

O papel dos sistemas de armazenamento na transição energética¹

Nivalde de Castro²

Igor Barreto Julião³

As mudanças climáticas suscitadas por ações antrópicas já causaram danos e perdas, em parte, irreversíveis aos ecossistemas, pois estes foram impactados além de sua capacidade de adaptação. Caso não sejam mitigados os impactos e reestruturados os sistemas produtivos, com foco na descarbonização, há consenso de que esse quadro tende a se agravar. Deste modo, são exigidas ações de rápida redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), considerando que a janela de oportunidade para garantir o cumprimento das metas estabelecidas em acordos internacionais é cada vez mais estreita.

Nesse contexto, e agravado pela crescente demanda energética propulsionada pelo crescimento populacional, industrialização e eletrificação do consumo, a transição energética tem se tornado mais necessária e estratégica. De maneira geral, o processo de transição energética consiste na substituição progressiva de fontes fósseis por alternativas renováveis, com o objetivo de reduzir as emissões dos GEE e, só assim, combater as mudanças climáticas. Entretanto, esse processo demanda transformações estruturais em toda a cadeia energética e econômica, desde a forma de gerar e distribuir energia até os padrões das cadeias produtivas e de consumo *lato sensu*.

Como ilustrado na Figura 1, a oferta global de eletricidade renovável vem crescendo constantemente, a fim de atender o crescimento de demanda e, em paralelo, reduzir as emissões de GEE. Todavia, a adoção em larga escala dessas novas tecnologias, notadamente das energias eólica e solar, está acompanhada de ingentes desafios, além das questões relacionadas às novas infraestruturas.

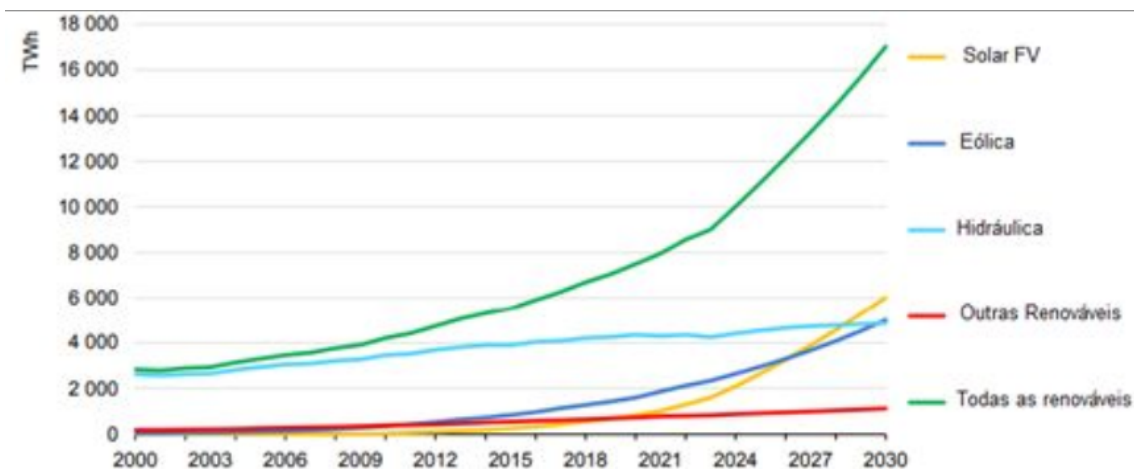
¹ Artigo publicado no Broadcast Energia. Disponível em: <https://energia.aebroadcast.com.br/tabs/news/747/53186394>. Acesso em: 13 de ago. 2025.

² Professor do Instituto de Economia da UFRJ e Coordenador-Geral do Grupo de Estudos do Setor Elétrico (GESEL-UFRJ).

³ Pesquisador Associado do GESEL-UFRJ.

Figura 1: Geração global de eletricidade por tipo: 2000-2030.

(em TWh)



Fonte: IEA (2024).

Em escala mundial, as principais fontes de energia que cresceram nos últimos anos foram as energias solar fotovoltaica e eólica, que detêm como uma das suas principais características a intermitência na geração. Dessa maneira, essas fontes de energia apresentam problemas de "despachabilidade", uma vez que sua potência não pode ser controlada e modulada para atender às necessidades da demanda de energia elétrica, que é, de fato, a variável independente do modelo.

Assim, no cenário exposto da transição energética, no qual o sistema elétrico avança cada vez mais em investimentos com base nessas tecnologias, em especial na fonte solar fotovoltaica por conta dos custos supercompetitivos, questiona-se como solucionar os desafios relacionados à sua intermitência.

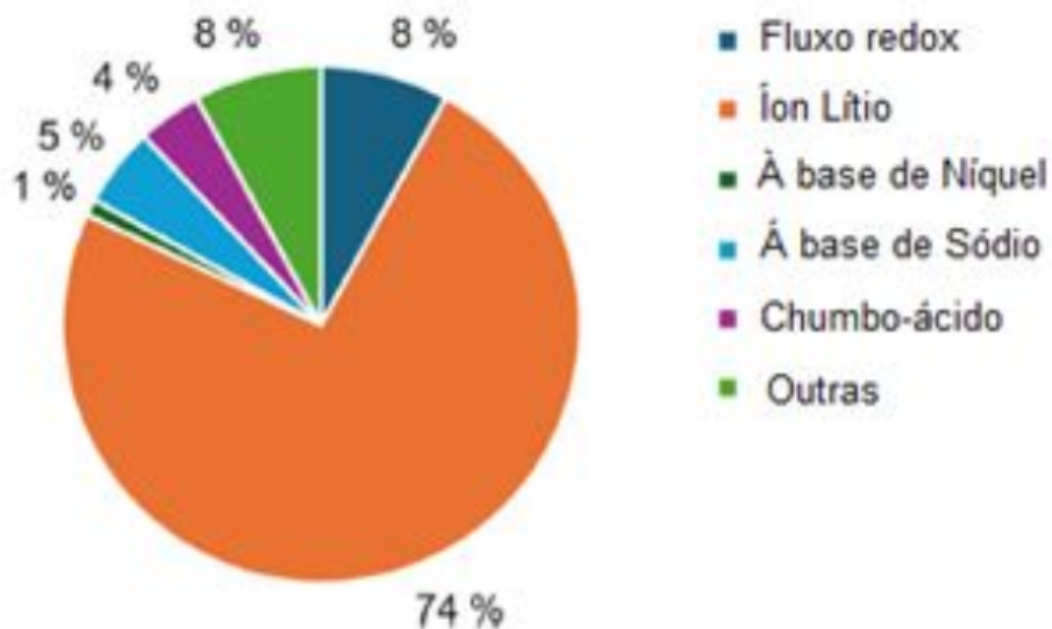
A solução crescente que muitos países vêm adotando é a utilização dos sistemas de armazenamento de energia. Como o nome sugere, esses sistemas são diferentes tecnologias que utilizam mecanismos eletroquímicos, mecânicos, térmicos, entre outros, para armazenar energia. Atualmente, o principal representante dos sistemas de armazenamento são os sistemas eletroquímicos, utilizando baterias.

Os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (no inglês, Battery Energy Storage System, ou BESS) armazenam energia elétrica sob a forma de energia química para posteriormente reconverter-la em eletricidade quando necessário. Os BESS são modulares, uma vez que são formados por células eletroquímicas individuais, interconectadas em módulos e packs, que possibilitam atender aos requisitos específicos de tensão e capacidade do sistema elétrico. Ademais, os sistemas de baterias melhoram a eficiência, a resiliência e a sustentabilidade do sistema elétrico, oferecendo controle rápido de potência ativa e reativa em grandes quantidades e sem restrições geográficas.

Como ilustra a Figura 2, diferentes tecnologias de baterias podem ser aplicadas para esse fim, entretanto grande parte do mercado é dominado pela tecnologia de íon-lítio devido à sua alta densidade de energia, eficiência, escalabilidade, flexibilidade operacional e, obviamente, custos decrescentes por conta da escalabilidade industrial, comandada pela dinâmica economia chinesa. Apesar de amplamente adotada, essa tecnologia apresenta desafios relativos à operação em altas temperaturas, inclusive com riscos de incêndio, o que demanda um sistema de controle contra superaquecimento. Outras tecnologias também merecem destaque, como as baterias de chumbo-ácido, de íon-sódio e de fluxo redox.

Figura 2: Participação global de BESS conectadas ao grid: 2022.

(em %)



Fonte: Adaptado de Sihvonen, Grönman e Honkapuro (2025).

As baterias de chumbo-ácido, por exemplo, são as tecnologias mais maduras dentre as demais, possuem uma eficiência moderada, utilizam eletrólitos corrosivos e apresentam um impacto ambiental considerável devido à sua composição. Todavia, permanecem viáveis em contextos em que o custo é um fator crítico e o espaço não é uma limitação.

Em contrapartida, as baterias de íon-sódio são uma alternativa promissora ao lítio devido à grande abundância e baixo custo do sódio, sendo consideradas ainda opções mais sustentáveis. Contudo, enfrentam desafios significativos em relação à densidade de energia e à estabilidade dos eletrólitos, estando ainda em estágio de desenvolvimento.

Por fim, além dessas baterias convencionais, as baterias de fluxo redox também vêm ganhando espaço. Diferentemente das tecnologias citadas anteriormente, esse tipo de conversor eletroquímico apresenta um esquema de armazenamento externo, com a separação física dos eletrólitos (em dois tanques) e da célula eletroquímica. Essa configuração confere uma grande modularidade e escalabilidade à bateria. Essa tecnologia ainda é relativamente recente, mas já apresenta grandes perspectivas de crescimento nos próximos anos, em especial pelos investimentos que a China está realizando através da construção de cadeia produtiva, no duplo movimento de atender demanda interna para firmar a segurança e flexibilidade do crescimento das fontes renováveis não despacháveis, bem como para exportação.

De maneira similar às baterias convencionais, as baterias de fluxo redox possuem diferentes composições, porém o tipo com maior grau de maturidade são as baterias de fluxo redox de vanádio (VRFBs). As VRFBs são estáveis, não-inflamáveis, com operação otimizada em temperaturas na faixa de 20-35°C, porém apresentam densidade energética inferior às baterias de íon-lítio.

Além das tecnologias de armazenamento eletroquímico, outros sistemas são importantes e interessantes. Nesta direção, merece destaque especial os sistemas de armazenamento de energia mecânica das Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHRs), também denominados de Sistema de Armazenamento Hidrelétrico por Bombeamento. Esses sistemas convertem a energia elétrica excedente em energia potencial gravitacional ao bombear água de um reservatório inferior para um superior e, quando necessário, a água é liberada acionando as turbinas e gerando energia como em usinas hidrelétricas convencionais. Nesse tipo de armazenamento, o Brasil detém um potencial de crescimento muito grande e promissor, já que a base do sistema elétrico brasileiro é de usinas hidrelétricas, condição essencial para esta tecnologia, que são interligadas a um dos maiores sistemas de rede de transmissão mundial.

As tecnologias de armazenamento aqui apresentadas são maduras e já possuem diversas aplicações reais no mundo, com foco na estabilização da rede, nos serviços ancilares, como regulação de frequência, reserva giratória e suporte de tensão, e na gestão hídrica. Suas principais vantagens estão associadas à integração de fontes intermitentes no sistema elétrico, permitindo o aproveitamento de excedentes elétricos para o bombeamento e armazenamento, à alta eficiência e à resposta rápida, de modo a conferir maior despachabilidade ao sistema, e a baixos custos de operação, apesar dos altos CAPEX e tempo de construção.

Contudo, mesmo já existindo diferentes sistemas passíveis de aplicação, como o armazenamento térmico com as baterias termoquímicas, os sistemas de sal fundido e o armazenamento subterrâneo de calor, a depender de características locais, é necessário destacar os chamados Sistemas Híbridos de Armazenamento de Energia. Esses sistemas são soluções que combinam diferentes tipos de dispositivos de armazenamento de energia, permitindo atender a requisitos de projeto que uma tecnologia isolada não conseguiria,

como a otimização de parâmetros técnico-econômicos (massa, potência, energia armazenada e custo), a melhoria da eficiência e vida útil dos componentes.

Dentre as possíveis combinações, duas tecnologias ganham proeminência: os supercapacitores e os volantes de inércia (*flywheel*). Ambas as tecnologias são mais adequadas para aplicações que exigem picos de potência, suavização de flutuações e recuperação de energia. Esses sistemas conferem respostas de curta duração, atendendo às demandas de potência, enquanto sistemas de baterias atuam no armazenamento de energia de longo prazo. De maneira geral, esses sistemas possibilitam otimizar o desempenho e prolongam a vida útil das baterias, assim como oferecem serviços ancilares relativos à qualidade da energia, porém apresentam altos custos de CAPEX.

Portanto, e a título de conclusão deste pequeno, objetivo e didático artigo, garantir um futuro energético sustentável exige mais do que ampliar a geração renovável, requerendo, cada vez mais, torná-la estável, confiável e despachável. Nesse contexto, os sistemas de armazenamento são o elo vital e a variável de ajuste entre a intermitência das fontes solar e eólica e a segurança do suprimento elétrico. Ao combinar diferentes tecnologias e integrá-las de forma inteligente à rede, é possível transformar o desafio da variabilidade em uma oportunidade para acelerar a descarbonização e fortalecer a resiliência dos sistemas energéticos brasileiro e global.