoramento, proteção elétrica, gerenciamento térmico quando aplicável, procedimentos de emergência e critérios adequados de instalação. A gestão de riscos deve ser tratada como parte do projeto e não como etapa posterior.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.10. Perspectivas tecnológicas e regulatórias

A expansão internacional do armazenamento por baterias vem sendo acompanhada pelo desenvolvimento de tecnologias, redução de custos e ampliação das aplicações. A IEA (2024) aponta que o armazenamento é relevante para a expansão de fontes renováveis e para a flexibilidade dos sistemas elétricos.

No Brasil, a evolução institucional ganhou um marco importante em 2026. A ANEEL informa que sistemas de armazenamento autônomos por baterias passaram a contar com procedimentos regulatórios específicos por meio da Resolução Normativa nº 1.161/2026 (ANEEL, 2026a). A Agência também estabeleceu procedimentos para sistemas de armazenamento colocalizados a centrais geradoras, por meio da Resolução Normativa nº 1.162/2026 (ANEEL, 2026b). Essas mudanças representam uma evolução do ambiente regulatório e devem ser consideradas em estudos atuais sobre BESS.

3. METODOLOGIA

3.1. Natureza e abordagem da pesquisa

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa bibliográfica, exploratória e qualitativa. A pesquisa bibliográfica foi adotada porque o estudo utiliza informações já publicadas em literatura técnica, artigos, documentos institucionais e materiais especializados. A abordagem exploratória é adequada ao objetivo de organizar conceitos, aplicações, benefícios e limitações dos BESS. A análise qualitativa foi utilizada para interpretar as relações entre características tecnológicas e aplicações no sistema elétrico.

Não foram realizadas medições de campo, ensaios laboratoriais ou simulações próprias. Portanto, os resultados apresentados na seção de resultados e discussão correspondem a uma síntese e interpretação das informações encontradas nas fontes utilizadas.

3.2. Procedimentos metodológicos

O desenvolvimento da pesquisa foi organizado em quatro etapas. Na primeira etapa, foram definidos o problema de pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos. Na segunda, realizou-se o levantamento bibliográfico sobre BESS, tecnologias de baterias, componentes, aplicações, aspectos econômicos, ambientais e regulatórios. Na terceira etapa, o conteúdo foi classificado em eixos temáticos. Na quarta, os achados foram comparados e sintetizados na seção de resultados e discussão.

Tabela 3. Etapas dos procedimentos metodológicos.

Etapa	Procedimento	Produto

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

1	Delimitação do tema e problema	Questão de pesquisa e objetivos
2	Levantamento bibliográfico	Conjunto de fontes e informações
3	Classificação temática	Matriz de comparação
4	Síntese e discussão	Resultados, limitações e conclusões

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3. Fontes e critérios de seleção

Foram consideradas fontes acadêmicas, literatura técnica e documentos institucionais relacionados aos sistemas de armazenamento de energia em baterias. A seleção priorizou materiais com relação direta ao funcionamento, às tecnologias, às aplicações, aos benefícios, às limitações e à regulamentação dos BESS. Foram privilegiados documentos de órgãos oficiais para informações regulatórias e temporalmente sensíveis, bem como relatórios da International Energy Agency (IEA) para contextualização internacional. Como o levantamento foi bibliográfico e exploratório, não foram estabelecidos critérios quantitativos de seleção nem protocolo sistemático de revisão; essa característica é considerada uma limitação metodológica.

3.4. Estratégia de análise

A análise foi realizada por comparação temática. As informações foram organizadas nos seguintes eixos: funcionamento e componentes; tecnologias; aplicações; integração de fontes renováveis; estabilidade e qualidade da energia; economia; ambiente; segurança e regulamentação. Em cada eixo, buscou-se identificar benefícios, limitações e condições necessárias para que o BESS cumpra a função pretendida.

Como não foram utilizados dados experimentais próprios, não foram criados valores numéricos de desempenho ou economia que não estivessem explicitamente disponíveis nas fontes. Dessa forma, as conclusões são interpretativas e não representam uma estimativa de desempenho de um projeto específico.

3.5. Limitações do estudo

A principal limitação é a dependência de dados secundários. As fontes analisadas utilizam diferentes tecnologias, escalas, condições de operação e metodologias, o que dificulta a comparação direta de valores de eficiência, custo ou vida útil. Outra limitação é a rápida evolução tecnológica e regulatória do setor, que pode alterar custos, requisitos e aplicações em períodos relativamente curtos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Além disso, uma revisão bibliográfica não substitui estudos de viabilidade específicos. Projetos reais exigem dados de carga, geração, tarifas, conexão, perfil de operação, custos locais e avaliação de segurança.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Síntese das características dos BESS

A revisão indica que a principal característica dos BESS é a possibilidade de controlar temporalmente a disponibilidade da energia elétrica. Essa capacidade diferencia o armazenamento de tecnologias de geração convencionais: o BESS não cria energia primária, mas permite modificar o momento em que determinada energia é disponibilizada.

A análise também mostra que o desempenho do sistema depende da integração entre bateria, eletrônica de potência, controle e gerenciamento. Assim, a avaliação da tecnologia apenas pela química da bateria é insuficiente para caracterizar o BESS completo.

4.2. Comparação das tecnologias

Tabela 4. Comparação entre as principais tecnologias de baterias.

Tecnologia	Pontos favoráveis	Principais limitações	Aplicações compatíveis
Íons de lítio/LFP	Alta resposta, boa eficiência, modularidade e ampla expansão	Degradação, segurança térmica, matérias-primas e reciclagem	Armazenamento estacionário, integração renovável, aplicações comerciais e de rede
Chumbo-ácido	Tecnologia consolidada, disponibilidade e reciclagem estabelecida	Menor densidade e vida útil em determinadas aplicações	Backup e sistemas de menor escala
Fluxo redox	Boa adequação a armazenamento estacionário e longa duração em determinadas configurações	Maior complexidade e equipamentos auxiliares	Aplicações estacionárias de maior duração
Estado sólido	Potencial de maior segurança e densidade energética	Tecnologia ainda em desenvolvimento	Perspectivas futuras

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Sódio-enxofre/sódio-íon	Alternativas com potencial de diversificação de materiais	Desafios específicos de custo, desempenho e maturidade	Aplicações selecionadas e desenvolvimento tecnológico

Fonte: Elaborado pelos autores com base na Matrix energia (2026).

A comparação mostra que a escolha deve ser orientada pela aplicação. Uma tecnologia com elevada densidade energética pode ser adequada quando espaço é uma restrição, enquanto uma solução com características diferentes pode ser mais interessante para armazenamento estacionário de longa duração. Portanto, a pergunta adequada não é qual bateria é universalmente melhor, mas qual configuração atende aos requisitos técnicos e econômicos do projeto.

4.3. Aplicações no sistema elétrico

As aplicações identificadas podem ser agrupadas em quatro grandes funções: deslocamento temporal de energia, suporte à potência, serviços de rede e fornecimento de reserva. O deslocamento temporal permite armazenar excedentes e utilizar energia posteriormente. O suporte à potência está relacionado à capacidade de responder a demandas elevadas. Os serviços de rede incluem funções de controle e estabilidade, enquanto a reserva busca garantir continuidade ou capacidade adicional em situações específicas.

Essa diversidade amplia o potencial de utilização dos BESS, mas também torna o dimensionamento mais complexo. Um sistema projetado para energia durante várias horas possui requisitos diferentes de um sistema destinado a respostas rápidas de potência.

4.4. Integração de fontes renováveis

A integração com geração solar e eólica é uma das aplicações mais relevantes. A produção dessas fontes varia ao longo do tempo e nem sempre coincide com o perfil de consumo. O armazenamento pode absorver parte do excedente e devolver energia posteriormente, reduzindo a diferença temporal entre geração e demanda.

A IEA aponta que o aumento do armazenamento é necessário para acompanhar a expansão das fontes renováveis. Em 2025, cerca de 80% das novas capacidades de armazenamento por baterias foram instaladas em escala de rede, e a duração dos projetos vem aumentando gradualmente. Esses dados reforçam a tendência de utilização dos BESS como elemento de flexibilidade do sistema elétrico.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.5. Qualidade, estabilidade e confiabilidade

Os resultados da revisão indicam que a resposta rápida dos BESS pode ser útil para serviços de frequência, tensão e compensação de variações. Entretanto, a contribuição efetiva depende do ponto de conexão e dos controles. A mesma tecnologia pode produzir resultados diferentes quando instalada em locais distintos da rede.

Para aplicações de backup, a confiabilidade depende da capacidade disponível, do estado de carga, da arquitetura de proteção e da estratégia de transferência para a fonte armazenada. Portanto, a presença de uma bateria não garante, isoladamente, determinado nível de continuidade; o sistema completo deve ser dimensionado e testado para o cenário de interrupção considerado.

4.6. Aspectos econômicos

A análise econômica deve considerar o conjunto de custos e benefícios durante a vida do projeto. Entre os custos estão aquisição, instalação, conexão, operação, manutenção, sistemas auxiliares e eventual reposição. Entre os benefícios podem estar redução de demanda, deslocamento de energia, aumento do autoconsumo, serviços de rede e postergação de investimentos.

A queda dos custos das baterias amplia a viabilidade potencial dos projetos, mas não elimina a necessidade de análise econômica específica. Tarifas, regras de remuneração e condições de mercado são determinantes. No caso brasileiro, a evolução regulatória de 2026 cria um novo ambiente para sistemas de armazenamento de maior porte, mas os modelos econômicos concretos dependem das regras aplicáveis a cada modalidade.

4.7. Aspectos ambientais

Os benefícios ambientais dos BESS dependem de como o sistema é utilizado. Quando o armazenamento aumenta o aproveitamento de geração renovável e reduz a necessidade de geração mais intensiva em emissões, pode haver benefício sistêmico. Entretanto, a fabricação das baterias envolve materiais, energia e processos industriais.

Assim, a análise ambiental deve considerar todo o ciclo de vida. O aumento da implantação também amplia a necessidade de políticas de reutilização, segunda vida e reciclagem. A sustentabilidade do armazenamento depende tanto do uso durante a operação quanto da gestão dos materiais após a retirada do sistema.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.8. Desafios e limitações

Tabela 5. Principais desafios dos sistemas BESS e possíveis respostas.

Desafio	Efeito sobre o projeto	Resposta possível
Degradação	Redução gradual de capacidade/desempenho	Dimensionamento adequado e controle de operação
Custo inicial	Pode aumentar o investimento do projeto	Avaliação do ciclo de vida econômico
Segurança	Risco operacional se houver falhas de controle/proteção	BMS, proteção, monitoramento e procedimentos
Reciclagem	Necessidade de destinação adequada	Infraestrutura de coleta e recuperação de materiais
Conexão à rede	Pode exigir estudos e adequações	Planejamento elétrico e atendimento aos requisitos
Regulação	Pode afetar modelo de negócio e remuneração	Acompanhamento das normas vigentes
Variabilidade tecnológica	Tecnologias evoluem rapidamente	Avaliação periódica das alternativas

Fonte: Elaborado pelos autores com base na Matrix energia (2026).

4.9. Cenário brasileiro e evolução regulatória

A análise do cenário brasileiro mostra uma transição importante entre uma fase de estudos e projetos-piloto e uma etapa de maior institucionalização. A ANEEL informa que a Resolução Normativa nº 1.161/2026 regulamenta serviços associados a sistemas de armazenamento de energia elétrica autônomos por baterias (ANEEL, 2026a). A Agência também regulamentou procedimentos para sistemas colocalizados a centrais geradoras pela Resolução Normativa nº 1.162/2026 (ANEEL, 2026b).

Além da regulamentação, 2026 marca o avanço de mecanismos de contratação de armazenamento de grande porte. A ANEEL divulgou consultas públicas para os primeiros leilões destinados à contratação de sistemas de armazenamento em baterias de grande porte, com previsão de suprimento a partir de 2028. Esse movimento indica que o armazenamento está sendo considerado não apenas como equipamento complementar, mas como recurso capaz de prestar serviços ao sistema elétrico.

Como a regulamentação está em evolução, estudos acadêmicos sobre o tema devem registrar a data de consulta das normas e evitar apresentar regras temporárias como permanentes.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4.10. Discussão integrada

A síntese dos resultados permite estabelecer uma relação entre características técnicas e aplicações. BESS com alta capacidade de resposta são adequados a funções que exigem atuação rápida, enquanto aplicações de deslocamento temporal exigem capacidade energética e duração compatíveis com o período de utilização.

Também se observa que benefícios técnicos, econômicos e ambientais não são independentes. Um projeto pode aumentar o aproveitamento de uma fonte renovável, mas apresentar custos elevados; pode prestar serviços à rede, mas exigir ciclos que acelerem a degradação; ou pode reduzir a necessidade de determinada infraestrutura, mas exigir adequações no ponto de conexão.

Por isso, a avaliação dos BESS deve ser multidimensional. A escolha tecnológica deve partir da necessidade do sistema e, posteriormente, considerar potência, energia, duração, eficiência, segurança, vida útil, custo, impactos ambientais e regras de operação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar o funcionamento, as tecnologias, as aplicações, os benefícios e os desafios dos Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias. A revisão realizada permite concluir que os BESS representam uma tecnologia multifuncional, cuja principal contribuição está na possibilidade de controlar temporalmente a disponibilidade da energia e fornecer flexibilidade ao sistema elétrico.

Em relação ao funcionamento, verificou-se que um BESS é formado por um conjunto integrado de baterias, eletrônica de potência, sistemas de gerenciamento, proteção, controle e monitoramento. O desempenho e a segurança do sistema dependem da atuação coordenada desses componentes.

Quanto às tecnologias, as baterias de íons de lítio, especialmente configurações LFP, apresentam forte presença no mercado de armazenamento. Entretanto, tecnologias como chumbo-ácido, baterias de fluxo e alternativas emergentes continuam relevantes em aplicações específicas. A análise mostrou que não existe uma tecnologia universalmente adequada; a seleção deve considerar os requisitos de potência, energia, duração, ciclos, custo, segurança e condições de instalação.

No campo das aplicações, os BESS podem apoiar a integração de fontes renováveis, gerenciamento de demanda, continuidade do fornecimento e serviços de suporte à rede. A resposta rápida das baterias amplia sua utilidade em funções que exigem flexibilidade

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

operacional. Ainda assim, os resultados dependem do projeto, da localização e da estratégia de controle.

Os aspectos econômicos e ambientais demonstram que a análise não pode se limitar ao custo inicial da bateria. Devem ser considerados a vida útil, degradação, manutenção, reposição, eficiência, benefícios operacionais e destinação dos equipamentos. Do ponto de vista ambiental, os possíveis benefícios associados à integração de renováveis precisam ser avaliados juntamente com os impactos da fabricação, uso de matérias-primas e fim de vida.

No contexto brasileiro, a evolução regulatória de 2026 representa uma etapa relevante para a inserção dos sistemas de armazenamento. A existência de procedimentos específicos para sistemas autônomos e colocalizados demonstra avanço institucional, embora o ambiente regulatório continue sujeito a aperfeiçoamentos.

A hipótese proposta foi considerada compatível com os resultados da revisão: os BESS podem favorecer maior flexibilidade e melhor gerenciamento da energia, mas seus benefícios não são automáticos e dependem das condições técnicas, econômicas, ambientais e regulatórias de cada aplicação.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se o desenvolvimento de estudos de caso com dados reais de carga e geração, simulações de fluxo de potência e estudos de dimensionamento, além de análises tecnoeconômicas e de ciclo de vida. Também são recomendáveis estudos específicos sobre segurança, reciclagem, segunda vida das baterias e impactos da evolução regulatória brasileira.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica Autônomos – Baterias. Brasília, 2026a. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/manuais-modelos-e-instrucoes/armazeamento-de-energia/sae-autonomos-bateria. Acesso em: 28 set. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica colocalizado a centrais geradoras. Brasília, 2026b. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/manuais-modelos-e-instrucoes/armazeamento-de-energia/sae-colocalizado-a-centrais-geradoras. Acesso em: 28 set. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Batteries and Secure Energy Transitions. Paris: IEA, 2024. Disponível em: https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions. Acesso em: 28 set. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Global Energy Review 2026: Technology – Battery storage. Paris: IEA, 2026. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026/technology-battery-storage. Acesso em: 28 set. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.