

O FUTURO DO ARMAZENAMENTO DE ENERGIA: BATERIAS SUSTENTÁVEIS E RENOVÁVEIS

PEDRO HENRIQUE SOUTO PINHO¹, FRANCISCO JOSÉ COSTA ARRAUJO²,

¹ Graduando em Engenharia Elétrica- Eletrotécnica, UPE, Recife-PE, Integrante do grupo de pesquisa Formação De Engenheiro Sustentabilista CNPQ/UPE, Engenheiro Sustentabilista, pedro.pinho@upe.;

² Doutor Engenharia da Produção; Mestre-UFRN Engenheiro Civil-UFPE e Engenheiro Eletricista-UPE, Líder do grupo de Pesquisa Formação De Engenheiro Sustentabilista CNPQ/UPE, Recife-PE, francisco.araujo@upe.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC
09 de outubro de 2025

RESUMO: A transição para uma matriz energética baseada em fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, depende criticamente de soluções de armazenamento de energia. Este trabalho objetiva realizar uma revisão de literatura sobre o futuro do armazenamento em baterias, com foco em tecnologias sustentáveis e renováveis. A metodologia consistiu em uma revisão sistemática de artigos científicos, relatórios de agências internacionais (IEA, IRENA), publicações setoriais e newsletters especializadas. Os resultados mostram que, embora as baterias de íon-lítio sejam dominantes, sua cadeia de suprimentos apresenta desafios socioambientais e geopolíticos significativos. Tecnologias alternativas como baterias de íon-sódio, baterias de fluxo (vanádio, ferro-ar e orgânicas) e baterias de estado sólido são analisadas como soluções promissoras para diferentes aplicações, destacando-se pela abundância de materiais, escalabilidade e segurança aprimorada. Discute-se também os desafios de mercado, incluindo a necessidade de políticas industriais, regulamentações de segurança (norma UL 9540A) e a criação de uma economia circular impulsionada por políticas de responsabilidade estendida do produtor e pelo "Passaporte de Bateria" da União Europeia. Conclui-se que não haverá uma única solução, mas um portfólio de tecnologias de armazenamento será necessário para garantir um futuro energético limpo, ético e circular.

PALAVRAS-CHAVE: Armazenamento de Energia, Baterias Sustentáveis, Íon-Lítio, Economia Circular, Transição Energética.

THE FUTURE OF ENERGY STORAGE: SUSTAINABLE AND RENEWABLE BATTERIES

ABSTRACT: The transition to an energy matrix based on intermittent renewable sources, such as solar and wind, critically depends on energy storage solutions. This paper aims to conduct a literature review on the future of battery storage, focusing on sustainable and renewable technologies. The methodology involved a systematic review of scientific articles, reports from international agencies (IEA, IRENA), industry publications, and specialized newsletters. The results show that while lithium-ion batteries are dominant, their supply chain presents significant socio-environmental and geopolitical challenges. Alternative technologies such as sodium-ion batteries, flow batteries (vanadium, iron-air, and organic), and solid-state batteries are analyzed as promising solutions for different applications, notable for their material abundance, scalability, and enhanced safety. Market challenges are also discussed, including the need for industrial policies, safety regulations (UL 9540A standard), and the creation of a circular economy driven by extended producer responsibility policies and the European Union's "Battery Passport". It is concluded that there will be no single solution, but rather a portfolio of storage technologies will be necessary to ensure a clean, ethical, and circular energy future.

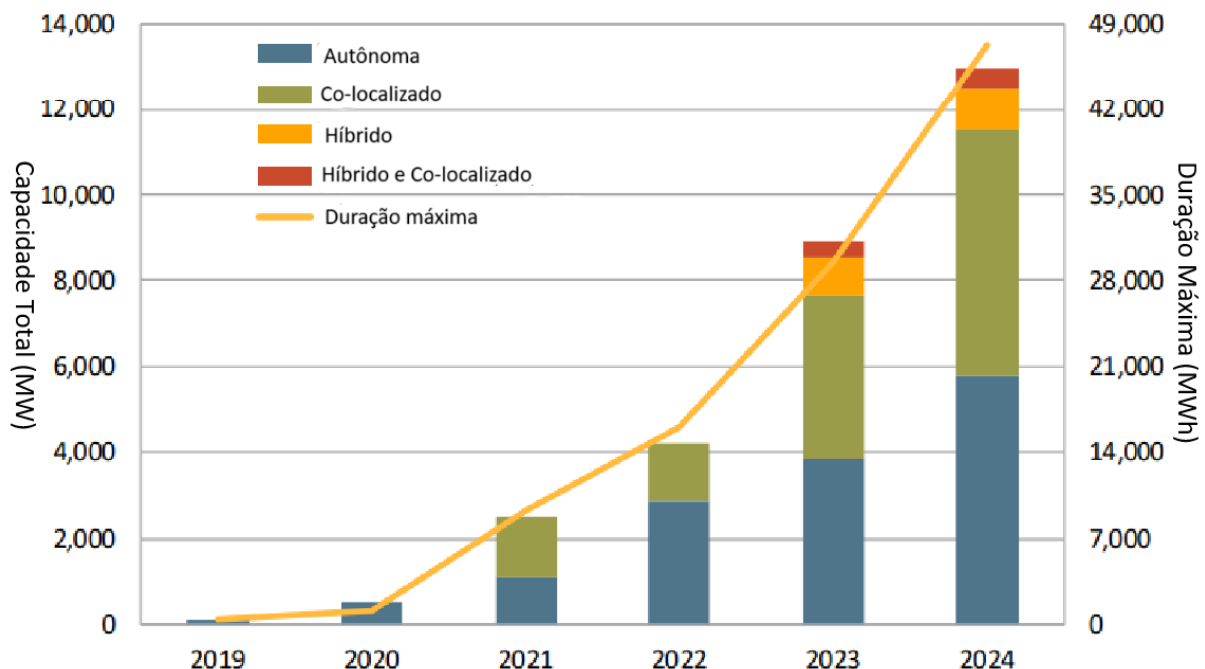
KEYWORDS: Energy Storage, Sustainable Batteries, Lithium-Ion, Circular Economy, Energy Transition.

INTRODUÇÃO

A transição para uma matriz energética global baseada em fontes renováveis, como a solar e a eólica, é uma das mais urgentes necessidades da nossa era, impulsionada pela crise climática e pela busca por segurança energética. Contudo, a intermitência inerente a essas fontes apresenta um desafio fundamental para a estabilidade das redes elétricas. Neste cenário, o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia eficientes, escaláveis e, crucialmente, sustentáveis, emerge não como um complemento, mas como um pilar essencial para o futuro da energia limpa (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2020).

As baterias, em suas diversas formas, são a tecnologia predominante para essa finalidade. A Agência Internacional de Energia (IEA) projeta que a capacidade de armazenamento de energia em baterias precisa expandir 40 vezes entre 2022 e 2030 para alinhar-se com o cenário de emissões líquidas zero (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023a). Um exemplo emblemático dessa transformação já é visível na Califórnia, um dos mercados mais avançados do mundo. Em maio de 2025, o sistema de armazenamento em baterias (BESS) atingiu a marca histórica de fornecer mais de 10 GW de potência à rede, como ilustrado na Figura 1. Este caso prático evidencia a função indispensável do armazenamento na mitigação da variabilidade renovável.

Figura 1 – Despacho de baterias na rede da Califórnia, preenchendo a curva de demanda líquida ("Duck Curve") em 25 de maio de 2025.



No entanto, a hegemonia das baterias de íon-lítio, que impulsionaram a revolução dos eletrônicos portáteis e dos veículos elétricos, começa a ser questionada sob a ótica da sustentabilidade. A extração de seus materiais, a necessidade energética para sua produção e o desafio de sua reciclagem em fim de vida representam barreiras importantes que precisam ser superadas (HARPER et al., 2019).

Considerando a importância do armazenamento de energia para o desenvolvimento socioeconômico e para a transição energética, este trabalho objetiva realizar uma revisão de literatura sobre o horizonte tecnológico das baterias, com foco em alternativas que prometem não apenas eficiência técnica, mas também um ciclo de vida verdadeiramente sustentável.

MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão de literatura sistemática e abrangente. A metodologia não envolveu experimentos de campo ou laboratório, mas sim a coleta, análise e síntese de informações de fontes secundárias publicadas e de alta credibilidade.

A base de dados utilizada para este trabalho foi construída a partir de uma busca extensiva em portais de publicações científicas e acadêmicas, como Google Scholar, Scopus e Web of Science. Foram utilizados descritores em português e inglês, incluindo: "baterias sustentáveis" (*sustainable batteries*), "armazenamento de energia" (*energy storage*), "baterias de íon-sódio" (*sodium-ion batteries*), "baterias de fluxo" (*flow batteries*), "baterias de estado sólido" (*solid-state batteries*) e "reciclagem de baterias" (*battery recycling*).

Adicionalmente, foram consultados relatórios técnicos, projeções de mercado e análises de políticas públicas de agências internacionais e "grupos de reflexão" (*think tanks*) de renome no setor de energia, como a Agência Internacional de Energia (IEA), a Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA), a BloombergNEF (BNEF) e o Rocky Mountain Institute (RMI). Newsletters e publicações especializadas do setor, como *PV Magazine* e *Energy-Storage.news*, também foram utilizadas para obter dados sobre projetos comerciais e avanços tecnológicos recentes.

As informações coletadas foram organizadas, comparadas e sintetizadas para construir uma narrativa coesa sobre o estado da arte das tecnologias de baterias sustentáveis, seus desafios e as soluções de mercado e regulatórias em desenvolvimento ao redor do mundo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

1. A Hegemonia e os Desafios da Sustentabilidade do Íon-Lítio

É inegável o papel transformador das baterias de íon-lítio (Li-ion). Sua alta densidade energética e a queda de custos, que ultrapassou 90% na última década, atingindo uma média de 139 USD/kWh em 2023, permitiram a eletrificação da mobilidade e viabilizaram projetos de armazenamento em larga escala (BESS - *Battery Energy Storage Systems*) (BLOOMBERGNEF, 2023). Contudo, a sustentabilidade de sua cadeia de produção é um ponto de crescente preocupação.

A extração de lítio consome grandes volumes de recursos. Em salmouras, como no "Triângulo do Lítio" (Argentina, Bolívia e Chile), o processo de evaporação solar consome entre 500.000 e 2.000.000 de litros de água por tonelada de lítio produzida, ameaçando ecossistemas frágeis (GIBSON-CORNISH, 2023). A mineração de espodumênio (rocha) na Austrália, por sua vez, é mais intensiva em energia, com uma pegada de carbono que pode chegar a 9 toneladas de CO₂ por tonelada de hidróxido de lítio (YU; KICKLER; LARCHER, 2023).

O cobalto, frequentemente utilizado para estabilizar o cátodo, é ainda mais crítico. Sua mineração está concentrada na República Democrática do Congo (RDC), responsável por mais de 70% da oferta global. Entretanto, as condições de extração não promovem a sustentabilidade. Relatórios da

Anistia Internacional continuam a documentar graves violações de direitos humanos em minas artesanais (AMNESTY INTERNATIONAL, 2016; WILSON, 2022).

Diante disso, a indústria e a academia têm se movimentado em duas frentes principais. A primeira é a redução da dependência de materiais críticos através da inovação na química dos cátodos, como a evolução para cátodos NMC 811 (8 partes de níquel, 1 de manganês, 1 de cobalto) e a adoção dos cátodos LFP (Fosfato de Ferro-Lítio), que eliminam o cobalto e resultam em uma emissão de carbono até 60% menor (XU et al., 2020).

A segunda frente é a criação de uma economia circular através da reciclagem. Processos hidrometalúrgicos alcançam taxas de recuperação acima de 95% para cobalto e níquel (MROZIK; RAJAEI; GORDIEJEW, 2021). A empresa sueca Northvolt, por exemplo, demonstrou a viabilidade de um ciclo fechado ao produzir uma célula com níquel, manganês e cobalto 100% reciclados (NORTHVOLT, 2021).

2. Baterias de Íon-Sódio: A Alternativa Abundante

Uma das mais promissoras alternativas às baterias de íon-lítio são as de íon-sódio (Na-ion), especialmente para armazenamento estacionário. O sódio é mais de 1.000 vezes mais abundante que o lítio na crosta terrestre, o que pode reduzir o custo da matéria-prima da célula em até 30% (PETERS et al., 2019). Embora sua densidade energética seja inferior (140-160 Wh/kg para as primeiras gerações comerciais), a tecnologia oferece vantagens cruciais como excelente performance a -20°C e a possibilidade de ser descarregada a 0 volts sem risco, simplificando o transporte (HWANG; MYUNG; SUN, 2017). A empresa chinesa CATL já iniciou a produção em massa e anunciou uma segunda geração com densidade energética projetada para 200 Wh/kg (REUTERS, 2021; CATL, 2023).

3. Baterias de Fluxo: Escalabilidade e Longa Duração

Para o armazenamento de longa duração (acima de 6 horas), as baterias de fluxo são uma solução superior devido à sua arquitetura única, onde potência e energia são desacopladas. As baterias de fluxo de vanádio são a tecnologia mais madura, com projetos de centenas de MWh em operação, como o de Dalian, na China (400 MWh), e uma vida útil que pode ultrapassar 20.000 ciclos (ROBINSON, 2022; WEBER et al., 2011). A busca por sustentabilidade impulsiona alternativas como a bateria de ferro-ar da Form Energy, que promete um custo de capital inferior a 20 USD/kWh para 100 horas de armazenamento (FORM ENERGY, 2021), e as baterias de fluxo orgânicas, que utilizam moléculas sintetizáveis a partir de subprodutos industriais (JANOSCHKA et al., 2019).

4. O Horizonte das Baterias de Estado Sólido

As baterias de estado sólido (SSBs) representam a próxima fronteira, especialmente para veículos elétricos. A substituição do eletrólito líquido inflamável por um sólido promete um salto em segurança e densidade energética, potencialmente atingindo 400-500 Wh/kg (PLACKE et al., 2021). O eletrólito sólido viabiliza o uso de um ânodo de lítio metálico puro. Empresas como a QuantumScape já demonstraram células protótipo que retêm mais de 95% da capacidade após 1.000 ciclos (QUANTUMSCAPE, 2023). Contudo, desafios como a fabricação em escala e a manutenção de um contato estável entre os componentes ainda precisam ser superados (SCHNELL et al., 2018).

5. Desafios de Mercado e Soluções Inovadoras

A transição tecnológica depende de um ecossistema favorável. Em resposta à concentração da cadeia de suprimentos na Ásia, políticas industriais como a *European Battery Alliance* e a *Inflation Reduction Act* (IRA) nos EUA estão impulsionando a produção local (FREEMAN, 2023). Para garantir a transparência, a União Europeia implementou o Regulamento de Baterias (2023/1542), que exige um "Passaporte de Bateria" digital a partir de 2027 (EUROPEAN COMMISSION, 2023). A segurança é abordada por normas como a UL 9540A, um padrão global para avaliar a resistência à propagação de fogo (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2023). Finalmente, políticas de responsabilidade estendida do produtor estabelecem metas ambiciosas de coleta e reciclagem, impulsionando a economia circular (EUROPEAN COMMISSION, 2023).

CONCLUSÃO

A jornada rumo a um futuro energético 100% renovável depende da nossa capacidade de armazenar energia de forma eficiente, segura e sustentável. A hegemonia do íon-lítio, embora fundamental, revela a necessidade de diversificação tecnológica e de uma profunda reavaliação do ciclo de vida dos materiais. A otimização da cadeia do lítio, o desenvolvimento de tecnologias como íon-sódio e baterias de fluxo para o armazenamento estacionário, e o avanço das baterias de estado sólido para a mobilidade formam um portfólio de soluções. Não haverá uma única tecnologia vencedora, mas a convergência de inovação e políticas proativas pavimentará o caminho para que cada elétron, desde sua geração até seu uso, siga um caminho limpo, ético e circular.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (APREN). O Armazenamento de Energia no Sistema Elétrico Nacional. Lisboa: APREN, 2021.
- BLOOMBERGNEF (BNEF). Global Lithium-Ion Battery Supply Chain Ranking. 2023.
- BLOMGEN, George E. The development and future of lithium ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, v. 164, n. 1, p. A5019-A5025, 2017.
- CIGRE. Brochura Técnica 687: Tecnologias de Armazenamento de Energia em Baterias em Larga Escala. Paris: CIGRE, 2017.
- EUROPEAN COMMISSION. Regulation (EU) 2023/1542 concerning batteries and waste batteries (EU Batteries Regulation). *Official Journal of the European Union*, 2023.
- HWANG, Jang-Yeon; MYUNG, Seung-Taek; SUN, Yang-Kook. Sodium-ion batteries: present and future. *Advanced Functional Materials*, v. 27, n. 25, p. 1606494, 2017.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: IEA, 2021.
- JANOSCHKA, Tobias et al. An aqueous, polymer-based redox-flow battery using non-corrosive, eco-friendly table salt solution. *Nature Communications*, v. 10, n. 1, p. 5040, 2019.
- LARCHER, Dominique; TARASCON, Jean-Marie. Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chemistry*, v. 7, n. 1, p. 19-29, 2015.
- MEGAWHAT. Baterias de íon-sódio: a aposta da China para o armazenamento. MegaWhat, 2023.
- PLACKE, Tobias et al. Lithium ion, lithium metal, and beyond: the challenges of today and tomorrow. *Advanced Energy Materials*, v. 11, n. 43, p. 2101201, 2021.
- REUTERS. China's CATL unveils sodium-ion battery - a challenge to lithium's dominance. Reuters, 29 July 2021.
- ROCKY MOUNTAIN INSTITUTE (RMI). Breakthrough Batteries: Powering the Era of Clean Electrification. Boulder: RMI, 2019.
- WEBER, Adam Z. et al. Redox flow batteries: a review. *Journal of Applied Electrochemistry*, v. 41, n. 10, p. 1137-1164, 2011.
- WOOD, Mackenzie. Grid-Forming Inverters: The Power Electronics Revolutionizing Grid Stability. Greentech Media, 15 March 2023.
- CALIFORNIA ISO. 2024 Special Report on Battery Storage. California ISO, 29 May 2025.