

Inserção de sistemas de armazenamento de energia nos sistemas elétricos do Brasil

Audiência Pública | Comissão de Minas e Energia (CME)

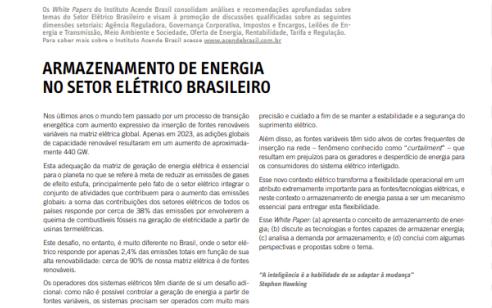
2 de julho de 2025

O Instituto Acende Brasil é um *Think Tank* (centro de estudos) voltado ao desenvolvimento de ações e projetos para aumentar o grau de Transparência e Sustentabilidade do Setor Elétrico Brasileiro. Baseados em números e fatos, pensamos e analisamos o setor com a lente de longo prazo, buscando oferecer à sociedade um olhar que identifique os principais vetores e pressões econômicas, políticas e institucionais que moldam o Setor Elétrico Brasileiro.

Nossas análises e recomendações são publicadas de diferente formas, como inserções em revistas acadêmicas nacionais e internacionais, artigos na imprensa geral, White Papers (WP) etc.

O tema Armazenamento foi objeto do WP# 31, recém publicado, contendo:

- A descrição, o grau de maturidade e o custo das tecnologias de armazenamento disponíveis (globalmente)
- A análise da demanda e as consequências da falta de armazenamento
- As perspectivas e propostas (considerando um plano de inserção e aspectos regulatórios).
- <https://acendebrasil.com.br/estudo/white-paper-31-armazenamento-de-energia-no-setor-eletrico-brasileiro?>



SUMÁRIO	
1 INTRODUÇÃO	2
1.1 Desafios da geração renovável sobre a carga	2
2 TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	5
2.1 Baterias de lítio	6
2.2 Baterias de íons de lítio	10
2.3 Velocidade de recarga (Powerwall)	12
2.4 Baterias de íons de ferro-fosfato	14
2.5 Armazenamento de calor térmico	14
2.7 Armazenamento de calor sensible	18
2.8 Armazenamento de energia magnética em supercondutores (SMES)	19
3 MATURIDADE E CUSTO DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO	21
3.1 Matriz de custo	21
3.2 Custo	25
4 DEMANDA POR ARMAZENAMENTO	25
4.1 Integridade de fontes renováveis	25
4.2 Segurança e confiabilidade do sistema elétrico	26
4.3 Sistema solar	27
4.4 Desenvolvimento da geração de energia	29
4.5 Eficiência energética	29
4.6 Mercado de veículos elétricos	29
5 CONSEQUÊNCIAS DA FALTA DE ARMAZENAMENTO	30
5.1 Impacto na fornecimento de energia (segurança de abastecimento)	30
5.2 Custo de energia	30
5.3 Custo de energia de sistemas	33
5.4 Custo de energia de sistemas	33
6 PERSPECTIVAS E PROPOSTAS	34
6.1 Plano de inserção	34
6.2 Sistema regulatório do armazenamento de energia no Brasil	36
6.3 Incentivos fiscais para impulsar o armazenamento	37
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
8 ACORRÊNOS	39
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

- A **redução das emissões** de gases de efeito estufa (GEEs) na matriz elétrica global tem motivado a mudança no uso de fontes de energia, com a redução de combustíveis fósseis e o **aumento da participação de fontes renováveis**;
- Diferentemente de muitos países, o **Brasil possui uma matriz elétrica diversificada e predominantemente renovável**;
- A maior parte da nossa energia elétrica é gerada por hidrelétricas e o país tem crescido em outras renováveis, como eólica e solar.
 - **Hidrelétrica:** 110GW (**51,44%** da capacidade instalada da matriz elétrica);
 - **Eólica:** ultrapassou 33 GW (**15,86%** da matriz elétrica); e
 - **Solar:** se aproxima de 18 GW (**8,42%**)

(Fonte: Aneel, maio/2025)

IMPORTÂNCIA DO ARMAZENAMENTO

- O aumento da participação das fontes variáveis resulta em maiores **desafios operacionais para o sistema elétrico**;
- A variabilidade na geração das fontes renováveis e a incerteza do regime de chuvas aumentam a **importância de fontes de flexibilidade para o sistema**;
- O aumento de fontes variáveis sem um sistema robusto de armazenamento pode levar a **fallhas e instabilidades na rede elétrica**, especialmente em períodos de seca ou baixa produção eólica e solar;
- Cenários de sobreoferta de energia somados a limitações da rede podem resultar em cortes de geração (**curtailment**);
- Tecnologias de armazenamento possibilitam **compensar os efeitos da intermitência** no sistema elétrico, permitindo uma alta participação de fontes renováveis no sistema elétrico.

As soluções de armazenamento são importantes para:

- **integração** de fontes renováveis;
- **segurança e confiabilidade** do sistema elétrico; e
- atendimento aos **sistemas isolados**.

Além disso, estas tecnologias podem:

- suportar a descentralização da geração de energia;
- aumentar a **eficiência energética**; e
- acelerar a eletrificação de setores como o de transporte por meio de veículos elétricos.

- Aplicações de sistemas de armazenamento podem suprir a necessidade de **armazenar energia excedente** durante períodos de excesso de geração **para utilizá-la em períodos de baixa geração**, reduzindo o desperdício de parte da energia natural disponível.
- Armazenamento pode ser aplicado como reserva estratégica para garantir a confiabilidade do sistema em caso de falhas ou picos de demanda, pois sua flexibilidade operativa permite **compensar potenciais desequilíbrios de curto prazo entre oferta e demanda**, mantendo a segurança no suprimento de energia.
- Tecnologias com resposta rápida (como Usinas Hidrelétricas Reversíveis, baterias e ar comprimido) permitem o atendimento célere e flexível, **fornecendo tanto carga quanto energia (potência) para o sistema**.

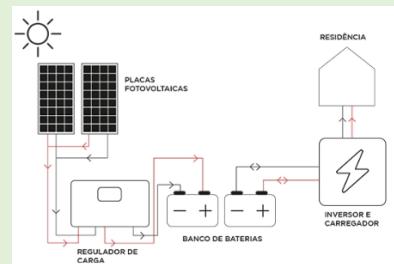
Existem diferentes tecnologias de armazenamento disponíveis no mundo. Tais soluções apresentam diversos estágios de desenvolvimento, variando desde condições incipientes de pesquisa e desenvolvimento até a maturidade comercial.



- As **soluções** tendem a evoluir sua maturidade tecnológica, elevando a sua capacidade de armazenamento de energia e operacionalidade, com ganhos de competitividade nos custos de fabricação e operação e aumento da confiabilidade.
- Em um panorama global, **baterias assumirão o protagonismo** desta modalidade energética.
- As **hidrelétricas reversíveis manterão sua relevância**.
- Já as outras fontes de armazenamento - como armazenamento de energia a ar comprimido, volante de inércia e armazenamento térmico - seguem com **desafios para sua aplicação**.
- Atualmente, no Brasil, as iniciativas envolvem projetos de pesquisa conduzidos por concessionárias, institutos de pesquisa e academia. A **implementação destas tecnologias em grande escala requer amplo esforço em P&D, além de ações políticas e regulatórias para desenvolver o mercado**.



As **hidrelétricas reversíveis**, solução internacionalmente **mais madura** e competitiva, apesar de apresentar custos menores, **não tem sido explorada no Brasil**. Eventual retomada da expansão desta solução implicaria a necessidade de atualização do mapeamento dos locais com potenciais hidráulicos adequados.



As **baterias**, apesar da redução dos custos, ainda são relativamente caras e não estão amplamente disponíveis no mercado brasileiro. Apesar do desafio dos custos, as baterias são uma boa alternativa para várias aplicações devido à sua portabilidade, escalabilidade e velocidade de atuação.

A Aneel vem discutindo a regulação sobre o tema com o objetivo de promover a integração das tecnologias de armazenamento ao sistema elétrico

Apesar dos avanços, o país enfrenta desafios significativos como a **falta de infraestrutura adequada** e a necessidade de **investimentos substanciais**

A **regulamentação e as políticas públicas** para incentivar o desenvolvimento e a implementação dessas tecnologias ainda são **incipientes**

- I. Para superar os desafios e expandir o uso destas soluções no setor elétrico é essencial que o Brasil **invista** em tecnologias de armazenamento de energia
- II. É necessário **avançar na implementação de uma regulamentação** clara e na promoção de incentivos para atrair investimentos privados e fomentar a pesquisa e desenvolvimento no setor
- III. A **cooperação entre o governo, a iniciativa privada** e as instituições de pesquisa pode ajudar a criar um ambiente propício ao avanço tecnológico

- As soluções de armazenamento de energia são essenciais para a segurança de um setor elétrico com alta participação de renováveis. Com o desenvolvimento das tecnologias disponíveis e a redução dos custos, **o armazenamento de energia terá um papel cada vez mais importante** na matriz energética global;
- Tecnologias de armazenamento **permitem a integração e o melhor gerenciamento entre a oferta e a demanda** de energia, contribuindo para uma **maior eficiência operativa** dos sistemas elétricos, maior **confiabilidade, segurança e qualidade** no fornecimento da energia;
- As soluções de armazenamento podem ser utilizadas para **aliviar as redes de transmissão e de distribuição** ou em **sistemas isolados**, tornando-os mais eficientes e beneficiando o consumidor;
- Além disso, são componentes importantes para a **modernização e descarbonização** do setor elétrico.



31
WHITE PAPER
INSTITUTO ACENDE BRASIL
EDIÇÃO N° 31 / NOVEMBRO DE 2024

Os White Papers do Instituto Acende Brasil consolidam análises e recomendações aprofundadas sobre temas do Setor Elétrico Brasileiro e visam à promoção de discussões qualificadas sobre as seguintes dimensões setoriais: Agência Reguladora, Governança Corporativa, Impostos e Encargos, Leilões de Energia e Transmissão, Meio Ambiente e Sociedade, Oferta de Energia, Rentabilidade, Tarifa e Regulação. Para saber mais sobre o Instituto Acende Brasil acesse www.acendebrazil.com.br

ARMazenamento de energia no setor elétrico brasileiro

Nos últimos anos o mundo tem passado por um processo de transição energética com aumento expressivo da inserção de fontes renováveis variáveis na matriz elétrica global. Apenas em 2023, as adições globais de capacidade renovável resultaram em um aumento de aproximadamente 440 GW. Além disso, as fontes variáveis têm sido alvos de cortes frequentes de inserção na rede – fenômeno conhecido como “curtailment” – que resultam em prejuízo para os geradores e desperdício de energia para os consumidores do sistema elétrico interligado. Esta adequação da matriz de geração de energia elétrica é essencial para o planeta no que se refere à meta de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, principalmente pelo fato do setor elétrico integrar o conjunto de atividades que contribuem para o aumento das emissões globais: a soma das contribuições dos setores elétricos de todos os países responde por cerca de 38% das emissões por envolverem a queima de combustíveis fósseis na geração de eletricidade a partir de usinas termelétricas. Esse novo contexto elétrico transforma a flexibilidade operacional em um atributo extremamente importante para as fontes/tecnologias elétricas, e neste contexto o armazenamento de energia passa a ser um mecanismo essencial para entregar esta flexibilidade. Esse White Paper: (a) apresenta o conceito de armazenamento de energia; (b) discute as tecnologias e fontes capazes de armazenar energia; (c) analisa a demanda por armazenamento; e (d) conclui com algumas perspectivas e propostas sobre o tema.

“A inteligência é a habilidade de se adaptar à mudança”
Stephen Hawking

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	2
1.1 Efeitos da geração renovável sobre a carga	2
2 TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	5
2.1 Bombear água (Usinas Hidrelétricas Reversíveis UHR)	6
2.2 Ar comprimido	9
2.3 Volantes de Inércia (Flywheels)	10
2.4 Baterias	12
2.5 Hidrogênio (Celulas Combustíveis)	14
2.6 Armazenamento de calor latente	17
2.7 Armazenamento de calor sensível	18
2.8 Armazenamento de energia magnética em supercondutores (SMES)	19
3 MATURIDADE E CUSTO DAS TECNOLOGIAS DE ARMAZENAMENTO	21
3.1 Maturidade	21
3.2 Custo	23
4 DEMANDA POR ARMAZENAMENTO	25
4.1 Integração de fontes renováveis	25
4.2 Segurança e confiabilidade do sistema elétrico	26
4.3 Sistema isolados	27
4.4 Descentralização da geração de energia	27
4.5 Eficiência energética	29
4.6 Mercado de veículos elétricos	29
5 CONSEQUÊNCIAS DA FALTA DE ARMAZENAMENTO	30
5.1 Interrupções no fornecimento de energia (segurança de oferta)	30
5.2 Curtailment	30
5.3 Custos de energia mais altos	33
5.4 Atrasos na transição energética	33
6 PERSPECTIVAS E PROPOSTAS	34
6.1 Plano de inserção	34
6.2 Status regulatório do armazenamento de energia no Brasil	36
6.3 Políticas de estado para impulsionar o armazenamento	37
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
8 ACRÔNIMOS	39
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

O Instituto Acende Brasil é um Centro de Estudos que visa a aumentar o grau de **Transparência e Sustentabilidade do Setor Elétrico Brasileiro**. Para atingir este objetivo, adotamos a abordagem de **Observatório do Setor Elétrico** e estudamos as seguintes dimensões:

Para saber mais acesse:
www.acendebrasil.com.br

