

Baterias sustentáveis no Brasil: perspectivas químicas e ambientais

DOI: 10.5281/zenodo.17012823

Bruna Seguins de Paula ^{a*}

The growing global demand for renewable energy sources and the rapid advancement of electric mobility position rechargeable batteries as a central element in energy sustainability strategies. This article examines, from a chemical and environmental perspective, the main battery types promising for the Brazilian market: lithium-ion, solid-state, and sodium-ion. It analyzes the fundamental electrochemical processes, raw materials involved, environmental impacts related to production and disposal, and strategies for material reuse. The study highlights national opportunities and challenges, considering Brazil's mineral reserves and the need for sustainable technological development.

A crescente demanda mundial por fontes de energia renovável e o avanço acelerado da mobilidade elétrica colocam as baterias recarregáveis no centro das estratégias de sustentabilidade energética. Este artigo analisa, sob uma perspectiva química e ambiental, os principais tipos de baterias promissoras para o mercado brasileiro: íons de lítio, estado sólido e sódio-íon. São discutidos os processos eletroquímicos que determinam seu funcionamento, as matérias-primas envolvidas, os impactos ambientais associados à produção e descarte e as possibilidades de reaproveitamento dos materiais, com destaque para o contexto nacional e suas reservas minerais.

^aUniversidade de Brasília (UnB). Campus Darcy Ribeiro. Instituto de Química (IQ/UnB).

*E-mail: brunaseguins01@gmail.com

Palavras-chave: Baterias; veículos elétricos; reciclagem; recursos minerais.

Recebido em 16 de julho de 2025,

Aprovado em 15 de agosto de 2025,

Publicado em 31 de agosto de 2025.

Introdução

Nas últimas décadas, o avanço tecnológico e as crescentes preocupações ambientais têm impulsionado a busca por fontes de energia mais limpas e eficientes. As baterias recarregáveis, particularmente as de íons de lítio - como as de fosfato de ferro-lítio (LiFePO₄) e as de óxido de níquel-manganês-cobalto (NMC) - tornaram-se o padrão tecnológico dominante, apresentando densidades energéticas entre 250 e 300 Wh/kg. Esses sistemas são amplamente utilizados em veículos elétricos e armazenamento estacionário de energia renovável, representando mais de 90% do mercado atual de acumuladores de energia.^{1,2}

O desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para armazenamento de energia tem se tornado um dos principais focos da pesquisa científica contemporânea. Entre os diversos sistemas disponíveis, as baterias recarregáveis de íons de lítio destacam-se pelo seu amplo uso em aplicações que vão desde dispositivos portáteis até veículos elétricos. Esses dispositivos baseiam-se em reações de oxirredução que envolvem a movimentação de íons lítio entre eletrodos positivos, como LiCoO₂ e negativos, geralmente grafite, apresentando densidades energéticas que variam entre 150 e 300 Wh/kg.²

Apesar de seu sucesso comercial, essas baterias enfrentam desafios significativos. A extração dos materiais necessários para sua fabricação, particularmente, lítio e cobalto, gera impactos ambientais consideráveis.¹ O processo de obtenção do lítio a partir de salmouras, por exemplo, requer grandes quantidades de água - estimativas indicam um consumo de aproximadamente 500.000 litros por tonelada de carbonato de lítio produzido. Além disso, questões relacionadas à segurança, como a formação de estruturas dendríticas que podem causar curtos-circuitos, continuam sendo objeto de intensa investigação.³

Alternativas promissoras vêm sendo desenvolvidas para superar essas limitações. Baterias de estado sólido, que substituem os eletrólitos líquidos por materiais cerâmicos ou poliméricos, apresentam vantagens em termos de segurança e densidade energética potencial. Outra linha de pesquisa importante envolve baterias baseadas em sódio, elemento químico muito mais abundante que o lítio na crosta terrestre. Esses sistemas, embora geralmente apresentem menores densidades energéticas, podem ser particularmente adequados para aplicações estacionárias de grande escala.^{1,4}

O Brasil reúne condições geológicas e industriais que o posicionam de forma estratégica no desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia. As jazidas de lítio localizadas em Minas Gerais apresentam concentrações competitivas no contexto internacional, enquanto o país também concentra praticamente todas as reservas conhecidas de nióbio, elemento de grande importância para a formulação de ligas e materiais aplicados em eletrodos. Além disso, a infraestrutura já existente no setor químico nacional poderia ser adaptada para atender à demanda por insumos e componentes dessas novas tecnologias.^{9,10}

No cenário global, o Brasil figura entre os países de maior relevância pela disponibilidade de lítio. Estima-se que suas reservas comprovadas alcancem cerca de 390 mil toneladas métricas, número que o coloca entre os dez principais detentores do mineral. Pesquisas mais recentes sugerem que o potencial total pode superar 1 milhão de toneladas, sobretudo em áreas em prospecção no Vale do Jequitinhonha, em Minas Gerais. Em termos produtivos, o país registrou em 2023 aproximadamente 4.900 toneladas, o que corresponde a uma média de 13 toneladas por dia. Embora ainda distante dos grandes produtores mundiais, esses números evidenciam um crescimento relevante e reforçam a importância estratégica do Brasil para o mercado de baterias e para a transição energética em escala global.^{13,14,15}

Contudo, diversos obstáculos precisam ser superados para que o país possa aproveitar plenamente essas oportunidades. A cadeia produtiva atual ainda depende fortemente da importação de componentes sofisticados, e a infraestrutura para reciclagem de baterias permanece incipiente. Dados recentes indicam que menos de 5% das baterias descartadas no país são submetidas a processos adequados de recuperação de materiais, resultando em perdas econômicas e potenciais impactos ambientais.^{7,11}

Metodologia

Esta pesquisa adotou uma abordagem metodológica fundamentada em revisão bibliográfica sistemática, visando assegurar rigor científico e a atualidade na seleção dos dados analisados. O corpus documental foi constituído por fontes acadêmicas, documentos oficiais e projetos de pesquisa relevantes. Foram consultados artigos científicos indexados nas bases Scopus, Web of Science e SciELO, publicados entre 2014 e 2024, selecionados com base em critérios de relevância para eletroquímica de baterias, análise de matérias-primas estratégicas, avaliação de impactos ambientais e técnicas avançadas de reciclagem química.

Complementarmente, foram analisados dados comerciais do Ministério da Economia (ME) sobre importação e exportação de componentes para baterias, relatórios técnicos do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCTI) sobre mineralogia aplicada, bem como normativas do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) para gestão de resíduos eletroeletrônicos. A pesquisa incluiu ainda a análise de editais e resultados de financiamentos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), além de estudos de viabilidade técnico-econômica e casos de sucesso em inovação industrial. A triagem dos materiais seguiu o protocolo PRISMA adaptado, com ênfase na originalidade dos dados, representatividade do contexto brasileiro, aplicabilidade tecnológica e sustentabilidade dos processos.⁷

Para a análise dos dados, empregou-se análise de conteúdo qualitativa, comparação crítica de tecnologias, avaliação de indicadores socioeconômicos e prospecção de cenários. Esta abordagem metodológica integrada permitiu uma avaliação multidimensional do estágio atual de perspectivas futuras para o desenvolvimento sustentável de baterias no Brasil, articulando de forma consistente os avanços científicos com as demandas industriais e as políticas públicas vigentes.⁸

Resultados e discussão

A análise realizada nesta revisão evidenciou a centralidade das baterias de íons de lítio no cenário energético atual, principalmente em função de sua alta densidade energética, eficiência de carga e longa vida útil. Esses dispositivos funcionam com base em processos eletroquímicos reversíveis de oxidação e redução, em que os íons lítio (Li^+) migram entre os eletrodos durante os ciclos de carga e descarga. Quimicamente, o sistema tradicional utiliza um ânodo de grafite, onde os íons se intercalam formando LiC_6 , e um cátodo de compostos como LiCoO_2 , NMC (NiMnCo) ou LiFePO_4 , que liberam e reabsorvem os íons lítio.

Essa dinâmica de intercalação ocorre em meio a um eletrólito orgânico líquido, geralmente constituído por uma solução de LiPF_6 em solventes como carbonato de etileno e carbonato de dimetileno. O eletrólito, embora eficiente, é inflamável e instável em altas temperaturas, o que representa riscos à segurança do sistema. Além disso, o contato entre os eletrodos e o eletrólito leva à formação de uma camada sólida de passivação no ânodo, chamada SEI (*Solid Electrolyte Interface*).

Interphase), que influencia a estabilidade e a performance da bateria, podendo degradar ao longo do tempo.¹⁰

Do ponto de vista químico, a degradação dos materiais ativos ao longo dos ciclos é um fator crítico. Reações paralelas, oxidação dos eletrólitos e crescimento de dendritos de lítio metálico, especialmente em tecnologias emergentes com ânodos de lítio puro que podem levar a falhas catastróficas. A formação de dendritos é particularmente perigosa, pois pode atravessar o separador e provocar curtos-circuitos internos. Tecnologias alternativas vêm sendo estudadas para superar essas limitações.⁹ As baterias de estado sólido substituem o eletrólito líquido por materiais cerâmicos ou polímeros condutores, que reduzem o risco de incêndio, aumentam a estabilidade térmica e permitem o uso de ânodos metálicos, aumentando significativamente a densidade energética. No entanto, essas tecnologias ainda enfrentam entraves como a baixa condutividade iônica dos sólidos e problemas de interface entre eletrodo e eletrólito, que requerem engenharia de materiais em nível molecular para garantir a compatibilidade química e eficiência de transporte de íons.^{1,10}

As baterias de íons de sódio, por sua vez, baseiam-se em uma química similar as de lítio, mas utilizam materiais catódicos e anódicos adaptados ao maior raio iônico do sódio (Na^+). Compostos como $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$ e carbonos duros são explorados devido à sua estabilidade estrutural. Apesar da menor densidade energética (100–150 Wh/kg), sua fabricação é mais barata e sustentável, dado que o sódio é muito mais abundante na crosta terrestre e não depende de reservas geoestrategicamente limitadas.^{1,5}

Além da composição química e eficiência energética, o aspecto da sustentabilidade no descarte dessas baterias torna-se cada vez mais relevante. O ciclo de vida das baterias de íons de lítio, por exemplo, envolve extração de metais estratégicos (como lítio, cobalto, níquel e manganês) que, ao final do uso, tornam-se resíduos potencialmente tóxicos. O descarte inadequado desses materiais pode levar à contaminação de solos e águas, além de representar perdas significativas de recursos valiosos.⁹

Atualmente, menos de 5% das baterias descartadas no Brasil são recicladas adequadamente.¹⁰ Os processos convencionais de reciclagem ainda são limitados em eficiência e escala. A pirometalurgia, uma das rotas mais utilizadas, envolve a queima dos componentes para fusão e recuperação dos metais, mas é altamente intensiva em energia e emite gases tóxicos. Já a hidrometalurgia, baseada em lixiviação ácida

seletiva e posterior precipitação ou extração por solventes, permite a recuperação de metais com maior seletividade, mas depende de reagentes perigosos e requer controle preciso de pH, potencial redox e complexação química.¹

Do ponto de vista químico-ambiental, os desafios da reciclagem estão na complexidade das formulações das baterias modernas, que dificultam a separação de componentes ativos e inertes. A presença de ligantes poliméricos, separadores orgânicos e eletrólitos voláteis agrava o problema. Por isso, pesquisas recentes têm investido em métodos de reciclagem eletroquímica e biometalurgia (uso de microrganismos para recuperação de metais), que podem oferecer rotas mais sustentáveis e menos agressivas ao meio ambiente.^{1,7,9}

O avanço no desenvolvimento de baterias verdadeiramente sustentáveis exige, portanto, um esforço integrado: otimização das rotas sintéticas dos materiais eletroativos, substituição de metais críticos por alternativas menos impactantes, melhoria da reciclagem desde o design da célula (*design for recycling*) e formulação de políticas públicas que incentivem a coleta, o reaproveitamento e a industrialização desses resíduos. Do ponto de vista químico, a inovação em materiais, interfaces e processos de recuperação será decisiva para garantir que o ciclo das baterias seja fechado de maneira eficiente e responsável.^{1,10}

Conclusões

A busca por baterias mais sustentáveis é um dos caminhos mais promissores para enfrentar os desafios da transição energética e da preservação ambiental. Esta pesquisa mostrou que, apesar das limitações enfrentadas, o Brasil tem um grande potencial para se tornar referência na produção e no desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia. As reservas de lítio e nióbio, a estrutura industrial já existente e a capacidade científica instalada colocam o país em posição estratégica nesse cenário.¹⁰

No entanto, transformar esse potencial em realidade exige mais do que apenas recursos. É preciso investir em inovação, fortalecer a integração entre universidades, centros de pesquisa e a indústria, além de criar políticas públicas que incentivem o desenvolvimento de soluções locais. A reciclagem de baterias, por exemplo, ainda é um ponto crítico que precisa ser enfrentado com seriedade, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico.¹¹

Sob a ótica da química, fica claro que o avanço das baterias depende diretamente da evolução dos materiais, do controle dos processos eletroquímicos e da capacidade de entender e otimizar cada etapa da reação. Soluções como as baterias de estado sólido e de íons de sódio mostram que é possível caminhar para alternativas mais seguras e sustentáveis, mesmo que isso ainda demande tempo, investimento e pesquisa.^{10,11}

Em resumo, o futuro das baterias está diretamente ligado à nossa capacidade de equilibrar eficiência, segurança, sustentabilidade e acessibilidade. O Brasil tem as ferramentas necessárias para fazer parte dessa transformação, mas precisa agir de forma estratégica, colaborativa e com visão de longo prazo. A ciência, especialmente a química, tem um papel substancialmente importante nas mudanças que ocorrem no mundo.^{9,11}

Contribuições por Autor

A resenha sobre o artigo em referência e a inclusão de algumas observações são de Bruna Seguins de Paula.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

Agradecimentos

Ao grupo PET-Química/IQ/UnB, à Secretaria de Educação Superior do Ministério da Educação (SeSU/MEC) e ao Decanato de Ensino de Graduação (DEG/UnB) pelo apoio ao Programa de Educação Tutorial pela oportunidade concedida. Ao Instituto de Química (IQ/UnB) e à Universidade de Brasília pelo suporte e espaço fornecidos.

Notas e referências

1. E. Gratz, Q. Sa, D. Apelian and Y. Wang, *Journal of Cleaner Production*, 2018, **186**, 293–304.
2. J. Ordóñez, E. J. Gago and A. Girard, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, **60**, 195–205.
3. N. Yabuuchi, K. Kubota, M. Dahbi and S. Komaba, *Chemical Reviews*, 2014, **114**, 11636–11682.
4. J. Janek and W. G. Zeier, *Nature Energy*, 2016, **1**, 16141.
5. International Energy Agency (IEA), *Global EV Outlook 2023*, IEA, Paris, 2023.
6. United Nations Environment Programme (UNEP), *Recycling rates of metals: a status report*, UNEP, 2023.
7. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), *Plano nacional de resíduos sólidos*, MCTI, Brasília, 2022.
8. Agência Nacional de Mineração (ANM), *Reservas minerais no Brasil: relatório anual 2023*, ANM, 2023.
9. R. A. Silva, *Desenvolvimento de processos sustentáveis para reciclagem de baterias de íons de lítio no Brasil*, PhD thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.
10. L. P. Garcia, A. B. Souza, C. F. Mendes and F. R. Lima, *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Florianópolis, ABEQ, 2021, pp. 1–10.
11. Brasil, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*, Diário Oficial da União, Brasília, 2010.
12. Statista. *Reserves of lithium in Brazil*. Statista. Hamburgo, 2025.
13. S&P Global Market Intelligence. *Brazil's lithium output reached 29,976 t in 2023; could rise fivefold by 2028*. Nova Iorque, 2024.
14. Investing News Network. *Top 9 lithium-producing countries (2024) – Brazil #5 with 4,900 MT*. Investing News, Vancouver, 2024.
15. Financial Times. *Brazil's Jequitinhonha Valley transformation into "Lithium Valley"*. Financial Times, Londres, 2024.