

3

Oportunidades na
cadeia de materiais
minerais para baterias
de veículos elétricos

Pedro Paulo Dias

João Paulo Cotta da Silva*

* Respectivamente, gerente e estagiário do Departamento de Indústrias de Base e Extrativa da Área de Desenvolvimento Produtivo e Inovação do BNDES.

INTRODUÇÃO

O combate às mudanças climáticas e a transição para uma economia de baixo carbono têm impulsionado movimentos de transformação de diversos mercados. Atividades e produtos tradicionais precisarão reduzir sua pegada de carbono, com destaque para as atividades de transporte e as indústrias de cimento e siderurgia. Ao mesmo tempo, há segmentos que ganham força nesse contexto de transformação, envolvendo bioprodutos, química verde e materiais críticos.¹

No contexto de transformação dos transportes, a descarbonização da mobilidade pela via da eletrificação dos veículos e a expansão necessária da geração de energias renováveis podem ser compreendidas como os principais vetores a impactar a cadeia de materiais minerais, impulsionando fortemente a demanda por minerais e transformados críticos para a transição energética. Isso porque as baterias para armazenamento de energia, motores de propulsão elétrica, bem como algumas das máquinas e equipamentos para geração renovável dependem de diferentes minerais críticos para sua fabricação.

A Agência Internacional de Energia (IEA, conforme a sigla original em inglês) destaca a importância dessas cadeias para a transição energética e para a economia de baixo carbono ao afirmar que a resposta dos formuladores de política e das empresas determinará se os minerais críticos seguirão sendo um viabilizador fundamental da transição energética ou se eles se tornarão um gargalo desse processo.²

Segundo a IEA (2022b), a transição energética envolverá a mudança para um sistema energético mais intensivo em minerais críticos. De acordo com dados do relatório, uma usina de geração eólica *offshore* demanda 13 vezes mais recursos minerais do que uma usina de potência similar movida a gás natural, e um veículo elétrico demanda cinco vezes o volume de minerais críticos inseridos em um veículo convencional.

1 Recursos minerais considerados essenciais para atividades produtivas de elevada importância econômica e cujo fornecimento está sujeito a riscos de ruptura ou escassez, a exemplo de lítio, terras raras, cobalto, níquel, cobre, manganês, grafita etc. Esses riscos em geral são associados à ausência de reservas conhecidas para o atendimento da demanda projetada ou à elevada concentração de oferta em poucos países.

2 No original: “*The response from policy makers and companies will determine whether critical minerals remain a vital enabler for clean energy transitions or become a bottleneck in the process*” (IEA, 2022b).

O movimento de eletrificação de frotas de veículos tem projeção de altos volumes para os próximos anos, o que representa crescimento expressivo para a demanda de minerais e produtos transformados de minerais, como lítio, níquel, terras raras, grafite, cobalto, manganês, cobre, alumínio, entre outros. O Brasil, reconhecido por sua riqueza geológica, seu histórico em mineração e transformação mineral e sua diversificação econômica, beneficia-se desse movimento e tem potencial de impulsionar a produção mineral, bem como de materiais transformados e componentes inseridos na fabricação de veículos eletrificados.

As principais diferenças dos veículos elétricos quando comparados a veículos tradicionais a combustão são motor, bateria, maior volume de cabos e necessidade de materiais leves que auxiliem na redução do peso total do veículo diante do maior peso dos componentes utilizados. De acordo com dados da IEA (2022b), o veículo elétrico contém mais de 200 kg de minerais considerados críticos, enquanto o veículo a combustão, menos de 40 kg.

A bateria é um componente fundamental e, segundo a IEA (2022a), corresponde a 30% a 40% do valor de um veículo elétrico. Por essa razão, há diversos países buscando internalizar a cadeia de produção de baterias, o que demanda conhecimento tecnológico e disponibilidade de materiais minerais.

Além disso, as empresas estão incorporando maior capacitação na produção de motores e impulsionando o desenvolvimento da capacidade produtiva de materiais e componentes aplicados, a exemplo de ímãs permanentes e refino de terras raras.

Diante desse cenário, este artigo tem o objetivo de apresentar aspectos relevantes dos mercados de baterias e materiais, a fim de contribuir para a identificação de oportunidades para o desenvolvimento das cadeias de materiais para baterias no Brasil. Está dividido em mais três seções, além desta introdução. Na segunda seção, são apresentadas informações e tendências do mercado de baterias de veículos elétricos. Na terceira, são apresentadas oportunidades relacionadas a quatro minerais considerados de maior destaque para a produção de baterias. Por fim, são tecidas breves considerações finais, que indicam o potencial do Brasil para avançar nessa agenda.

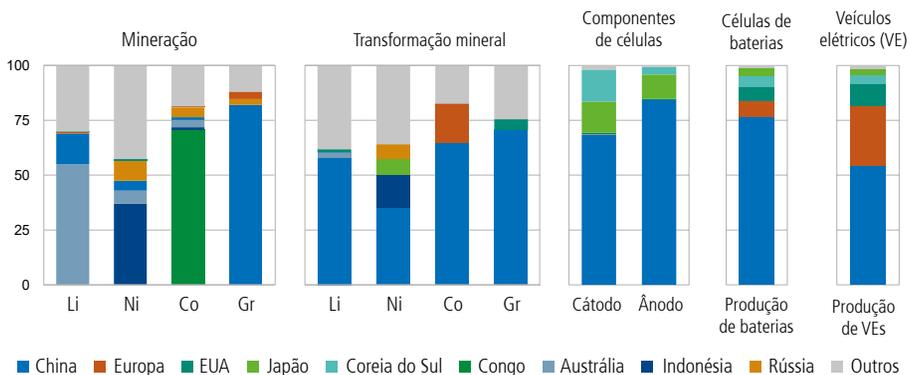
AS BATERIAS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

A escalada recente dos investimentos para a produção de veículos elétricos faz com que a indústria de baterias vivencie um período de grandes movimentações e inovações. Destaca-se a corrida tecnológica por melhor eficiência, custo e sustentabilidade, o que explica a diversidade de modelos e as evoluções no mercado.

Trata-se de um mercado que deverá crescer mais de 20% ao ano nos próximos dez anos, de acordo com projeções da consultoria CRU Group International (2023a), com destaque às baterias de veículos leves, que responderão por 80% a 85% de todo o mercado de baterias.

Como mostrado no Gráfico 1, a produção atual é bastante concentrada nos diversos elos da cadeia, com destaque à participação massiva da China nas etapas de processamento de materiais, produção de componentes e baterias. Diante dessa alta concentração da oferta de materiais e componentes essenciais para a indústria de veículos elétricos, são observados diversos movimentos e políticas de governos no sentido de promover capacidades produtivas nos próprios países, em países geograficamente próximos a seus mercados consumidores e em países aliados geopolíticos.

Gráfico 1. Cadeia de produção de baterias e distribuição geográfica (%)



Fonte: Adaptado de IEA (2022a, p. 5, tradução nossa).

Notas: Li = lítio; Ni = níquel; Co = cobalto; e Gr = grafite. A distribuição geográfica refere-se ao país onde ocorre a produção. A mineração é baseada em dados de produção. A transformação mineral é baseada nos dados de capacidade de produção de refino. A produção de componentes de células é baseada em dados de capacidade de produção de material cátodo e ânodo. A produção de células de baterias é baseada em dados de capacidade de produção. A produção de VEs é baseada em dados de produção.

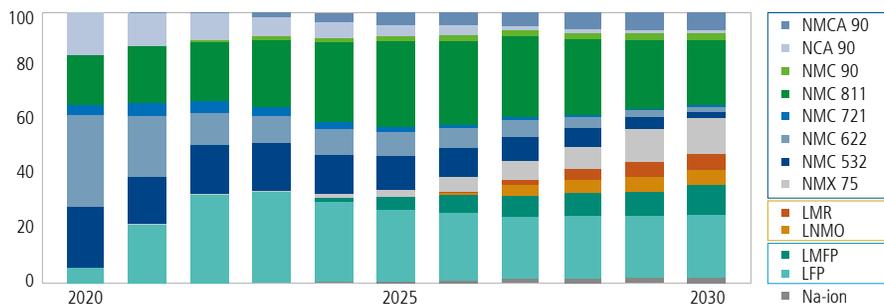
Os modelos variam de acordo com a composição química dos cátodos (eletrodos positivos), que acaba por determinar características importantes das baterias, como peso, custo de produção, tempo de vida, densidade energética e resistência a altas e baixas temperaturas. Além disso, a composição das baterias é fundamental para a sustentabilidade da produção, que diz respeito à disponibilidade dos materiais consumidos e às condições socioambientais em que são produzidos.

Os modelos predominantes atualmente no mercado possuem lítio na composição do cátodo e grafite como ânodo, por isso são conhecidas como “baterias de íon de lítio”. Podem ser divididas em três grandes categorias, conforme sua composição química: (i) lítio com alto teor de níquel; (ii) lítio com baixo ou médio níquel; e (iii) lítio ferro fosfato.

As composições de baixo ou médio níquel apresentam maiores volumes de cobalto. Observa-se uma tendência de redução da participação desse tipo de bateria no mercado,³ com predominância dos modelos de lítio com alto teor de níquel e de lítio ferro fosfato. Além disso, estão sendo desenvolvidas novas gerações de baterias, com destaque para dois tipos: (i) as de íon de lítio sem cobalto e com maior adição de manganês; e (ii) as baterias de íon de sódio.

O Gráfico 2 apresenta a participação projetada das diversas composições de cátodos até 2030 (com predominância das baterias de íon de lítio), servindo como base para projeções de mercado da demanda por materiais.

Gráfico 2. Material de cátodo em baterias de veículos no mundo (% GWh)



Fonte: Adaptado de CRU Group International (2023a, tradução nossa).

Nota: Apresenta as baterias instaladas na produção dos veículos. Outras substâncias químicas não mostradas: NCA 94, NMC 94, NMA 98, NMX 50, LNMFP.

3 O afastamento do mercado em relação a baterias com maior participação de cobalto pode ser explicado pela elevada concentração da produção atual e pela baixa expectativa quanto ao desenvolvimento de novas reservas. Segundo dados do Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS, 2023), a República Democrática do Congo concentrou 68% da produção de cobalto em 2022.

Quadro 1. Composições químicas de cátodo de modelos de baterias

SIGLA	DESCRIÇÃO
NMCA	<i>Lithium nickel manganese cobalt aluminium oxide</i>
NCA	<i>Lithium cobalt aluminium oxide</i>
NMC	<i>Lithium nickel manganese cobalt oxide</i>
NMX	<i>Lithium nickel manganese</i>
LMR	<i>Lithium and manganese rich oxide</i>
LNMO	<i>Lithium nickel manganese oxide</i>
LMFP	<i>Lithium manganese iron phosphate</i>
LFP	<i>Lithium iron phosphate</i>
Na-ion	<i>Sodium-ion</i>

Fonte: Elaboração própria.

Assim, com base na projeção do mercado para os próximos anos sobre as tecnologias de baterias, destacam-se quatro materiais minerais como aqueles com maior potencial de demanda futura: lítio, níquel, grafite e manganês. Na seção seguinte, apresenta-se um breve panorama desses mercados.

MATERIAIS VENCEDORES E CRÍTICOS

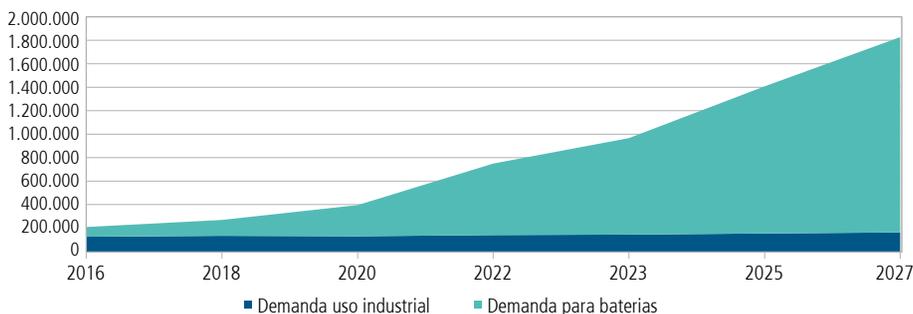
Como já mencionado, o veículo elétrico demanda cinco vezes mais insumos de minerais críticos do que um veículo tradicional a combustão. Não bastasse isso, também demanda maior diversidade de insumos na própria composição, a qual envolve materiais com mercados ainda pequenos e pouco maduros, mas em rápida expansão. São materiais dependentes de reservas minerais consideradas não abundantes diante dos grandes volumes demandados para a produção de veículos (além de outras aplicações, como a geração de energias renováveis). Por isso, são considerados materiais críticos para a transição energética.

Vale destacar que, de acordo com o Serviço Geológico do Brasil – SGB-CPRM (2023, p. 15, tradução nossa), o país “tem pelo menos um grande depósito de cada mineral crítico e geologia favorável para crescer”, colocando-o diante da oportunidade de contribuir ativamente para o desenvolvimento desses mercados.

Lítio

Elemento metálico de menor densidade e maior eletropositividade da tabela periódica, o lítio tem características ideais para aplicação em baterias e está presente em todas as composições atuais no mercado. O crescimento dos mercados de eletrônicos e, mais recentemente, a aceleração da eletrificação veicular fizeram disparar a demanda e a corrida por suprimentos de lítio para a produção de baterias, como pode ser observado no Gráfico 3 e com mais detalhes na Tabela 1.

Gráfico 3. Evolução da demanda de lítio (t)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CRU Group International (2023b).

Tabela 1. Demanda de lítio por uso final (kt LCE)

FINALIDADE	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Demanda industrial (exceto baterias)	130	137	140	144	149	154	158	162
<i>Vidro e cerâmica</i>	64	66	68	71	73	75	78	80
<i>Graxa lubrificante</i>	20	22	23	23	24	25	25	26
<i>Outros</i>	46	49	49	50	52	54	55	56
Demanda para baterias	265	425	609	822	1.045	1.254	1.458	1.664
<i>Veículos leves</i>	180	322	493	686	887	1.069	1.246	1.423
<i>Outros meios de transporte</i>	22	25	27	30	33	36	39	41
<i>Armazenamento estacionário</i>	16	29	42	56	71	90	109	130
<i>Eletrônicos portáteis</i>	35	35	32	33	35	38	40	42
<i>Outros</i>	12	14	15	17	19	21	24	28
Total	395	562	749	966	1.194	1.408	1.616	1.826
Crescimento da demanda em relação ao ano anterior	28,1%	42,3%	33,3%	29,0%	23,6%	17,9%	14,8%	13,0%

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CRU Group International (2023b).

A Tabela 1 apresenta o ritmo de crescimento da demanda observado até 2022 e a projeção até 2027, quando se espera que a demanda por lítio para baterias corresponda a dez vezes o consumo total para outros usos industriais. Desse consumo, 1,46 milhão de toneladas (88%) deve ser destinado a veículos eletrificados, sendo 1,42 milhão apenas para veículos leves.

Para atender a todo esse crescimento, o lítio pode ser obtido por meio de dois tipos de formações minerais distintas: salares e rocha dura. Segundo dados dos agentes produtores, as operações de lítio de rocha dura apresentam atualmente vantagens comparativas para a aplicação em baterias, por envolverem processos ambientalmente mais sustentáveis e com menor custo para atingir os níveis de pureza necessários. As reservas mais abundantes conhecidas atualmente se concentram nos salares do Chile, da Argentina e da Bolívia, enquanto as reservas de rocha dura são a base da produção na Austrália e no Brasil.

Na Tabela 2, são apresentadas as estimativas de capacidade de produção de lítio por países. Trata-se de uma estimativa conservadora para os volumes no Brasil, pois a metodologia de cálculo leva em conta apenas projetos em implantação e prováveis, sobre os quais se aplica um desconto em razão da incerteza acerca de sua concretização. Logo, se fossem consideradas as reservas potenciais e outros projetos não listados, os números seriam ainda mais significativos.

Tabela 2. Produção de minério de lítio, por principais países (kt LCE)

PAÍSES	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Austrália	292	360	448	500	572	610
China	121	161	215	289	342	357
Chile	211	255	274	280	290	307
Argentina	34	71	131	193	237	259
Zimbábue	10	46	79	106	120	127
Brasil	12	30	63	81	97	98
Canadá	0	14	21	41	60	68
Estados Unidos da América	16	16	17	18	33	48

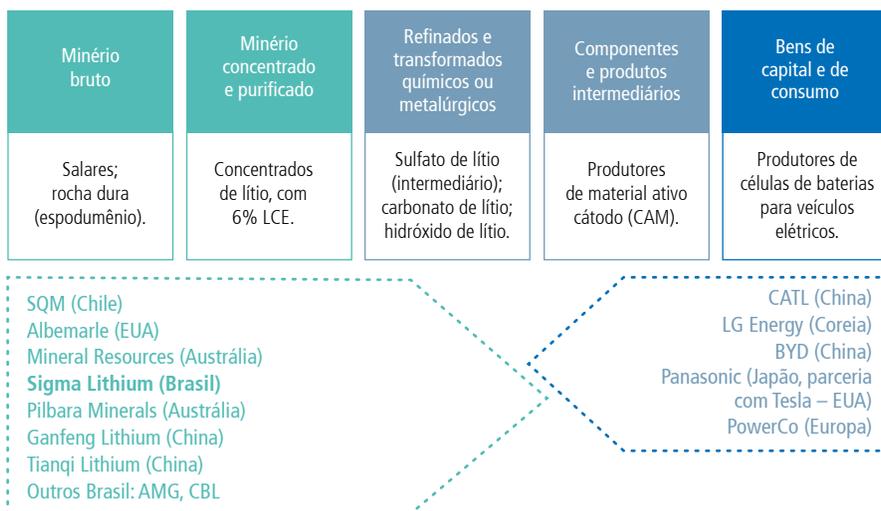
Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CRU Group International (2023b).

No caso do Brasil, a Tabela 2 apresenta de forma conservadora os projetos de expansão de apenas uma produtora, e não inclui os projetos com boas perspectivas em fase de exploração mineral. O país vivencia forte expansão dos investimentos para exploração e produção do lítio, especialmente após a retirada de restrições ao comércio internacional e o sucesso de investimentos no norte de Minas Gerais. A partir de 2022, 130 novas empresas iniciaram pesquisas de minério de lítio no país, e cabe destacar os seguidos avanços reportados pelas empresas listadas em bolsa, o que reforça um potencial ainda maior de produção do que aquele apresentado na Tabela 2.

Diante da perspectiva de crescente disponibilidade de minério de lítio e da boa competitividade esperada dos projetos em estágio mais avançado, o país tem a oportunidade de avançar na cadeia e promover novos investimentos também para capacidade de refino de lítio.

Para aplicação em baterias, o lítio extraído é concentrado e passa por um processo de refino para produção dos materiais de alto grau de pureza, seja na forma de carbonato, seja na forma de hidróxido de lítio, os quais serão aplicados na composição das células das baterias.

Figura 1. Cadeia de lítio para baterias e principais produtores mundiais



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 1 apresenta as principais etapas, bem como as empresas de maior relevância na cadeia atual do lítio para baterias. Cabe destacar que o desenvolvimento desse mercado experimenta movimentos de verticalização nas duas direções: empresas produtoras de minérios buscam participar de etapas a jusante, principalmente do refino, enquanto produtores de células de bateria desenvolvem parcerias em plantas de refino para garantir a oferta de concentrados de lítio.

Por ser considerado material crítico, governos de diversos países, como Estados Unidos da América (EUA), Canadá e Austrália, têm fomentado a produção de minérios e refinados de lítio nos próprios territórios, de forma a garantir participação nesse mercado e condições competitivas para a produção de baterias e veículos elétricos. Um exemplo dessas políticas são os créditos tributários concedidos pelo governo dos EUA para a produção de células de baterias e suas composições químicas no país, no âmbito do *Inflation Reduction Act*. Outras iniciativas são os orçamentos destinados pelos governos do Canadá e da Austrália para financiamento incentivado ao desenvolvimento de minerais críticos.

De acordo com dados da CRU Group International (2023b), foram mapeados 66 projetos de refinarias de lítio em implantação ou considerados prováveis no mundo. A maior concentração desses projetos será na China (50%). Outros países e blocos buscam aproveitar a oportunidade de desconcentração da produção em nível mundial, como é o caso de Argentina (dez projetos), Austrália (quatro projetos), EUA (quatro projetos), Chile, União Europeia e Coreia do Sul (três projetos cada). Há um projeto mapeado para produção de hidróxido de lítio no Brasil, em Minas Gerais.

Diversos desses projetos se beneficiam de parcerias entre produtores de minério de lítio e consumidores fabricantes de veículos elétricos ou baterias, como ocorre na Argentina em parceria entre a Ganfeng Lithium e a BMW. O Brasil deverá buscar parcerias para atração de investimentos para refino de lítio.

Níquel

O níquel é um metal básico com mercado consolidado, aplicado principalmente na produção de aços inoxidáveis. Conta com mercado em expansão em virtude da aplicação na fabricação de cátodos de baterias. De acordo com projeções de mercado, a demanda por níquel para essa aplicação deverá crescer à taxa média de 20% ao ano nos próximos cinco anos. Até 2027, espera-se que o uso em baterias represente cerca de 28% da demanda total de níquel primário.⁴

Tabela 3. Demanda mundial por níquel primário, por aplicação (kt)

APLICAÇÕES	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Aço inoxidável	1.923	1.893	2.082	2.176	2.256	2.317	2.393
Outras aplicações	946	1.095	1.277	1.457	1.648	1.810	1.941
<i>Baterias</i>	358	486	656	811	978	1.119	1.230
Demanda total por Ni primário	2.869	2.988	3.359	3.633	3.904	4.127	4.334

Fonte: Adaptado de CRU Group International (2023d).

Conforme a Tabela 4, diante das expectativas de aumento do consumo de níquel, espera-se um crescimento da produção de cerca de 8% ao ano em cinco anos, de 2022 a 2027. Em resposta à forte expansão do mercado de baterias, a produção de sulfato de níquel deverá crescer mais de 27% ao ano no mesmo período. Trata-se de uma verdadeira corrida de novos projetos para atendimento a esse mercado.

Tabela 4. Oferta mundial de produtos acabados de níquel primário (kt)

PRODUTOS	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Gusa de níquel (NPI)	1.297	1.547	1.731	1.665	1.767	1.849	1.859
Sulfato de níquel	204	404	596	791	965	1.146	1.361
Cátodo	457	472	525	593	609	614	614
Ferroníquel	374	345	327	341	359	367	367
Briquetes	162	168	180	173	167	155	155
Óxido de níquel	40	40	44	46	46	46	46
Outros	168	177	187	197	197	197	197
Total	2.702	3.153	3.590	3.806	4.110	4.374	4.599

Fonte: Adaptado de CRU Group International (2023d, tradução nossa).

⁴ O níquel primário é obtido a partir de extração e beneficiamento mineral, em contraposição ao níquel obtido por meio de sucata (secundário), com grande participação na produção de aços inoxidáveis.

O sulfato de níquel, material utilizado nas composições químicas de baterias, pode ser obtido a partir do processamento de diferentes produtos de níquel: briquete e outros de alta pureza, bem como produtos intermediários, como precipitados de hidróxidos mistos (MHP, na sigla em inglês), precipitados de sulfeto misto (MSP, na sigla em inglês) ou mate de níquel.

Enquanto os produtos de alta pureza, também conhecidos como classe 1, são precificados ao valor de níquel cotado na London Metal Exchange (LME)⁵ ou mesmo com pequeno prêmio, os produtos intermediários, com menores concentrações de níquel, são negociados com desconto em relação ao preço LME. Por isso, é crescente o uso de produtos intermediários para a produção de sulfato de níquel, com destaque para a utilização de MHP como rota preferida para obtenção de sulfato, por vantagens de processamento e segurança em relação a outros intermediários.

A produção de sulfato de níquel é bastante concentrada na China e apresenta parcela significativa na Finlândia. Além disso, segundo dados da CRU Group Internacional (2023d), espera-se a adição de volumes representativos de sulfato também na Indonésia e na Coreia do Sul, reforçando a concentração da produção na Ásia.

Quanto à produção de intermediários precursores ao sulfato de níquel, é esperado forte crescimento das operações de MHP, principalmente na Indonésia (maior produtor mundial de níquel), além de projeto de grande porte em Nova Caledônia.

O Brasil se posiciona entre os dez maiores produtores de níquel, além de deter a quarta maior reserva mundial (USGS, 2023). O país possui grandes projetos em operação, como Santa Rita, da Atlantic Nickel; Barro Alto, da Anglo American; e Onça Puma, da Vale, que é uma das maiores produtoras mundiais de níquel, também com grande volume de operações no Canadá. De acordo com dados da Agência Nacional de Mineração – ANM (2023b), o valor da produção de níquel alcançou R\$ 9 bilhões em 2022.

5 Bolsa londrina com maior mercado de contratos futuros e opções de metais básicos, portanto a principal referência de preços desses metais.

Além disso, há grande volume de investimentos em novos projetos de níquel em implantação ou em estudos de viabilidade, com perspectiva de fornecimento para o mercado de baterias, como o projeto Piauí Níquel, da empresa Brazilian Nickel (Capitão Gervásio de Oliveira, no Piauí); e os projetos Vermelho, da empresa Horizonte Minerals, e Jaguar, da empresa Centaurus Metals, ambos na Província Mineral de Carajás, no Pará.

Cabe destacar o projeto Jaguar, que espera produzir de forma integrada 20 mil t/ano de sulfato de níquel (volume comparável a operações de grande porte fora da China) em um horizonte de vinte anos de ciclo de vida do projeto.

Sobre o processamento do níquel, o Brasil tem ainda duas refinarias negociadas recentemente pela Companhia Brasileira de Alumínio (CBA), do grupo Votorantim, que estavam com a produção paralisada. A refinaria de níquel-cobalto São Miguel Paulista, em São Paulo, foi adquirida pela empresa Jervois Global e se prepara para a retomada de produção, com foco no mercado de baterias. E a unidade de Niquelândia, em Goiás, que inclui mina, planta de processamento e toda a estrutura operacional, teve negociação para venda à empresa Wave Nickel, do grupo Lorentzen, interrompida. Segundo informações divulgadas pelas empresas, a CBA continuará buscando alternativas para a Unidade Niquelândia, enquanto a Wave Nickel segue com sua estratégia de processamento sustentável de níquel por meio de rota industrial disruptiva, utilizando micro-ondas.

Considerando o sucesso dos projetos em desenvolvimento, o país deverá se posicionar como importante fornecedor de produtos de níquel para composição química de baterias de veículos elétricos.

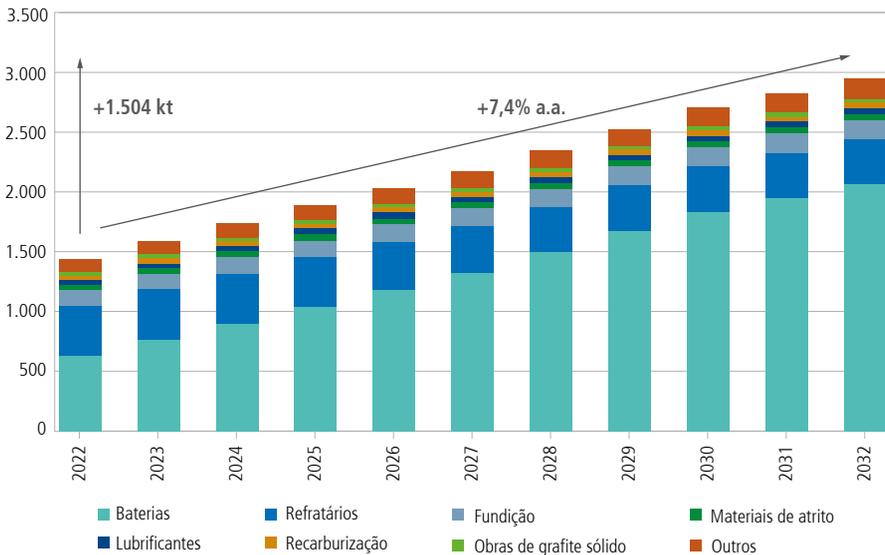
Grafite

Apesar de menos presente na mídia, o grafite é tido por alguns analistas como um grande vencedor entre os materiais aplicados em baterias. Isso porque todos os modelos utilizam grafite em sua composição, principal material aplicado nos ânodos das baterias. Trata-se de material não metálico puro de carbono, com propriedades de alta condutividade elétrica e elevado ponto de fusão.

O grafite pode ser obtido tanto de forma sintética quanto pelo processamento da grafita natural, mineral de que o Brasil detém a segunda maior reserva mundial, segundo dados do USGS (2023). A produção brasileira, no entanto, correspondeu em 2022 a cerca de 10% da produção da China, país que detém a terceira maior reserva, 30% inferior à reserva brasileira. Além da demanda crescente em baterias, tem aplicação principalmente em refratários, fundições, recarburização de aço e em usos mais populares, como material para escrever, lubrificantes, entre outros.

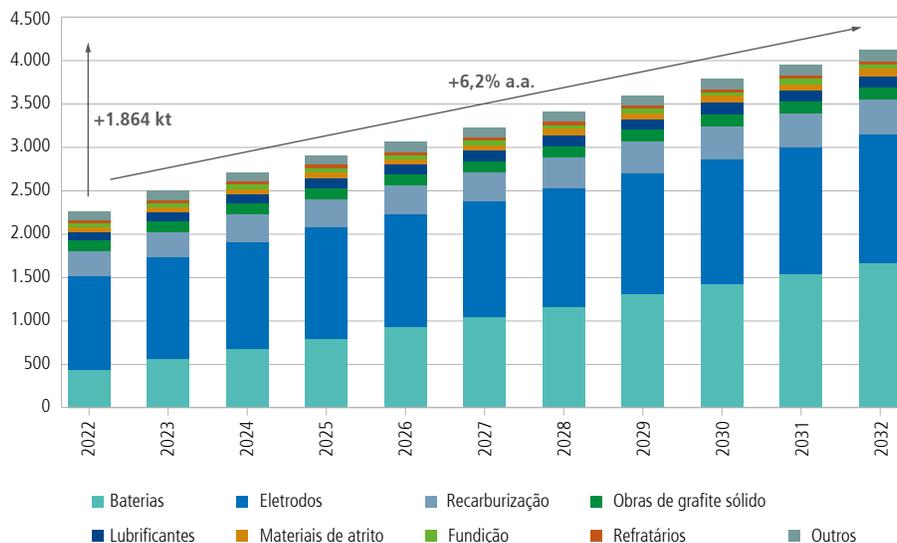
Segundo o Banco Mundial, o grafite é o principal material utilizado para armazenamento de energia, correspondendo a mais de 50% da demanda de materiais para esse fim (World Bank, 2022). Projeções de mercado elaboradas pela European Carbon and Graphite Association – ECGA (2022) indicam que a demanda por grafite apresentará forte crescimento, previsto em 6,7% ao ano na próxima década, puxada pelo crescimento exponencial da produção de baterias para veículos elétricos. Os gráficos 4 e 5 mostram a demanda global de grafite natural e sintético.

Gráfico 4. Demanda de grafite natural por aplicação (kt)



Fonte: Adaptado de Wood Mackenzie *apud* ECGA (2022, p. 5, tradução nossa).

Gráfico 5. Demanda de grafite sintético por aplicação (kt)



Fonte: Adaptado de Wood Mackenzie *apud* ECGA (2022, p. 5, tradução nossa).

De acordo com informações de empresas produtoras, os grafites sintético e de origem natural competem entre si, e os ânodos de baterias costumam ser compostos por uma combinação desses dois materiais. Enquanto o grafite natural se destaca por ter baixo custo, alta capacidade e baixo consumo de energia, com menor pegada de carbono, a vantagem do grafite sintético é o melhor desempenho quanto a velocidade de recarga e longevidade da bateria (Stibbs; Pan, 2023).

Considerando os grandes volumes necessários para atendimento da demanda futura, o mercado de grafite está sujeito aos mesmos riscos de demais materiais críticos quanto à disponibilidade. Assim, os produtores de baterias e veículos procuram garantir o fornecimento desse material de fontes com melhores práticas ASG (ambiental, social e governança) e baixos custos, a fim de garantir maior competitividade de mercado.

Conforme análises de Bennet (2023), da consultoria Fastmarkets, espera-se um déficit de grafite para ânodos de baterias fora da China nos próximos anos, considerando que as tensões geopolíticas e maiores exigências ambientais poderão dificultar a entrada da oferta chinesa nos EUA e na Europa.

Segundo dados do USGS (2023), em 2022 a China concentrou a maior parte da produção mundial de grafite (mais de 65%), sendo 76% na forma de escamas (*flake*), que é o material processado para produção do grafite esférico purificado revestido aplicado nos ânodos de baterias. Quanto à produção de grafite esférico, também há elevada concentração na China, e um movimento de construção de novas plantas em outros países, a exemplo de projetos nos EUA, Suécia, Canadá e Austrália, conforme Quadro 2.

Quadro 2. Projetos mapeados de grafite para baterias

EMPRESA	PROJETO	LOCALIZAÇÃO
Metals Australia	Lac Rainy Graphite Project	Quebec, Canadá
iTech Minerals	Campoona Graphite Project	Península de Eyre, Sul da Austrália
Leading Edge Materials	Woxna Graphite Anode Project	Gävleborg County, Suécia
Talga Resources	Vittangi Graphite Project	Norte da Suécia
Westwater Resources Inc	Kellyton Graphite Plant	Kellyton, Alabama, EUA
Northern Graphite and Graphex Technologies	Baie-Comeau Anode Material Project	Baie-Comeau, Quebec, Canadá
Syrah Technologies	Vidalia Graphite Plant	Vidalia, Los Angeles, EUA
EcoGraf Limited	Battery Anode Material (BAM) Facility	Rockingham-Kwinana, Austrália Ocidental
Renascor Resources	Siviour Graphite Project	Arno Bay e Port Adelaide, Sul da Austrália

Fonte: Elaboração própria, com base em informações divulgadas pelas empresas.

O Brasil possui a quarta maior produção de grafite natural mundial, de acordo com dados do USGS (2023), com destaque para a empresa Nacional de Grafite, que produz 70 mil toneladas anuais em três plantas localizadas em Minas Gerais, além de projeto avançado da canadense South Star para produção de 25 mil a 30 mil toneladas por ano no sul da Bahia.

Em termos de pesquisa mineral, o Brasil tem 783 autorizações de pesquisa e 130 empresas atuando nessa fase. O país é um relevante produtor de grafite para várias aplicações, reconhecido por suas grandes reservas e produção de alta pureza, no entanto ainda deverá receber os primeiros investimentos em capacidade produtiva de grafite esférico purificado para material ânodo de baterias.

Diante da importância desse elemento mineral na composição das baterias, o grafite tem despertado atenção cada vez maior de governos, sendo alvo direto de políticas públicas para desenvolvimento de capacidade de produção doméstica. Esse é o caso de projetos financiados por programas de governo na Austrália e nos EUA. E a condição do Brasil em termos de reservas e capacidade já instalada para diversos produtos de grafite proporciona ao país a oportunidade de se tornar um grande fornecedor global do material para aplicação em baterias.

Manganês

O manganês é o quarto metal mais utilizado no mundo, principalmente como agente de liga na produção de aços (90% de seu consumo), além de apresentar diversos outros usos, como em componentes de baterias, na agricultura (adubos e fertilizantes) e em químicos. É encontrado na composição de dezenas de minerais, sendo considerado abundante e de baixo custo quando comparado a outros minerais críticos como, por exemplo, o cobalto.

A utilização de manganês em baterias de veículos elétricos é capaz de reduzir o volume de componentes de maior custo ou elevar a densidade energética, por exemplo, em baterias de lítio ferro fosfato (LFP); e sua demanda deverá se elevar conforme participação das composições químicas de cátodos projetada para os próximos anos.

O mercado de manganês é consolidado quanto ao consumo em ligas metálicas, no entanto é esperado um crescimento de outros usos da ordem de 100% no período de 2022 a 2027 (CRU Group International, 2023c).

Por se tratar de mercado consolidado, majoritariamente dedicado à fabricação de ligas metálicas, a produção de minério de manganês experimentará baixo crescimento nos próximos anos, cenário bem distinto dos demais minerais para baterias abordados anteriormente.

Tabela 5. Produção de minério de manganês (kt de manganês contido)

PAÍSES	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
África do Sul	7.159	7.891	8.087	7.917	8.084	8.070	8.143	8.100
Gabão	3.702	4.330	4.616	4.261	4.880	4.810	4.810	4.810
Austrália	3.352	3.406	3.073	3.177	3.379	3.323	3.288	3.232
China	2.649	1.935	1.622	1.600	1.510	1.534	1.476	1.451
Índia	985	912	1.196	1.529	1.404	1.412	1.447	1.646
Gana	763	782	857	1.215	1.214	1.350	1.350	1.350
Brasil	979	743	735	810	846	932	1.024	1.077
Resto do mundo	2.287	2.129	2.032	1.901	2.098	2.127	2.149	2.361

Fonte: Elaboração própria, com base em dados da CRU Group International (2023d).

O Brasil possui grande volume de reservas de manganês, ficando entre as quatro maiores reservas do mundo (USGS, 2023). Após a saída da Vale de seus negócios de manganês e os sucessivos problemas enfrentados pela Buritirama, a Mineração Corumbaense Reunida (MCR), no Mato Grosso do Sul, atualmente subsidiária da J&F, destaca-se como a principal produtora de manganês no país, que totalizou cerca de R\$ 490 milhões em produção de manganês em 2022, segundo dados do Anuário Mineral Brasileiro (interativo) da ANM (2023a). Além disso, há outros produtores, principalmente nos estados de Minas Gerais, Pará, Ceará e Mato Grosso, e operações em desenvolvimento na província de Carajás/PA e no estado de Rondônia.

Quanto à pesquisa mineral, o Brasil tem 4.100 autorizações de pesquisa de minério de manganês ou manganês e outras substâncias e 833 empresas atuando nessa fase, conforme consulta em novembro de 2023 aos dados abertos da ANM (2023b).

Apesar de o Brasil ter reservas de manganês consideradas de alto teor, não foram identificados projetos dedicados à produção de transformados de manganês aplicados ao mercado de baterias de veículos elétricos, a exemplo de projetos para produção de sulfato de manganês de alta pureza fora da China, na Austrália, em Botsuana, no Chile e no Canadá. Dessa forma, cabe examinar o potencial das reservas brasileiras de manganês para oferta desses produtos *vis-à-vis* o próprio crescimento da produção de baterias no Brasil e no mundo.

Por fim, a posição do Brasil em termos de volume de produção, reservas e potencial de novos projetos em fase de pesquisa serve de base para futuros

investimentos na produção de manganês e seus transformados como oportunidade de desenvolvimento local, aproveitando as mudanças de mercado que poderão decorrer da expansão de seu uso em baterias.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A diversidade geológica, juntamente com suas vantagens em energia limpa, biodiversidade, oportunidades de desenvolvimento social e neutralidade geopolítica, posicionam o Brasil entre os principais atores da transição climática global e da produção de minerais para transição energética e seus transformados com os melhores padrões socioambientais.

O país deve aproveitar essa oportunidade de desenvolver a produção de materiais transformados para baterias, diante não só das vantagens aqui destacadas, mas também do cenário geopolítico atual, que tem resultado na imposição de restrições ao comércio de materiais principalmente entre China e EUA, no âmbito da disputa comercial entre os dois países.

O Brasil tem potencial reconhecido para expansão da produção e desenvolvimento: (i) da cadeia de lítio, incluindo o refino para fabricação de produtos químicos de lítio, sulfato, carbonato ou hidróxido de lítio; (ii) da produção de concentrado e refinados de níquel, inclusive a oferta direta de sulfato de níquel para produtores de cátodos de baterias; e (iii) de novas capacidades de produção de grafite em camadas e do grafite esférico purificado revestido aplicado nos ânodos de baterias. E, ainda, deverá ser mais bem avaliado o potencial das reservas brasileiras de manganês para oferta de produtos de alta pureza para uso em baterias.

Alguns desses elementos estão no centro da disputa entre países pelo desenvolvimento de capacidade doméstica para produção de baterias para veículos elétricos. Os EUA, por meio de seu Departamento de Defesa, entraram em acordo para apoiar com US\$ 90 milhões a reabertura de uma mina de lítio, visando aumentar a produção doméstica destinada à cadeia de baterias (United States, 2023).

Por outro lado, de acordo com notícia publicada pelo Center for Strategic and International Studies (CSIS), em 20 de outubro de 2023 a China anunciou

que, a partir de 1º de dezembro de 2023, os exportadores chineses passariam a precisar de permissão para embarcar materiais de grafite sintético de alto desempenho e grafite natural em camadas e derivados (Benson; Denamiel, 2023).

Cabe ainda destacar que a diversidade geológica brasileira nos permite aproveitar também oportunidades em outros minerais e transformados de menor destaque na produção de baterias, que, no entanto, serão bastante demandados para produção de outros componentes dos veículos elétricos, a exemplo do cobre, do alumínio e das terras raras e ímãs permanentes de terras raras utilizados nos motores.

Por fim, os esforços para desenvolver as oportunidades aqui destacadas deverão contemplar maior interação dos agentes de mercado, no sentido de explorar parcerias; identificar potenciais entraves a investimentos; e orientar políticas necessárias para reduzir assimetrias quanto a condições regulatórias e de acesso a capital em comparação aos demais países que buscam avançar nessa cadeia. Nesse sentido, os passos já tomados pelo governo brasileiro para viabilizar condições mais favoráveis para financiamento a investimentos em inovação e transição climática poderão se somar a ações definidas a partir da discussão de oportunidades específicas de investimentos.

REFERÊNCIAS

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Anuário Mineral Brasileiro (interativo). *Gov.br*, Brasília, DF, 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/producao-mineral>. Acesso em: 10 out. 2023.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Sistema de Cadastro Mineiro. *Gov.br*, Brasília, DF, 2023b. Disponível em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/sistema-de-cadastro-mineiro>. Acesso em: 7 nov. 2023.

BENNETT, A. Graphite market outlook: five key factors to watch. *Fastmarkets*, [s. l.], 15 ago. 2023. Disponível em: <https://www.fastmarkets.com/insights/graphite-market-outlook-five-key-factors-to-watch>. Acesso em: 17 out. 2023.

BENSON, E.; DENAMIEL, T. China's new graphite restrictions. *Center for Strategic and International Studies – CSIS*, Washington, DC, 23 out. 2023. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/chinas-new-graphite-restrictions>. Acesso em: 6 nov. 2023.

CRU GROUP INTERNATIONAL. *Battery metals market outlook*. [S.l.]: CRU Group International, 2023a.

CRU GROUP INTERNATIONAL. *Lithium market outlook*. [S.l.]: CRU Group International, 2023b.

CRU GROUP INTERNATIONAL. *Manganese market outlook*. [S.l.]: CRU Group International, 2023c.

CRU GROUP INTERNATIONAL. *Nickel Market Outlook*. [S.l.]: CRU Group International, 2023d.

ECGA – EUROPEAN CARBON AND GRAPHITE ASSOCIATION. *Annual report 2022: advancing the green deal*. [S.l.]: ECGA, 2022. Disponível em: https://ecga.net/wp-content/uploads/2023/04/ECGA_AR2022_final.pdf. Acesso em: 18 out. 2023.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Global supply chains of EV batteries*. [S.l.]: IEA, 2022a. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4eb8c252-76b1-4710-8f5e-867e751c8dda/GlobalSupplyChainsOfEVBatteries.pdf>. Acesso em: 9 out. 2023.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *The role of critical minerals in clean energy transitions: world energy outlook special report*. [S.l.]: IEA, 2022b. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>. Acesso em: 9 out. 2023.

SGB-CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. *Brazil's geological potential for critical and strategic minerals: insights for the low carbon transition and agriculture sector*. [S.l.]: SGB-CPRM, 2023. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/pdac/media/ferreira_pdac2023.pdf. Acesso em: 15 mai. 2023.

STIBBS, J.; PAN, S. Synthetic versus natural graphite debate rages on: 2023 preview. *Fastmarkets*, [S.l.], 17 jan. 2023. Disponível em: <https://www.fastmarkets.com/insights/synthetic-versus-natural-graphite-debate>. Acesso em: 17 out. 2023.

UNITED STATES. U.S. Department of Defense. DoD enters agreement to expand domestic lithium mining for U.S. battery supply chains. *U.S. Department of Defense*, Washington, DC, 12 set. 2023. Disponível em: <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3522657/dod-enters-agreement-to-expand-domestic-lithium-mining-for-us-battery-supply-ch/>. Acesso em: 29 jan. 2024.

USGS – U.S. GEOLOGICAL SURVEY. *Mineral commodity summaries 2023*. Virginia: USGS, 2023.

WORLD BANK. *Minerals for climate action: the mineral intensity of the clean energy transition*. World Bank, Washington, DC, 2022.