

CEBRI

IBRAM
MINERAÇÃO DO BRASIL



COPPE
UFRJ

SGB
SERVIÇO GEOLÓGICO
DO BRASIL

CETEM
CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO

GOVERNO DO
BRASIL
DO LADO DO POVO BRASILEIRO



RELATÓRIO TÉCNICO

O papel do Brasil na Agenda Global de Minerais Críticos e Estratégicos

Demanda projetada e contribuição possível
do Brasil na transição energética

Os resultados do projeto “O papel do Brasil na Agenda Global de Minerais Críticos e Estratégicos” do CEBRI-IBRAM refletem o trabalho de pesquisa e projeções elaborado pelo Cenergia, CETEM e SGB. Por isso, não expressam necessariamente a visão individual das instituições que participaram do Programa, nem tampouco incorporam outros trabalhos que estão sendo desenvolvidos por essas instituições. As recomendações apresentadas devem ser consideradas à luz das medidas de política, trabalhos e análises sobre minerais críticos e estratégicos desenvolvidos pelas instituições/entidades competentes em cada caso. As análises e recomendações de políticas não são exaustivas e estão sujeitas a revisão quanto à validade e à consistência com os marcos regulatórios, técnicos e políticos dos setores envolvidos e com tais marcos no contexto específico do Brasil.

O papel do Brasil na Agenda Global de Minerais Críticos e Estratégicos

Demanda projetada e contribuição possível
do Brasil na transição energética

REALIZAÇÃO



PARCERIA



PATROCÍNIO



APOIO



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Relatório técnico [livro eletrônico] : o papel do Brasil na agenda global de minerais críticos e estratégicos : demanda projetada e contribuição possível do Brasil na transição energética. -- 1. ed. -- Rio de Janeiro : Centro Brasileiro de Relações Internacionais - CEBRI, 2025.
PDF

Vários colaboradores.

Bibliografia.

ISBN 978-85-89534-13-0

1. Energia - Fontes alternativas 2. Energia - Fontes alternativas - Aspectos econômicos 3. Energia - Fontes alternativas - Brasil 4. Fontes energéticas renováveis 5. Relatórios técnicos.

25-318865.0

CDD-625.7042

Índices para catálogo sistemático:

1. Transição energética : Políticas públicas : Engenharia de tráfego 625.7042

Aline Grazielle Benitez - Bibliotecária - CRB-1/3129



Ficha Técnica

Coordenação editorial

Julia Dias Leite

Diretora Presidente do CEBRI

Rafaela Guedes

Senior Fellow do Programa de Transição Energética do CEBRI

Luciana Gama Muniz

Diretora Geral de Projetos do CEBRI

Léa Reichert

Diretora Adjunta de Projetos e Especialista em Energia do CEBRI

Laís Ramalho

Coordenadora de Projetos do CEBRI

Renata Oliveira

Coordenadora de Projetos do CEBRI

Julio Nery

Diretor de Assuntos Minerários do IBRAM

Cynthia Rodrigues

Gerente de Pesquisa e Desenvolvimento do IBRAM

Claudia Salles

Gerente de Sustentabilidade do IBRAM

Coordenação do Programa de Transição Energética do CEBRI

Clarissa Lins

Conselheira Consultiva Internacional e Chair do Programa de Transição Energética do CEBRI

Rafaela Guedes

Senior Fellow do Programa de Transição Energética do CEBRI

Comitê Executivo do Projeto e Instituições de pesquisa

Cenergia/Coppe/UFRJ: Fabio Diuana (coord.), Luiz Bernardo Baptista (coord.), Roberto Schaeffer, Alexandre Szklo, Igor Barreto Julião, Victor Do Amaral Cruz Freret, Lucas Barros.

CETEM: Lúcia Helena Xavier (coord.), Luciana Contador, Luciana Mofati, Sílvia Cristina Alves França, Andrea Camardella de Lima Rizzo.

SGB: Lucy Chemale, Mauricio Pavan Silva, Guilherme Guerra, Anderson Dourado Rodrigues da Silva, Gustavo Alexandre Silva, Sulsiene Machado de Souza Gaia

ICS: Victoria Santos, Joana Correia, Marcela Gomes, Katiane de Souza.

IBRAM: Cinthia Rodrigues, Claudia Salles, Julio Nery.

EPE: Gustavo Naciff de Andrade, Heloisa Esteves, Thiago Ivanoski Teixeira, Giovanna Pedreira, Natália Moraes, Marina Klostermann.

Pesquisadores e Redação

Bruna Targino

Pesquisadora Associada do CEBRI

Felipe Cristovam

Analista de Projetos do CEBRI

José Ricardo Araujo

Assistente de Projetos do CEBRI

Léa Reichert

Diretora Adjunta de Projetos e Especialista em Energia do CEBRI

Luciana Contador

Pesquisadora do CETEM

Rafaela Guedes

Senior Fellow do CEBRI

Thiago de Moraes Moreira

Pesquisador Associado do CEBRI

Yuri Telles

Pesquisador Associado do CEBRI

Sumário

9	Sobre o projeto
12	Lista de abreviaturas
14	Sumário executivo

20 1. Introdução

21	1.1. Bases conceituais do estudo
25	1.2. Visão global da oferta e consumo mineral
29	1.3. A posição brasileira nos MCE

33 2. Oferta

33	2.1. Grafita
38	2.2. Lítio
44	2.3. Elementos Terras Raras: neodímio (Nd), praseodímio (Pr), disprósio (Dy) e térbio (Tb)
50	2.4. Níquel
57	2.5. Nióbio
61	2.6. Cobre
66	2.7. Minério de Ferro
73	2.8. Cobalto
78	2.9. Bauxita

84 3. Demanda Brasileira por minerais na sua trajetória de neutralidade climática

84	3.1. Contextualização Global e Nacional da Demanda por Minerais Críticos e Estratégicos
85	3.2. Premissas e Abordagem Metodológica
86	3.3. Principais Famílias Tecnológicas Analisadas
93	3.4. Estimativa da Demanda de Materiais

100 **4. Principais destaques a partir da análise comparativa entre oferta e demanda de minerais críticos e estratégicos no Brasil**

107 **5. Principais barreiras e desafios à produção**

- 107 5.1. Status atual da legislação
- 109 5.2. Limitações à pesquisa, exploração e processamento
-

117 **6. Oportunidades de investimentos e cooperação**

- 118 6.1. Grafita
- 122 6.2. Cobre
- 126 6.3. Lítio
- 130 6.4. Níquel
- 134 6.5. Terras raras (ETR)
- 138 6.6. Ferro
-

143 **7. Recomendações de Políticas Públicas**

- 147 Referências Bibliográficas
- 153 Anexo A — Metodologia
- 157 Anexo B — Intensidade e materiais selecionados para análise

Sobre o projeto

O projeto foi iniciado em 2024 com o propósito de oferecer uma análise da demanda nacional por minerais para a transição energética e do potencial de oferta desses minerais. Almeja, com isso, analisar o papel que o Brasil pode exercer na agenda de minerais críticos e estratégicos (MCE), considerando a importância dos MCE para a economia de baixo carbono e sua relevância na geopolítica atual.

Essa é uma iniciativa do **Centro Brasileiro de Relações Internacionais (CEBRI)**, junto com o **Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM)**, o **Cenergia (Coppe/UFRJ)**, o **Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)** e o **Serviço Geológico do Brasil (SGB)**. O projeto conta ainda com a parceria do **Instituto Clima e Sociedade (iCS)** e da **Empresa de Pesquisa Energética (EPE)** e o patrocínio da **BHP** e da **Vale**, além do apoio institucional do **BMA Advogados**.

O estudo se baseia em três premissas base, sendo elas:

(i) É inegável o potencial de inserção estratégica do Brasil em cadeias globais de abastecimento de MCE;

(ii) Tem havido um aumento da competição internacional por MCE, impulsionada majoritariamente pela transição energética e pelos setores de defesa e transformação digital;

(iii) A concentração geográfica da oferta e processamento de MCE elevam riscos geopolíticos e comerciais, o que leva à necessidade de diversificação de países ofertantes e parceiros estratégicos — oferecendo ao Brasil uma oportunidade única de inserção internacional como fornecedor confiável.

A partir de uma análise envolvendo diferentes perspectivas e atores, o presente estudo avalia os possíveis impactos das rotas tecnológicas de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil sobre a demanda por minerais, mapeia o potencial mineral brasileiro diante das demandas interna e externa, e busca compreender as implicações dessa transição sobre os setores produtivos e as cadeias de suprimento associadas. Esses resultados, em torno, visam:

1

Apoiar

o planejamento estratégico nacional;

2

Subsidiar

a formulação de políticas públicas visando a atração de investimentos, o fortalecimento da oferta interna e o desenvolvimento sustentável;

3

Fomentar

a integração do país às cadeias globais de valor.

Do lado da oferta, com insumos fornecidos majoritariamente pelo **CETEM** e pelo **SGB**, foi possível estimar o potencial mineral brasileiro para atender às necessidades da transição energética. Nesta frente, a avaliação da oferta mineral teve como base tanto os recursos na forma de dotação mineral, as reservas resultantes dos recursos que apresentam viabilidade técnica e econômica para a extração, bem como os bens minerais produzidos nos estágios de *midstream*, *downstream* e recuperação de materiais secundários (*recovery*).

Já do lado da demanda, com insumos oriundos principalmente do **Laboratório Cenergia**, foi realizada a projeção da demanda de minerais para os principais conversores energéticos num cenário de cumprimento das metas da contribuição nacionalmente determinada (NDC)¹ brasileira que objetiva alcançar a neutralidade de emissões de gases de efeito estufa (GEE) até 2050. A referência é o cenário “Transição Brasil” proposto no Programa de Transição Energética (PTE2), para o qual foi utilizado o modelo de avaliação integrada de oferta e demanda de energia e uso do solo (*Brazilian Land-Use and Energy Systems – BLUES*). O BLUES constitui-se em um modelo de avaliação integrada concebido para capturar, de modo abrangente, as inter relações entre uso da terra, sistemas energéticos e emissão de gases de efeito estufa no contexto brasileiro. Para detalhes adicionais sobre a metodologia, ver Anexo A.

A partir do cruzamento dos resultados obtidos, de análises complementares e das contribuições de especialistas e organizações,² foi elaborado esse relatório técnico, que reúne os principais resultados sobre a oferta e a demanda de MCE no Brasil, além de identificar gargalos e oportunidades para o país. As análises

1. A trajetória considerada nesse cenário contempla uma redução de aproximadamente 50% das emissões líquidas de GEE até 2030 em comparação aos níveis de 2005, além da obtenção de emissões líquidas zero até 2050.

2. A construção desse estudo contou com a participação de diversos *stakeholders* e instituições por meio de consultas e reuniões restritas, contribuindo com análises e *insights* essenciais para o seu desenvolvimento. Destacam-se: as empresas patrocinadoras do projeto (BHP e Vale), BMA Advogados, IBRAM, ICS, ANM, BloombergNEF, C3, ClouderVista, ConDET, E+ Transição Energética, Governo de Goiás, MME, Simineral, Systemiq, APCO.

e recomendações oferecidas neste relatório representam visões de futuro e interpretações que não derivam exclusivamente dos resultados dos modelos utilizados, podendo também se basear em dados de organizações parceiras, bem como em evidências e projeções sobre o status atual da transição energética. Logo, buscam ir além dos cenários quantitativos, oferecendo um olhar mais amplo para avaliar o papel do Brasil na agenda de minerais críticos e estratégicos, incorporando análises complementares.

O documento contextualiza o cenário internacional em que o Brasil está inserido e apresenta recomendações de políticas públicas e caminhos para investimento e cooperação internacional.

Lista de abreviaturas

AAM – Active Anode Material
(Material Anódico Ativo)

BDC – Brushed DC Motor
(Motor DC com escovas)

BLDC – Brushless DC Motor
(Motor DC sem escovas)

CBA – Companhia Brasileira de Alumínio

CBMM – Companhia Brasileira de
Metalurgia e Mineração

CBPM – Companhia Baiana de Pesquisa
Mineral

CFEM – Compensação Financeira pela
Exploração de Recursos Minerais (*royalties*)

CIGS – Copper Indium Gallium Selenide
(Filmes finos de cobre, índio, gálio e selênio)

CMOC – China Molybdenum Company

CNM – Companhia Nacional de Mineração

CRMA – Critical Raw Materials Act (Ato de
Matérias-Primas Críticas da União Europeia)

CTAPME – Comitê Técnico de
Acompanhamento de Políticas Minerais e
Energéticas

DFIG – Doubly-Fed Induction Generator
(Gerador de Indução Duplamente
Alimentado)

EESG – Electrically Excited Synchronous
Generator (Gerador Síncrono com
Excitação Elétrica)

EESM – Electrically Excited Synchronous
Motor (Motor Síncrono com Excitação
Elétrica)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ESG – Environmental, Social and
Governance

ETRs – Elementos Terras Raras

EUA – Estados Unidos da América

GEE – Gases de Efeito Estufa

IEA – International Energy Agency
(Agência Internacional de Energia)

IM – Induction Motor (Motor de Indução)

IAC – Ion Adsorption Clays
(Argilas de Adsorção Iônica)

IOCG – Iron Oxide Copper Gold
(Depósito de Óxido de Ferro, Cobre e Ouro)

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica
Aplicada

LCO – Lithium Cobalt Oxide
(Óxido de Lítio-Cobalto)

LCOE – Levelized Cost of Energy
(Custo Nivelado de Energia)

LFP – Lithium Iron Phosphate
(Lítio-Ferro-Fosfato)

LMO – Lithium Manganese Oxide
(Óxido de Lítio-Manganes)

LTO – Lithium Titanate Oxide
(Óxido de Lítio-Titânio)

MAA – Material Anódico Ativo
(Active Anode Material – AAM)

MCE – Minerais Críticos e Estratégicos

MREC – Mixed Rare Earth Concentrate
(Concentrado de ETR Misto)

MREO – Magnetic Rare Earth Oxides
(Óxidos de ETR Magnéticos)

MME – Ministério de Minas e Energia

MRN – Mineração Rio do Norte S.A.

NCA – Nickel Cobalt Aluminum
(Níquel-Cobalto-Alumínio)

NDC – Nationally Determined Contribution (Contribuição Nacionalmente Determinada)

NIB – Nova Indústria Brasil

NMC – Nickel Manganese Cobalt (Níquel-Manganes-Cobalto)

PAL – Pressure Acid Leach (Lixiviação Ácida sob Pressão)

PCA – Pilha a Combustível Alcalina

PCMTF – Pilha a Combustível de Membrana Trocadora de Prótons

PCAF – Pilha a Combustível de Ácido Fosfórico

PCCF – Pilha a Combustível de Carbonato Fundido

PCOS – Pilha a Combustível de Óxido Sólido

PCBs – Printed Circuit Boards (Placas de Circuito Impresso)

PDAC – Prospectors & Developers Association of Canada

PDGMTM – Plano Duodecenal de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

PLANAVEG – Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa

PLANTE – Plano Nacional de Transição Energética

PL 2780/24 – Projeto de Lei nº 2780/2024 (Reforma do Código de Mineração)

PNM – Plano Nacional de Mineração

PMSG - Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes

PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor (Motor Síncrono de Ímã Permanente)

PTE – Plano de Transformação Ecológica

PTE-2 – Fase II do Programa de Transição Energética

PWR – Pressurized Water Reactor (Reator de Água Pressurizada)

PSB – Polissulfeto de Bromo

REO – Rare Earth Oxides (Óxidos de ETR)

RDC – República Democrática do Congo

ROM – Run of Mine (Minério Bruto Extraído)

SEDEX – Sedimentary Exhalative Deposit (Depósito Exalativo Sedimentar)

SGB – Serviço Geológico do Brasil

SMR – Small Modular Reactor (Reator Modular Pequeno)

SQIG – Squirrel Cage Induction Generator (Gerador de Indução de Gaiola de Esquilo)

SRM – Switched Reluctance Motor (Motor de Relutância Chaveada)

SX-EW – Solvent Extraction – Electrowinning (Extração por Solvente e Eletroextração)

TGC – Total Graphitic Carbon (Carbono Grafítico Total)

TREO – Total Rare Earth Oxides (Óxidos Totais de ETR)

UE – União Europeia

UNECE – United Nations Economic Commission for Europe (Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa)

USGS – United States Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos)

VMS – Volcanogenic Massive Sulfide (Sulfeto Maciço Vulcanogênico)

VPL – Valor Presente Líquido

VRFB – Vanadium Redox Flow Battery (Bateria de Fluxo Redox de Vanádio)

WRIG – Wound Rotor Induction Generator (Gerador de Indução de Rotor Enrolado)

Sumário executivo

O presente relatório é resultado da parceria entre CEBRI, IBRAM, Cenergia/Coppe, CETEM e SGB. O objetivo principal deste projeto é avaliar como a transição energética afeta a demanda por minerais críticos e estratégicos (MCE) no Brasil até 2050, bem como estimar qual a capacidade do país de ofertá-los ao mercado global. O estudo combina: i) projeções de demanda material derivadas do cenário Transição Brasil do Programa de Transição Energética do CEBRI, alinhado à NDC brasileira, que objetiva alcançar a neutralidade de GEE até 2050; e ii) um mapeamento da oferta mineral nacional. A meta é orientar políticas públicas e investimentos para posicionar o Brasil como fornecedor confiável e competitivo nas cadeias globais — identificando sinergias entre oferta e demanda de MCE para que o Brasil possa aproveitar oportunidades para desenvolver sua cadeia produtiva. Isto é, não limitar-se apenas à extração de minerais, mas também evidenciar oportunidades para avançar nas etapas de beneficiamento, processamento e produtos de maior valor agregado.

Contexto

A transição energética aumenta a intensidade material de sistemas de energia e mobilidade. Nesse contexto, “crítico” é o mineral essencial com risco de suprimento; “estratégico”, aquele em que o país tem vantagens e relevância econômica. O Brasil não adota lista formal de “críticos”, mas possui lista de “estratégicos” (MME/2021) que inclui, entre outros, cobre, níquel, nióbio, grafita, lítio e elementos de terras raras (ETR). Atualmente, há uma forte concentração geográfica da extração e, sobretudo, do refino (com notável liderança da China em grafita e ETR, e da Indonésia em níquel) — cenário que reforça a importância de diversificar cadeias e consolidar fornecedores alternativos confiáveis.

Metodologia

A estimativa do potencial de oferta mineral foi realizada pelo CETEM com base nos dados do Serviço Geológico do Brasil (SGB) e múltiplas fontes, incluindo levantamentos de campo, relatórios internos, pesquisas em portais de empresas

do setor mineral, além de documentos oficiais — como relatórios e publicações de órgãos reguladores. A oferta foi consolidada com dados de dotação, recursos, reservas e produção, além de visão de cadeias de valor (*upstream*, *midstream* e *downstream*) e reciclabilidade.

Já a estimativa da demanda material concentrou-se na identificação dos grupos de conversores energéticos relevantes para o período entre 2025 e 2050, baseando-se nos resultados da modelagem do BLUES — referente ao cenário Transição Brasil, da Segunda Fase do Programa de Transição Energética (ver Anexo A). Em cada conversor (solar, eólico, baterias, motores, pilhas a combustível, nuclear) aplicaram-se intensidades materiais e dinâmica de reposição ao fim de vida. Posteriormente, foi realizada a seleção das famílias tecnológicas mais promissoras para cada um dos conversores identificados através de uma revisão da literatura técnico-científica orientada por critérios técnicos, econômicos e ambientais. Em seguida, realizou-se o processo de estimativa da demanda de materiais (ver anexo A e B).

Oferta brasileira: potencial e cadeias

O Brasil reúne volume, diversidade e qualidade geológica:

- **Grafita:** províncias Bahia–Minas e Ceará; teor de carbono grafítico contido de ~105 Mt; insumo crítico para baterias em veículos elétricos e sistemas de armazenamento.
- **Elementos de Terras Raras (ETR - Nd, Pr, Dy, Tb):** operação pioneira de argilas iônicas (Serra Verde, GO); TREO contido estimado em ~5,5 Mt nos projetos reportados; útil para produção de ímãs permanentes, fundamentais para motores elétricos, geradores de turbinas eólicas, etc.
- **Níquel:** depósitos localizados em PA, GO e BA; níquel contido no recurso total ~12,77 Mt (nas áreas em produção, o níquel contido é de ~3,66 Mt); ampla utilização em aços inoxidáveis, indústria química, naval e alimentícia, turbinas aeronáuticas e outros.
- **Nióbio:** liderança mundial (Araxá/MG, Catalão/GO); recurso contendo ~3,17 Mt de Nb₂O₅ equivalentes (~3,5 Mt FeNb ou ~2,22 Mt Nb); cadeia já avançada até ligas e óxidos de alta pureza.
- **Cobre:** depósitos de Óxido de Ferro, Cobre e Ouro (IOCG) localizados em Carajás e pórfiros em GO; oferta potencial em produção de ~32,54 Mt (total com pesquisa ~35,73 Mt); oportunidade de avançar em fundição/refino.

- **Minério de ferro:** destaque para Carajás/PA Quadrilátero Ferrífero/MG; ferro contido em recurso em produção de ~21.220 Mt de Fe; inovação em briquetes e pelotas de alta qualidade para rotas de baixo carbono no setor siderúrgico (DRI/EAF).
- **Cobalto:** coproduto do níquel (GO, PI, MG); cobalto contido no recurso total (produção+ pesquisa) de ~110 kt; relevante para aplicações em alta tecnologia.
- **Bauxita/alumínio:** grandes jazidas no PA e MG/GO; potencial de produção a partir do recurso total de ~898 Mt de alumina e ~475 Mt de alumínio; Brasil líder em reciclagem de latas (100% em 2022).

Demanda Brasileira por minerais na sua trajetória de neutralidade climática

Entre 2025 e 2050, a demanda por minerais no Brasil será guiada pelas tecnologias essenciais à transição energética, como a expansão da energia solar baseada em silício cristalino, o avanço das turbinas eólicas modernas, a difusão de baterias e motores elétricos, o desenvolvimento de pilhas a combustível e a conclusão da usina Angra III para geração nuclear.

Essas tecnologias impulsionarão a demanda de minerais como cobre, silício, lítio, níquel, cobalto, grafita, manganês, telúrio e neodímio, especialmente após 2035, quando o país precisará acelerar a adoção de soluções de baixo carbono para cumprir suas metas de neutralidade climática. Os resultados do estudo mostram saltos entre a demanda projetada em 2025 e as décadas seguintes para minerais como lítio, grafita, cobre ou níquel. Por exemplo, a demanda por lítio e níquel cresce de 1 kt em 2025 para 43 Kt e 35 Kt respectivamente em 2050, e de 8 para 273 kt no caso do cobre.

Antecipar esse movimento é crucial para que o Brasil alinhe sua base mineral às demandas industriais emergentes e amplie sua competitividade nas cadeias globais.

Principais destaques a partir da análise comparativa entre oferta e demanda de minerais críticos e estratégicos no Brasil

A análise conjunta da oferta e da demanda de minerais críticos e estratégicos

indica que o Brasil possui grande potencial geológico e oportunidades para integrar políticas minerais e industriais. Os minerais analisados em comum — cobre, grafita, lítio, níquel, cobalto — demonstram que o Brasil possui reservas significativamente superiores às demandas projetadas até 2050, com destaque para o níquel, 128 vezes acima da demanda acumulada, e para o cobre e a grafita, 19 e 43 vezes, respectivamente.

No entanto, a produção nacional ainda é restrita e concentrada em estágios iniciais da cadeia. Materializar esse potencial em produção permitiria ao Brasil garantir a segurança do seu suprimento em setores estratégicos, bem como se tornar um ator no atendimento à demanda global por minerais, que pode quadruplicar até 2040, segundo projeções da Agência Internacional de Energia.

Oportunidades de investimentos e cooperação

Há janelas estratégicas para reposicionar o Brasil nas cadeias globais:

- **Grafita:** desenvolver a capacidade de purificação, esferoidização e revestimento para produção de material anódico, ancorada em polos na Bahia, Minas Gerais e Ceará. Adotar rastreabilidade e padrões de baixo carbono para acessar mercados exigentes.
- **Cobre:** expandir a capacidade de fundição, refino e semimanufaturados (cátodos, fios, laminados), integrando reciclagem e metalurgia verde. Promover cooperação regional com Chile e Peru.
- **Lítio:** desenvolver processamento doméstico de espodumênio em carbonato e hidróxido grau bateria (Vale do Lítio/MG e novas fronteiras no NE). Incentivar a reciclagem de baterias e rotas hidrometalúrgicas sustentáveis.
- **Níquel:** ampliar produção de níquel classe I e sulfato, priorizando rotas hidrometalúrgicas (HPAL) quando viáveis, com *clusters* integrados a energia limpa e logística competitiva. Fomentar reciclagem como suprimento secundário.
- **ETR:** ampliar e fortalecer etapas de separação, refino e produção de ímãs magnéticos (Araxá, Catalão). Estimular P&D em reciclagem e substitutos tecnológicos.
- **Ferro:** priorizar produtos de maior valor agregado (pelotas RD, briquetes) e descarbonizar a siderurgia com rotas DRI/EAF e maior eficiência energética. Expandir circularidade e *clusters* regionais sustentáveis.

Recomendações de políticas públicas

Para que o Brasil potencialize a extração e o aproveitamento de seus recursos minerais críticos e estratégicos, é imprescindível estabelecer políticas que integrem mineração, inovação e sustentabilidade:

- I. **Uma agenda nacional para MCE:** modernizar o marco regulatório com foco em coordenação federativa, licenciamento eficiente, segurança jurídica e alinhamento com políticas existentes como Política Nacional de Transição Energética (PNTE), Plano de Transformação Ecológica (PTE), Nova Indústria Brasil (NIB) e Plano Decenal de Mapeamento Geológico Básico e Levantamento de Recursos Minerais (Plan-GEO) enquanto políticas de Estado.
- II. **Financiamento e instrumentos verdes:** ampliar crédito de longo prazo e linhas de financiamento (FINEP–BNDES, iniciativas do Plano de Transformação Ecológica e fundos de investimentos do BNDES³), reconhecendo a mineração sustentável como habilitadora da transição.
- III. **PD&I e qualificação:** oferecer capacitação técnica em cadeia de baterias, ETR, refino e reciclagem; além de criar plantas-piloto e parcerias entre empresa-universidade-institutos.
- IV. **Infraestrutura facilitadora e clusters:** criar uma infraestrutura integrada com ferrovias/portos e parques industriais próximos às jazidas (MG, GO, PA, BA, CE), estimulando o *midstream/downstream*.
- V. **Integração regional e offtakes:** estabelecer acordos com países da região e com compradores globais para diversificação responsável das cadeias, rastreabilidade e previsibilidade de demanda.
- VI. **Aprimoramento do conhecimento geológico do país:** consolidar o PlanGeo 2025-2034, ampliando as escalas detalhadas e reduzindo assimetrias regionais para fortalecer o conhecimento geocientífico, orientar investimentos e integrar tecnologias de sensoriamento remoto e geoinformação ao planejamento mineral e ambiental.
- VII. **Promover uma mineração sustentável:** com altos padrões ambientais, sociais e de governança (ESG) capazes de minimizar os impactos negativos; otimizar as potencialidades e garantir o bem-estar econômico e social da população.

3. ver estudo Financiamento Climático e Mineração (IBRAM, 2025b).

- VIII. Alinhamento entre a oferta mineral e demanda industrial:** construir mecanismos de planejamento que conectem o potencial geológico nacional às necessidades das cadeias industriais emergentes (baterias, hidrogênio, eletrificação).
- IX. Criar “roadmaps” estratégicos para minerais críticos e estratégicos:** Facilitar a identificação das cadeias com maior potencial competitivo e tecnológico, promovendo a articulação entre políticas de PD&I, industrial e de financiamento.
- X. Estimular a economia circular na mineração:** Promover programas nacionais de reciclagem de minerais críticos, fomentando projetos-piloto em mineração urbana e recuperação de áreas degradadas.

Conclusão

O Brasil dispõe de uma dotação mineral robusta e de cadeias de extração consolidadas, com avanços recentes em tecnologias de baixo carbono, como briquetes de minério de ferro e rotas de refino mais limpas. No entanto, o que separa o potencial do protagonismo é a capacidade de transformar reservas em valor industrial e tecnológico, construindo uma cadeia produtiva completa e sustentável que incorpore beneficiamento, processamento, manufatura e reciclagem. Essa transição exige coordenação entre governo, setor privado e academia, aliada a políticas de PD&I, financiamento verde e infraestrutura de baixo carbono, capazes de converter o potencial geológico em influência estratégica. Essa abordagem está alinhada à Missão 3 da Nova Indústria Brasil, que dentre seus objetivos, busca promover a mobilidade sustentável para a integração produtiva e o bem-estar nas cidades — incluindo desafios como a agregação de valor sobre recursos minerais no país.

Com previsibilidade regulatória, inovação e inserção em cadeias globais de maior valor agregado, o Brasil pode evoluir de exportador de *commodities* para ator central do *midstream* e *downstream* mineral, contribuindo para a segurança de suprimento, a reindustrialização verde e a transição para uma economia de baixo carbono. Assim, a consolidação do país como fornecedor global de MCE dependerá da capacidade de inserção nas cadeias produtivas globais, iniciando pelas fases em que podemos ter maior competitividade, integrando exploração mineral, inovação tecnológica e manufatura de tecnologias limpas — materializando seu potencial e oferecendo previsibilidade sobre a demanda e as oportunidades de inserção produtiva do Brasil.

1.

Introdução

O enfrentamento da crise climática demanda um esforço global para limitar o aumento da temperatura média global abaixo de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, buscando limitá-lo a 1,5 °C, conforme estabelecido no Acordo de Paris. Nesse contexto, os países têm adotado metas de redução das emissões de gases de efeito estufa, cujo cumprimento exige a ampliação do uso de tecnologias de baixo carbono para geração de energias renováveis, captura e armazenamento de carbono, aumento da eficiência energética e eletrificação de setores intensivos em energia.

Apesar de terem uma densidade energética menor do que os combustíveis fósseis, as tecnologias de energia renovável são mais intensivas em materiais. A crescente eletrificação de economias e a adoção global de tecnologias limpas têm impulsionado, consequentemente, a demanda por minerais como cobre, lítio, cobalto, níquel e elementos de terras raras, que são insumos essenciais para turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos, baterias e motores de veículos elétricos. Segundo a EPE (2025), um parque eólico terrestre requer nove vezes mais recursos minerais do que uma usina a gás e um carro elétrico seis vezes mais insumos minerais do que um carro convencional. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2025) também aponta que, nos últimos dois anos, as tecnologias relacionadas à energia foram responsáveis por um crescimento de 65%–90% do crescimento total de demanda para metais como cobalto, grafite, lítio, manganês e níquel. A IEA estima que a demanda por níquel dobrará até 2050 devido aos motores para veículos elétricos (EVs). Ademais, desde 2010, a quantidade média de minerais necessária para uma nova unidade de capacidade de geração de energia aumentou em cerca de 50%, evidenciando a dependência crescente da transição energética em relação a esses recursos⁴.

Diante desse cenário, a relação entre energia, tecnologias de baixo carbono e minerais torna-se cada vez mais estratégica. A reorganização das cadeias pro-

4. EPE. (2025). Minerais críticos e estratégicos para a transição energética. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-877/Caderno_Minerais_Final.pdf#search=cadernos%20minerais

dutivas e as novas dinâmicas geopolíticas associadas à oferta desses insumos reforçam a importância de compreender o papel que países ricos em recursos naturais — como o Brasil — podem desempenhar nesse contexto. Compreender o potencial brasileiro para MCE perpassa pela discussão sobre o panorama global dos MCE diante da transição energética; os desafios e as oportunidades associados à reorganização das cadeias produtivas e as dinâmicas geopolíticas associadas; bem como a avaliação da posição que o país ocupa neste mercado. Este capítulo se dedica a abordar brevemente esses pontos mencionados.

1.1. Bases conceituais do estudo

A essência da classificação de um material como crítico ou estratégico reside majoritariamente na importância econômica do mineral e no risco associado ao seu suprimento. O desequilíbrio entre oferta e demanda mineral, moldado por dinâmicas tecnológicas, econômicas e geopolíticas em contextos específicos, contribui para estabelecer essa classificação. À medida que as cadeias produtivas se reconfiguram, a percepção sobre quais materiais são considerados críticos também pode evoluir.

De forma geral, os minerais são classificados como **críticos** em função de sua importância para cadeias produtivas estratégicas e da restrição de sua oferta, seja pela concentração geográfica das reservas, pelo domínio de mercado de poucos fornecedores ou por fatores como instabilidades geopolíticas, eventos climáticos extremos, acidentes ambientais, limitações geológicas, pandemias e conflitos armados. Minerais são considerados **estratégicos** quando o país dispõe de reservas que atendem a setores produtivos com alta demanda interna ou externa, em virtude de sua relevância econômica e geopolítica.⁵

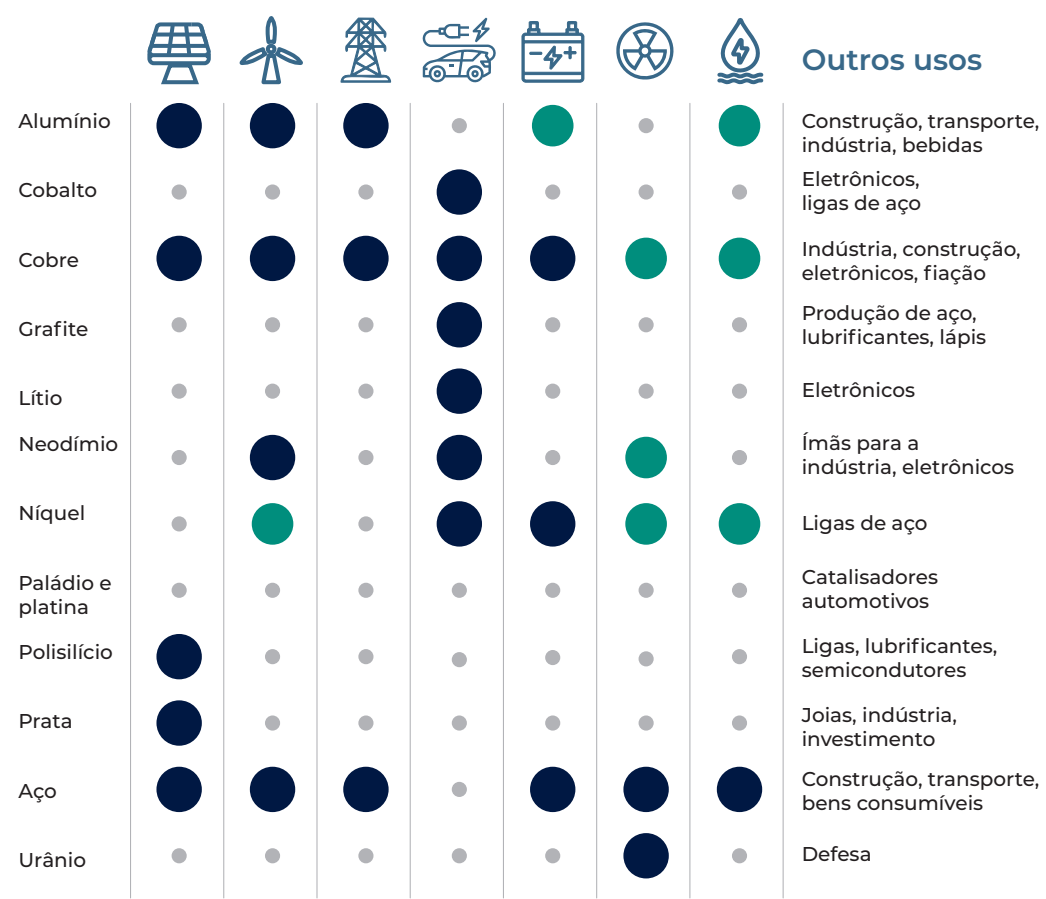
A avaliação da criticidade tende a variar de um país para o outro, a partir da análise dos riscos associados ao suprimento e das evoluções na demanda por esses recursos — impulsionadas por fatores como crescimento econômico, inovações tecnológicas e mudanças regulatórias. No âmbito doméstico, cada país ou bloco econômico define os MCE de forma distinta, tomando como referência seu contexto específico. Para citar alguns exemplos, o Serviço Geológico dos Estados Unidos apresentou em 2022 uma lista de 50 minerais críticos, e recentemente acrescentou 10 minerais adicionais nessa lista. A União Europeia (UE) apresenta em sua Lei de Matérias-Primas Críticas (Critical Raw Materials Act – CRMA, no inglês) uma lista de 34 “matérias-primas” críticas. Isso influencia diretamente nas políticas de incentivo e tratamento regulatório que uma nação dará a um mineral.

5. Ver IBRAM, 2025

A crescente dependência de minerais se traduz em riscos de interrupção nas cadeias de suprimento e na volatilidade dos preços. Para além da busca pela diversificação das fontes de suprimento, isso motiva também a procura por alternativas, incluindo reciclagem ou substituição.

A figura 1 evidencia, em mais detalhes, o grau de demanda de diferentes minerais críticos para a transição energética.

Figura 1. Grau de impacto da demanda das tecnologias da transição nos minerais críticos



Importância do material para tecnologia de energia limpa:

Alta Média Pouca/nenhuma demanda ou não aplicável

Nota: Aço estrutural e alumínio para veículos elétricos não estão incluídos como demanda de transição energética, pois isso não é uma demanda 'adicional', pois esses materiais também seriam usados em quantidades semelhantes em veículos com motores de combustão interna. Fonte: ETC, 2023⁶.

6. Disponível em: https://www.tatasustainability.com/pdfs/Resources/_ETC_Report.pdf

No contexto brasileiro, a EPE define um mineral crítico como um recurso essencial para a economia, cujo fornecimento está em risco e cuja ausência pode causar graves impactos econômicos, ambientais, de segurança e sociais.⁷ No entanto, atualmente, o Brasil não apresenta lista de minerais críticos, somente de materiais estratégicos.

A classificação de um mineral como estratégico segue três categorias definidas pela Resolução nº 2, de 2021, do Ministério de Minas e Energia (MME).⁸ Essa lista abrange uma vasta gama de elementos, distribuídos em três categorias detalhadas na tabela abaixo.

Tabela 1. Relação de minerais estratégicos para o Brasil, de acordo com os critérios apresentados no artigo 2º do Decreto 10.657/2021

I - Bens minerais dos quais o País depende de importação em alto percentual para o suprimento de setores vitais da economia	
1. Enxofre	3. Minério de Potássio
2. Minério de Fosfato	4. Minério de Molibdênio
II - Bens minerais que têm importância pela sua aplicação em produtos e processos de alta tecnologia	
1. Minério de Cobalto	9. Minério de Silício
2. Minério de Cobre	10. Minério de Tálio
3. Minério de Estanho	11. Minério de Tântalo
4. Minério de Grafita	12. Minério de Terras Raras
5. Minérios do Grupo da Platina	13. Minério de Titânio
6. Minério de Lítio	14. Minério de Tungstênio
7. Minério de Nióbio	15. Minério de Urânio
8. Minério de Níquel	16. Minério de Vanádio
III - Bens minerais que detêm vantagens comparativas e que são essenciais para a economia pela geração de superávit da balança comercial do País	
1. Minério de Alumínio	5. Minério de Ouro
2. Minério de Cobre	6. Minério de Manganês
3. Minério de Ferro	7. Minério de Nióbio
4. Minério de Grafita	8. Minério de Urânio

7. EPE. (2025). Minerais críticos e estratégicos para a transição energética. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-877/Caderno_Minerais_Final.pdf

8. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-lanca-relatorio-anual-do-comite-interministerial-de-analise-de-projetos-de-minerais-estrategicos/resolucao2CTAPME.pdf>

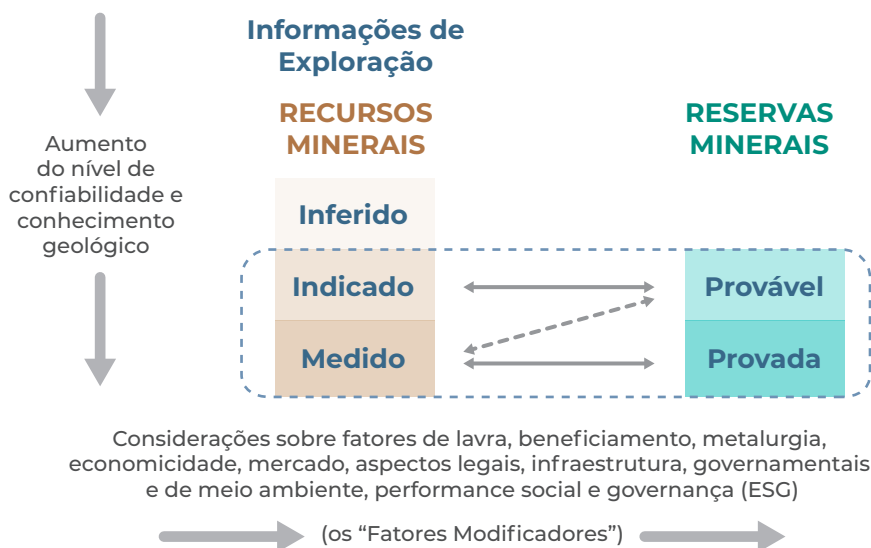
A partir da lista de minerais estratégicos brasileiros, cada instituição de pesquisa definiu seu próprio recorte analítico, de acordo com metodologias e enfoques específicos. Como mencionado anteriormente, o CETEM e o SGB consideraram os recursos em termos de dotação mineral, as reservas com viabilidade técnica e econômica de extração, além dos bens minerais associados às etapas de *midstream*, *downstream* e recuperação de materiais secundários (*recovery*). Já o Laboratório Cenergia estruturou sua análise com base na demanda por minerais utilizados em conversores energéticos, conforme detalhado na metodologia e na intensidade de materiais descritas nos Anexos A e B. Dessa forma, o escopo das listas de minerais examinados sob as perspectivas da oferta e da demanda varia para alguns minerais, refletindo as distintas abordagens de cada instituição.

Outra diferenciação conceitual relevante ocorre entre dotação mineral, recurso e reserva, que marcam etapas distintas do conhecimento geológico. A reserva mineral representa o primeiro estágio da definição da oferta, enquanto a dotação mineral refere-se à quantidade e diversidade dos recursos minerais disponíveis. A reserva é composta pelos recursos que podem ser extraídos conforme requisitos técnicos, econômicos e legais.

Tabela 2. Quadro conceitual dotação mineral, recurso e reserva

Dotação mineral	Refere-se a todo ao conjunto de minerais de um determinado espaço geográfico, seja ele conhecido ou não. Portanto, esse é o potencial geológico total, englobando tanto o recurso identificado quanto os minerais ainda não descobertos.
Recurso	Essa é a porção conhecida da dotação mineral. Refere-se ao conjunto de minerais cuja existência foi confirmada por estudos geológicos, porém inclui tanto a parte de comprovada viabilidade econômica quanto as que ainda não se é possível explorar.
Reserva	É a parte economicamente explorável dos recursos. Ou seja, essa é a fatia cuja extração é viável do ponto de vista econômico e técnico-tecnológico.

O recurso também pode ser dividido em inferido, indicado e medido, enquanto a reserva é classificada como provável e provada. Isso se conecta com o nível de confiabilidade do conhecimento geológico (vide figura 2).

Figura 2. Parâmetros de classificação de recursos minerais.

Fonte: CBRR, 2022⁹

Por fim, a definição dos conceitos de *upstream*, *midstream* e *downstream* na mineração é essencial para os fins deste relatório, sendo as três etapas principais da cadeia de valor das indústrias extrativas e energéticas. O *upstream* abrange as atividades iniciais, voltadas à exploração e produção de recursos naturais, como a prospecção geológica, extração e beneficiamento primário de minerais. O *midstream* envolve a logística e o processamento intermediário, incluindo transporte, armazenamento e refino parcial dos insumos, conectando os pontos de produção às unidades de transformação ou consumo. Já o *downstream* corresponde às etapas finais da cadeia, relacionadas à refinação, manufatura, distribuição e comercialização dos produtos finais de energia, metais e derivados. Em conjunto, esses três segmentos estruturam o percurso completo desde a origem do recurso até seu uso industrial ou consumo final.

1.2. Visão global da oferta e consumo mineral

A definição conceitual de um mineral crítico e estratégico ilustra a relevância de se abordar a disposição e as principais tendências dos fluxos globais desses minerais.

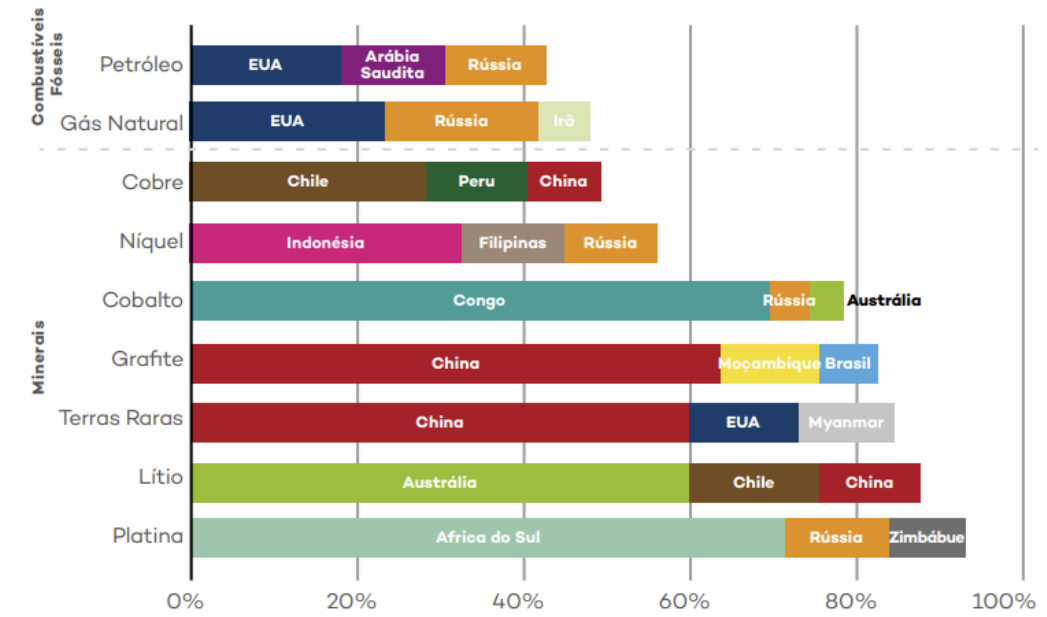
No quesito oferta, a Ásia é a maior região de mineração do mundo, tendo extraído cerca de 10 bilhões de toneladas métricas em 2017. Dados da IEA (2025) mos-

9. Comissão Brasileira de Recursos e Reservas – CBRR. 2022 Guia CBRR para declaração de resultados de exploração, recursos e reservas minerais.

tram que a maior parte da produção e refino de minerais críticos do continente ocorrem na China. Na extração e produção, a China possui uma participação global de 22% do lítio, 61% dos elementos terras raras (ETRs) e 87% da grafita. No refino, sua participação global chega a 44% do cobre, 70%–75% do processamento de lítio e cobalto e 90% do refino de ETRs e de grafite para bateria.¹⁰

Oceania, especialmente a Austrália, e América Latina, especialmente o Chile, contribuem de forma quase similar para a oferta de minerais globais. Já a África concentra aproximadamente 30% das reservas de minerais críticos mundiais, porém, enfrenta limitações nas infraestruturas para transporte, estudos geológicos, processamento e refino de minerais críticos, o que prejudica sua participação global.¹¹ Essa problemática, que é compartilhada com alguns países da América Latina, leva essas nações a focarem seus investimentos na indústria extrativa (*upstream*). Canadá, Estados Unidos (EUA) e Europa também possuem uma participação importante na produção mundial de minerais, com níveis de crescimento menores anuais quando comparados a outras regiões.

Figura 3. Participação dos três principais países produtores na produção total de minerais e petróleo e gás natural, 2019



Fonte: Adaptado a partir de IEA (2021)¹²

10. IEA. (2025). Global Critical Minerals Outlook 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>

11. FMI. (2024). Digging for Opportunity: Harnessing Sub-Saharan Africa's Wealth in Critical Minerals. Disponível em: <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/REO/AFR/2024/April/English/MineralsNote.ashx>

12. World Energy Outlook 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>

A figura acima demonstra a concentração geográfica dos minerais críticos. Segundo a UNECE (2024), mais de 75% desses recursos estão localizados na Austrália, China, Chile e República Democrática do Congo (RDC). Essa concentração geográfica também é acompanhada por um aumento da oferta global. De acordo com a IEA (2025), desde 2020, a taxa de crescimento da oferta de minerais utilizados na produção de baterias tem sido o dobro daquela observada no final da década de 2010. Em 2024, cerca de 90% desse crescimento foi impulsionado por um único fornecedor principal: a Indonésia, no caso do níquel, e a China, no caso do cobalto, do grafite e das terras raras.

Ainda segundo a IEA, o crescimento da oferta, liderado principalmente por China, Indonésia e alguns Estados africanos, tem superado o ritmo da demanda. Esse movimento se soma às incertezas econômicas e às flutuações do mercado que afetam os investimentos no setor. Em 2024, o investimento no desenvolvimento de minerais críticos enfraqueceu, crescendo apenas 5%, em comparação a 14% em 2023. Quando ajustado pela inflação de custos, o crescimento real foi de apenas 2%. Esses fatores têm exercido uma pressão de baixa sobre os preços de alguns minerais, especialmente cobalto, grafite, lítio, níquel e manganês.

No que tange à demanda, a China é o maior importador de minerais críticos. Segundo a IEA (2025), o país tem buscado garantir o acesso a esses insumos por meio de investimentos diretos em minas no exterior, realizados por empresas estatais com apoio político do governo. Em 2024, o setor de mineração também foi o segundo que mais recebeu financiamento chinês no âmbito da Nova Rota da Seda, somando 18% do total — cerca de USD 21,4 bilhões. O país depende em grande medida da RDC para o abastecimento de suas refinarias de cobalto. Thomas (2023) aponta que a RDC exporta mais de 80% de seu cobalto para a China.

Além da China, EUA, Europa e Japão também estão entre os principais consumidores. Em 2024, a IEA (2025) apontou que a demanda por lítio cresceu 30%, enquanto a demanda por níquel, cobalto, cobre, grafite e ETRs cresceu entre 3%–8%. Segundo esses mesmos dados, as tecnologias do setor energético contribuíram para 65%–90% do total do crescimento de demanda por minerais nos últimos dois anos.

Somada a essa dinâmica da oferta e demanda, outros fatores como o nível de estabilidade política e de eficiência dos processos de licenciamento, bem como segurança energética, impactam diretamente na lógica do mercado de minerais. Para os fins deste relatório, realizou-se uma análise comparativa dos marcos regulatórios, políticas e principais desafios à produção mineral

em 16 países com produção expressiva de minerais¹³. Entre as principais barreiras à produção encontradas destacam-se: falhas na coordenação entre governo federal e entes subnacionais; complexidade ou fragilidade regulatória; e instabilidades sócio-políticas. Essas barreiras são detalhadas no capítulo 5 deste relatório.

Esses desafios estruturais, somados à concentração geográfica dos minerais críticos, têm impulsionado uma série de desdobramentos internacionais sobre o tema. No eixo EUA–Europa, observa-se a defesa de estratégias de diversificação de parceiros e fontes de suprimento. Isso ficou evidente na Cúpula de Líderes do G7¹⁴ de 2025, quando os países-membros aderiram ao Plano de Ação para Minerais Críticos, comprometendo-se com uma diversificação responsável e sustentável das cadeias minerais. Na União Europeia, esse compromisso se articula com o Critical Raw Materials Act, que determina que nenhuma matéria-prima crítica tenha mais de 65% de seu consumo dependente de um único país extra-bloco.¹⁵

No contexto asiático, Steinhäuser (2025) destaca que a Nova Rota da Seda pode ser instrumento para a China expandir sua atuação nas cadeias globais de abastecimento mineral. Na América Latina, ganham força os debates sobre a crescente influência chinesa e sobre a necessidade de maior coordenação regional para a governança dos recursos. Na Oceania, a proibição da mineração em águas profundas surge como uma nova fronteira de disputa sobre os limites da exploração mineral. Por fim, no continente africano, além das políticas de nacionalismo mineral, a presidência sul-africana do G20¹⁶ tem colocado os minerais críticos e estratégicos como pilar central de sua agenda, visando lançar o G20 Critical Minerals Framework, que busca garantir que os recursos minerais críticos se tornem catalisadores do desenvolvimento sustentável.

A concentração das reservas, do processamento e do refino de minerais em poucos países — em um contexto de comércio internacional interdependente e de demanda crescente por esses materiais — pode tornar as cadeias de abastecimento vulneráveis a riscos geopolíticos, gerando disputas internacionais. Esse contexto é essencial para a análise do contexto e potencial brasileiro.

13. Os países analisados foram: Austrália, Argentina, Brasil, Canadá, Chile, China, EUA, Filipinas, Guiné, Índia, Indonésia, Madagascar, Mianmar, Peru, RDC e Rússia.

14. O G7 reúne as principais economias industrializadas — Alemanha, Canadá, Estados Unidos, França, Itália, Japão e Reino Unido — para coordenar políticas econômicas e discutir temas globais.

15. Parlamento Europeu. (2023). Critical Raw Materials Act. Disponível em: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747898/EPRS_BRI\(2023\)747898_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/747898/EPRS_BRI(2023)747898_EN.pdf)

16. O G20 é um fórum que integra 19 países e a União Africana e a União Europeia, representando a maior parte do PIB mundial, com foco em cooperação econômica e desenvolvimento sustentável.

1.3. A posição brasileira nos MCE

O setor mineral desempenha um papel estratégico na economia brasileira, sendo responsável por uma parcela significativa das exportações. Em 2024, o setor mineral brasileiro registrou um faturamento de R\$ 270,8 bilhões e um saldo na balança comercial de USD 34,9 bilhões, o que representou 47% do superávit da balança comercial do país¹⁷. De acordo com estudo do IPEA e do MME, a cadeia produtiva da economia mineral variou, nas últimas décadas, entre 2,5% e 4% do PIB brasileiro. Cerca de 90% desta participação diz respeito à atividade de extração do minério de ferro, aproximadamente 5% corresponde aos minerais não metálicos (calcário, argila e outros utilizados principalmente para a produção de cimento e cerâmica) e os 5% restantes aos minerais metálicos não ferrosos, nos quais se encontram os minerais críticos e estratégicos.

Essa produção é principalmente destinada à exportação. Segundo os dados do IBGE (2021), as exportações da indústria extrativa mineral representam cerca de 65% da demanda total, sendo os 35% restantes absorvidos pela demanda interna. Essas exportações são principalmente impulsionadas pelo minério de ferro, cujas exportações correspondem a cerca de 75% do total da demanda. No caso dos não metálicos, a demanda interna prevalece (94% do total), para usos na construção civil. Quanto aos metálicos não ferrosos, há um relativo equilíbrio entre exportações e demanda interna, sendo aproximadamente metade da demanda total absorvida internamente, e a outra metade externamente.

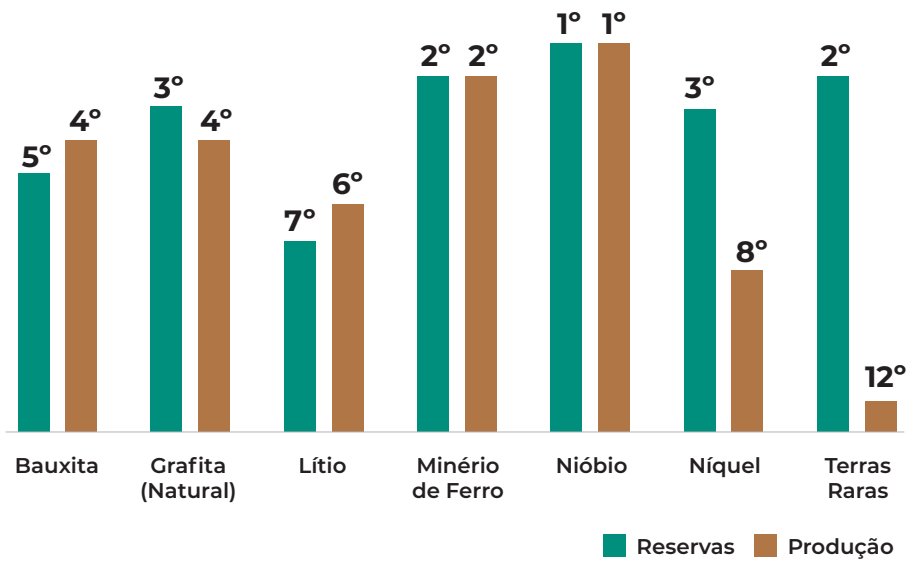
A despeito da participação relativamente limitada dos MCE nessa produção, eles possuem um papel fundamental para o futuro da indústria extrativa mineral, considerando as reservas existentes e o alto potencial de crescimento, conforme será destacado ao longo deste estudo.

O Brasil possui uma grande dotação mineral devido à sua geologia diversificada e território extenso, incluindo reservas naturais de ferro, ouro, cobre, níquel, alumínio, nióbio, entre outros. Quinze desses minerais concentram 99% do valor gerado pelos metálicos: alumínio, chumbo, cobre, columbita-tantalita, cromo, estanho, grafita, ferro, lítio, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco.

No cenário internacional, observa-se uma liderança brasileira em diversos desses recursos. A figura abaixo destaca a posição global do Brasil em volumes de reserva e produção dos minerais analisados no lado da oferta.

17. IBRAM. (2025). Setor mineral | 2024. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/02/DADOS_Setor-Mineral_2024_5FEV2025.pdf

Figura 4. Posição global do Brasil para volumes de reserva e produção dos minerais do estudo



Fonte dos dados: USGS, 2025¹⁸.

As regiões Sudeste e Centro-Oeste concentram parte significativa da produção mineral brasileira, com destaque para ferro, grafita, níquel e nióbio, além do único empreendimento em produção de ETRs no país. Essa concentração reflete tanto a geologia favorável quanto o alto grau de maturidade logística e industrial dessas áreas. No Sudeste, sobressaem o Quadrilátero Ferrífero e o distrito carbonatítico de Araxá (MG), enquanto no Centro-Oeste, sobretudo no norte de Goiás, destacam-se operações de níquel, bauxita e ETRs. O Vale do Jequitinhonha (MG), por sua vez, emerge como um novo polo estratégico, impulsionado pela expansão das operações de lítio.

No restante do país, o Norte abriga grandes empreendimentos integrados aos corredores de exportação, como Carajás e Porto Trombetas (PA), voltados à produção de ferro, cobre e bauxita. Já o Nordeste conta com projetos ativos de níquel, cobre, ferro e lítio, além de um empreendimento com cobalto como coproduto, e minas de grafita natural na Bahia. Essa distribuição territorial evidencia a diversidade geológica e reforça o potencial do país para integrar cadeias globais de valor, contribuindo para a transição energética, a inovação tecnológica e o desenvolvimento sustentável ancorado em seus recursos minerais estratégicos.

Apesar da diversidade e volume das reservas identificadas, o processo produtivo é caracterizado, para maioria dos minerais, com produção concentrada nos

18. USGS Mineral Commodity Summary 2025 - <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>

estágios de *upstream* e *midstream*, poucos avançam para o *downstream* da cadeia de valor. Desta forma, a exportação de *commodities* e importação de bens acabados é a prática corrente para maior parte dos bens minerais analisados. Esse é o principal desafio atual para destravar o potencial brasileiro no setor de minerais.

Outros desafios incluem lacunas no mapeamento geológico, altos custos operacionais decorrentes do chamado “Custo Brasil”, entraves regulatórios e conflitos socioambientais, que limitam a competitividade e a atração de investimentos. Por outro lado, iniciativas recentes de modernização regulatória, incentivos econômicos e fortalecimento da governança estadual indicam caminhos promissores. Estes são alguns gargalos e oportunidades que serão aprofundados nos Capítulos 5 e 6.

Ao analisar a atual inserção brasileira no comércio internacional de minerais, observa-se uma distribuição geográfica diversificada, com destaque para países emergentes e economias industrializadas que exercem papel estratégico nas cadeias globais. Essa configuração evidencia tanto o alinhamento do Brasil às demandas de grandes polos consumidores asiáticos e europeus quanto o potencial de fortalecimento das parcerias Sul-Sul no setor mineral. No lado das exportações, alguns dos principais parceiros brasileiros são Alemanha, Argentina, Canadá, China, Coreia do Sul, Estados Unidos, Japão, Malásia, Países Baixos, Suíça. No âmbito subnacional, em 2024, os estados com maior valor exportado foram Bahia, Ceará, Espírito Santo, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Rio de Janeiro e São Paulo.¹⁹

Já do lado das importações, entre os principais parceiros comerciais estão África do Sul, Alemanha, Argentina, Chile, China, Estados Unidos, Índia, México, Peru e Rússia.²⁰ Apesar das vantagens comparativas em minerais como nióbio e ferro, o Brasil ainda depende fortemente da importação de alguns minerais para setores vitais, como os agrominerais para fertilizantes. Essa vulnerabilidade ficou evidente em 2022, quando o conflito entre Rússia e Ucrânia colocou em risco a cadeia de abastecimento global — um impacto significativo para o Brasil, que importava cerca de 85% dos fertilizantes consumidos, sendo 23% provenientes da Rússia.²¹

Em síntese, o Brasil encontra-se em uma posição estratégica no cenário dos MCE, combinando vasto potencial geológico com crescente atenção internacional à diversificação de cadeias de suprimento e à transição energética. No

19. Dados de exportação retirados do Comex Stat (2024)

20. Dados de importação retirados do Comex Stat (2024)

21. G1. (2022). Guerra na Ucrânia: por que o Brasil depende tanto dos fertilizantes da Rússia? Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2022/03/03/guerra-na-ucrania-por-que-o-brasil-depender-tanto-dos-fertilizantes-da-russia.ghtml>

entanto, o aproveitamento pleno desse potencial depende da superação de desafios estruturais e da construção de uma estratégia nacional que una competitividade econômica, sustentabilidade e inclusão social. Os próximos capítulos buscam contribuir para a reflexão estratégica sobre o tema ao analisar a oferta e demanda de minerais críticos e estratégicos e evidenciar gargalos a serem superados e caminhos concretos para que o Brasil avance nesse processo.



2.

Oferta

Esse estudo detalha a oferta de lítio, grafita, ETRs, níquel, nióbio, cobre, minério de ferro, cobalto e bauxita, como exemplo de minerais críticos e estratégicos para a transição energética. A análise abrangente sobre a dotação nacional desses recursos posiciona o Brasil como um país detentor de reservas relevantes e com potencial para exercer papel significativo na transição energética global. A oferta brasileira desses minerais pode se ampliar nos próximos anos em razão de novos recursos, reservas ou insumos produzidos. Neste estudo a avaliação da oferta mineral teve como base os recursos na forma de dotação mineral, as reservas resultantes dos recursos que apresentam viabilidade técnica e econômica para a extração, bem como os bens minerais produzidos nos estágios de *midstream*, *downstream* e recuperação de materiais secundários (*recovery*).

As seções a seguir apresentam as principais características de produção de cada um dos minerais selecionados, incluindo a dotação mineral, principais projetos, cadeia de valor e estimativa de teor de minério contido no recurso. As oportunidades para desenvolvimento das cadeias de minerais prioritários são descritas no Capítulo 6 deste relatório.

2.1. Grafita

A grafita é uma forma cristalina do carbono com estrutura hexagonal. Tem como principais características sua alta estabilidade e alta condutividade elétrica e térmica, resistência química e térmica, baixa densidade e elevada estabilidade estrutural. É amplamente utilizada em diversos setores industriais, na forma de: eletrodos na produção de aço em fornos elétricos; refratários em

fornos de alta temperatura para siderurgia, fundição e produção de cimento; componentes mecânicos, como vedações, mancais e escovas de motores elétricos; reforço na composição de plásticos e borrachas. No contexto da transição energética, a grafita desempenha um papel central, especialmente nas tecnologias de armazenamento de energia.

Dotação Mineral da Grafita no Brasil

O Brasil produziu 66.300 toneladas de concentrado de grafita em 2023 e 68.000 toneladas em 2024, aumentando sua produção em 2.6%. Em face de um grande potencial, a produção de grafita no Brasil tem significativo espaço para desenvolvimento, com a expectativa de que o investimento no setor aumente nos próximos anos.

A região da Província Bahia-Minas é uma das maiores produtoras de grafita do mundo. A mina de Santa Cruz, localizada no sul da Bahia, iniciou sua produção em 2024 com capacidade de 12.000 toneladas de concentrado de grafita por ano, com potencial de expansão para 50.000 toneladas por ano nas próximas fases. Outras regiões, como a Província Gráfica Ceará Central, o Cráton Amazônico, o Cinturão Araguaia, o Cinturão Paraguai e o Cinturão Brasília têm potencial ainda inexplorado para a produção de grafita (SGB-CPRM, 2025).

As principais reservas de grafita estão localizadas nos estados de Minas Gerais, Bahia e Ceará. A longo prazo, o Brasil oferece perspectivas atraentes para a exploração de grafita, considerando sua crescente demanda e a posição do Brasil como o quarto maior produtor mundial de grafita.

No Brasil, a grafita é encontrada principalmente em ambientes metamórficos²², como os Cinturões Orogênicos Proterozóicos. O grau de cristalização e a qualidade do minério são influenciados pelo metamorfismo e as condições de temperatura e pressão.

Principais Projetos e Empresas no Brasil

Os principais depósitos brasileiros estão representados no mapa e listados na tabela a seguir:

22. Ambientes metamórficos são contextos geológicos em que as rochas preexistentes sofrem transformações físicas e químicas devido a altas temperaturas, pressões e/ou presença de fluidos químicos ativos.

Figura 5. Mapa com localização dos principais depósitos de grafita



Tabela 3. Principais depósitos de grafita no Brasil

DEPÓSITO	EMPRESA	RECURSOS	TEOR (TGC)	STATUS
Mina Itapecerica	Nacional de Grafite Ltda.	209,59 Mt	9,79%	Produção
Mina Mateus Leme	Grafita MG Ltda.	91,67 Mt	14%	Produção
Mina Maiquinique	Extrativa/Grafite do Brasil	33,3 Mt	9,6%	Produção
Mina Pedra Azul	Nacional de Grafite Ltda.	19.07 Mt	12,59%	Produção
Peresópolis	Lucra Minerals Ltda.	40 Mt	14%	Pesquisa
Porto Nacional	Di Castro's Construtora Ltda.	49,7 Mt	5,3%	Pesquisa
Mina de Salto da Divisa	Nacional de Grafite Ltda.	232,6 Mt	25%	Produção
Santa Cruz ¹	South Star Mining Corp.	14,9 Mt	2,29%	Pesquisa
Santa Terezinha	Mineração de Calcário Montevidiu Ltda.	7,50 Mt	6,33%	Pesquisa

CG = Concentrado de Grafita. TGC = Total Graphitic Carbon. Fonte: 1 - South Star, 2020; SGB, 2025.

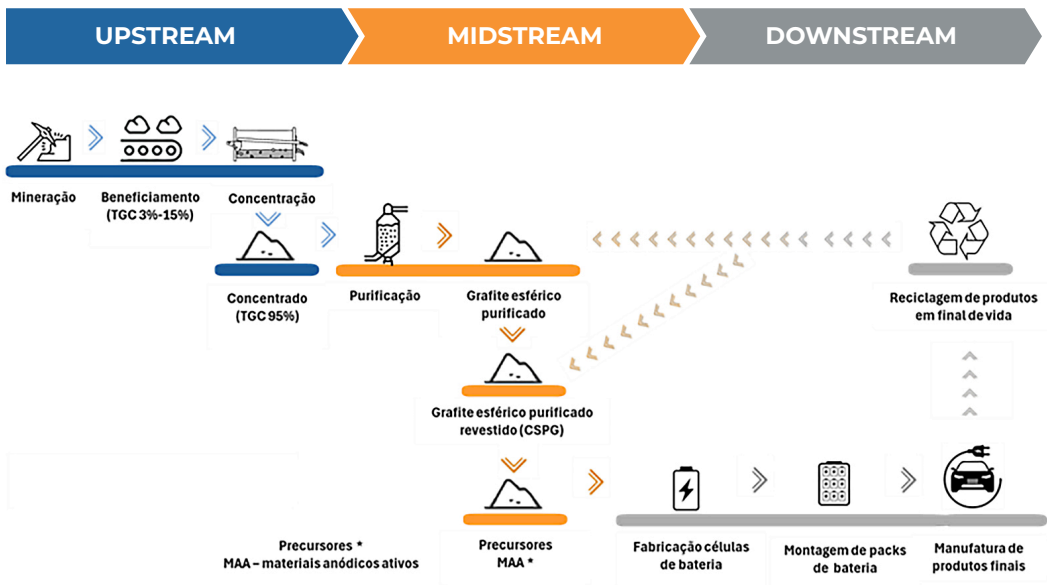
Cadeia de Valor

A cadeia produtiva do grafite natural desde a mina até a produção de baterias de íons de lítio, compreende seis etapas principais: extração mineral, beneficiamento, purificação, esferoidização, recobrimento superficial e produção do material ativo de ânodo (Active Anode Material – AAM).

As etapas de extração e beneficiamento compõem o setor *upstream* da cadeia voltada à indústria de baterias. Em geral, o minério extraído apresenta de 3 a 15% de teores médios de carbono grafítico total (TGC). Por meio de técnicas convencionais de beneficiamento mineral, como britagem, moagem, separação gravimétrica e flotação, o TGC alcança níveis entre 80% e 95%.

No entanto, para atender aos padrões rigorosos exigidos para aplicações em ânodos de baterias, é necessário um processo adicional de purificação, de modo a elevar a pureza do material para, no mínimo, 95% TGC. Os processos de purificação, esferoidização e recobrimento são considerados pertencentes ao setor *midstream*. O produto final dessas etapas, o grafite esferoidal recoberto, é diretamente utilizado como material ativo no ânodo de baterias (material anódico ativo - MAA).

Figura 6. Cadeia de valor da grafita



Estimativa de teor de carbono grafítico total contido no recurso

O carbono grafítico total contido nos recursos declarados para os depósitos em produção é de 97,10 Mt, mais 8,25 Mt em depósitos em fase de pesquisa, totalizando 105,35 Mt.²³

Tabela 4. Cálculo de carbono grafítico contido no recurso²⁴

DEPÓSITO	EMPRESA	STATUS	RECURSO (Mt)	TEOR (TGC) (%)	CARBONO GRAFÍTICO TOTAL (Mt)
Mina Itapecerica	Nacional de Grafite Ltda.	Produção	209,59	9,79	20,52
Mina Mateus Leme	Grafita MG Ltda.	Produção	91,67	14,00	12,83
Mina Maiquinique	Extrativa/Grafite do Brasil	Produção	33,30	9,60	3,20
Mina Pedra Azul	Nacional de Grafite Ltda.	Produção	19,07	12,59	2,40
Mina de Salto da Divisa	Nacional de Graphite Ltda.	Produção	232,60	25,00	58,15
Santa Cruz*	South Star Mining Corp.	Pesquisa	14,90	2,29	0,34
Peresópolis	Lucra Minerals Ltda.	Pesquisa	40,00	12,00	4,80
Porto Nacional	Di Castro's Construtora Ltda.	Pesquisa	49,70	5,30	2,63
Santa Terezinha	Mineragéo de Calcério Montevidiu Ltda.	Pesquisa	7,50	6,33	0,47
Mina São Benedito	São Benedito	Interrompida	2,09	57,43	1,20
TOTAL					105,35

Reciclabilidade

Em geral, a grafita não é recuperada no processo de reciclagem de baterias de íons de lítio, que normalmente visa à recuperação dos elementos de maior valor econômico. No entanto, a recuperação da grafita é possível, tanto a partir de baterias quanto de materiais refratários, sendo este material reutilizado em aplicações como pastilhas de freio e isolamento térmico.

23. Cabe ressaltar que esses cálculos foram realizados a partir do total de recursos informados, desconsiderando perdas nos processos de beneficiamento. Para mais informações, ver Anexo A — Metodologia.

24. O cálculo abrangeu as fases de pesquisa e produção, desconsiderando as reservas atualmente inativas.

Substituibilidade

A grafita natural pode ser parcialmente substituída por materiais sintéticos ou alternativos em diversas aplicações industriais. O pó de grafita sintética, os resíduos de formas usinadas descartadas e o coque de petróleo calcinado competem entre si como insumos na produção de ferro e aço. Tanto o pó de grafita sintética quanto a grafita sintética secundária, proveniente da usinagem de blocos de grafita, também disputam aplicação no setor de baterias.

Em aplicações de moldagem na fundição, o coque finamente moído combinado com olivina surge como um potencial concorrente. Já o dissulfeto de molibdênio é utilizado como lubrificante seco, competindo com a grafita nesse segmento, embora apresente maior sensibilidade a ambientes oxidantes.

2.2. Lítio

O lítio (Li) é um metal alcalino essencial à transição energética por seu papel central na produção de baterias recarregáveis para veículos elétricos e sistemas de armazenamento. Suas propriedades — baixa densidade, alto potencial eletroquímico e elevada reatividade — conferem desempenho superior às tecnologias de energia limpa. Embora tenha sido tradicionalmente utilizado em cerâmicas, vidros, lubrificantes e produtos farmacêuticos, hoje cerca de 87% de sua demanda global é destinada à fabricação de baterias, refletindo a rápida expansão da eletromobilidade e da digitalização da economia (USGS, 2025).

Dotação Mineral do Lítio no Brasil

O Brasil emerge em seu potencial para se tornar um player global na produção de lítio nos próximos anos. Em 2023, o país produziu 5.260 toneladas, e no ano passado produziu 10.000 toneladas de Li contido, um aumento de 90% em relação a 2023. Com reservas totais estimadas em 1.37 milhões de toneladas (MME, 2025), o país ocupa a sétima posição no ranking global, detendo 4.4% do montante global. Já os recursos são da ordem de 1.3 milhões de toneladas (USGS, 2025).

No Brasil, o lítio é encontrado principalmente na forma de depósitos de pegmatito de lítio-césio-tântalo (LCT). O principal minério é o espodumênio, seguido de amblygonita, petalita e lepidolita (SGB, 2025).

Principais Projetos e Empresas no Brasil

Os principais depósitos brasileiros estão representados no mapa e listados na tabela a seguir:

Figura 7. Mapa com localização dos principais depósitos de lítio



Tabela 5. Principais depósitos de lítio no Brasil

DEPÓSITO	EMPRESA	RECURSOS	TEOR (Li ₂ O)	STATUS
Nezinho do Chicão - Lavra do Meio (NDC-LDM) ¹	Sigma Lithium Resources	38,4 Mt	1,41 %	Pesquisa
Barreiro ¹	Sigma Lithium Resources	25,6 Mt	1,36 %	Pesquisa
Projeto Bandeira ²	Lithium Ionic Corp	23,68 Mt	1,34 %	Pesquisa
Volta Grande/Nazareno ³	AMG	20,29 Mt	1,06 %	Produção
Xuxa ¹	Sigma Lithium Resources	14,7 Mt	1,55 %	Produção
Murial ¹	Sigma Lithium Resources	14,6 Mt	1,28 %	Não explorado
Salinas - Baixa Grande ⁴	Lithium Ionic Corp	6,52 Mt	1,11 %	Não explorado
Mina da Cachoeira	Companhia Brasileira de Lítio	4,5 Mt	1,40 %	Produção

Itinga - Outro Lado ⁵	Lithium Ionic Corp	2,97 Mt	1,46 %	Não explorado
Seridozinho - Mina Velha	Miranda Mineração Ltda	ND	ND	Produção intermitente
Mina da Samambaia	Sigma Lithium Resources	ND	ND	Fechado/Exaurido
Mina da Tesoura	Mina da Tesoura	ND	ND	Fechado/Exaurido

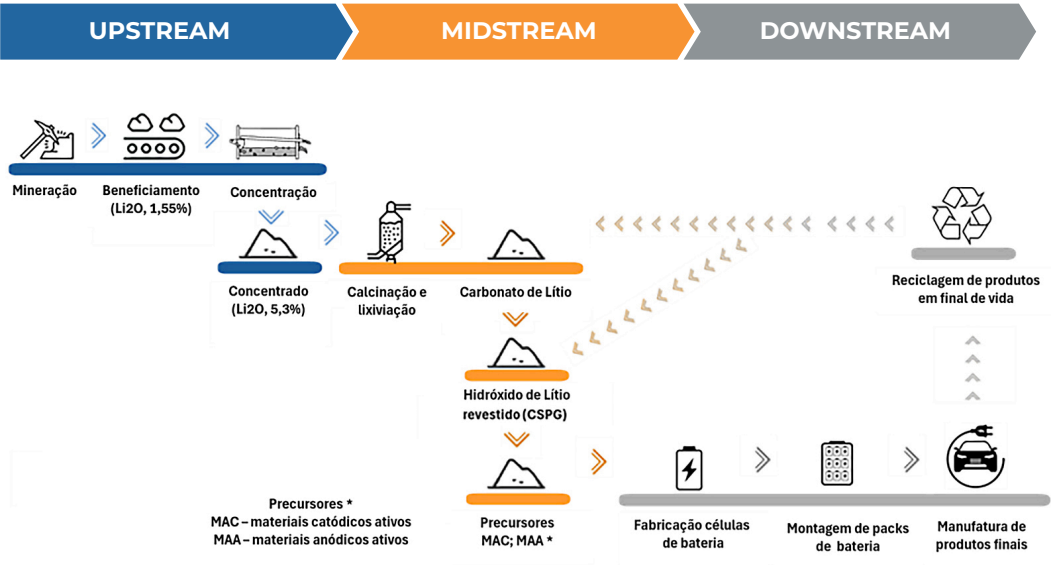
Fontes: 1 - Sigma Lithium Resources, 2025; 2- Lithium Ionic, 2024a; 3- AMG, 2017; 4- Lithium Ionic, 2024b; 5- Lithium Ionic, 2023.

Cadeia de valor

A cadeia de valor do lítio para baterias de íons de lítio tem início na mineração de minerais portadores, principalmente o espodumênio. Embora esse mineral contenha até 8% de Li_2O , seus concentrados comerciais variam entre 4% e 6%. O beneficiamento envolve cominuição, separação em meio denso, flotação e concentração magnética ou gravimétrica, resultando em concentrados que seguem para calcinação e lixiviação ácida ou alcalina, convertendo o lítio em compostos solúveis — como sulfato, carbonato ou cloreto. No Brasil, a rota mais comum inclui a conversão em sulfato de lítio (Li_2SO_4) com ácido sulfúrico antes da purificação e precipitação final.

Após a purificação, técnicas de troca iônica, evaporação e cristalização são empregadas para produzir compostos de alta pureza — carbonato (Li_2CO_3), cloreto (LiCl) e hidróxido (LiOH) — utilizados como precursores para materiais catódicos. Entre os principais compostos empregados em baterias destacam-se o fosfato de ferro-lítio (LiFePO_4), o óxido de manganês-lítio (Li_2MnO_4) e o óxido de cobalto-lítio (LiCoO_2). O processamento e o refino do lítio, entretanto, envolvem altos custos operacionais devido ao uso intensivo de reagentes importados, como barrilha e ácido sulfúrico, além da necessidade de pureza química compatível com o padrão “grau bateria”.

Figura 8. Cadeia de valor de lítio



Estimativa de teor de lítio contido no recurso

A tabela 6 apresenta os fatores de conversão entre compostos e minerais de lítio, utilizados para estimar o conteúdo no recurso do elemento em sua forma equivalente de carbonato de lítio (LCE – *lithium carbonate equivalent*). Essa unidade padronizada expressa a quantidade total de lítio contido em um depósito convertida teoricamente em carbonato de lítio, permitindo comparações diretas entre diferentes relatórios e estudos do setor. A conversão para LCE considera recuperação total do lítio contido, desconsiderando perdas nos processos de extração e beneficiamento. As reservas e recursos de lítio, portanto, são frequentemente reportados em toneladas de LCE ou de lítio metálico (Li).

Tabela 6. Fatores de conversão entre compostos e minerais de lítio

ORIGEM	CONVERTER PARA Li	CONVERTER PARA Li ₂ O	CONVERTER PARA Li ₂ CO ₃	CONVERTER PARA LiOH.H ₂ O
Lítio metálico (Li)	1,000	2,153	5,325	6,048
Óxido de lítio (Li ₂ O)	0,464	1,000	2,473	2,809
Carbonato de lítio (Li ₂ CO ₃)	0,188	0,404	1,000	1,136
Hidróxido de lítio monohidratado (LiOH.H ₂ O)	0,165	0,356	0,880	1,000
Fluoreto de lítio (LiF)	0,268	0,576	1,424	1,618

Com base nesses fatores de equivalência, a tabela 7 apresenta o cálculo da estimativa do lítio contido no recurso, a partir da qual é possível estimar o potencial de produção de baterias de íon-lítio (tabela 8), conforme a composição média de cada tipo de química de bateria (tabela 9). Esses cálculos representam um cenário teórico máximo, no qual todo o lítio disponível seria destinado à produção de baterias.

Tabela 7. Cálculo da estimativa de lítio contido no recurso

DEPÓSITO	EMPRESA	STATUS	RE-CUR-SOS (Mt)	TEOR (Li ₂ O%)	CON-CEN-TRADO - TEOR (Li ₂ O%)	EFICIÊNCIA DO PRO-CESSO DE CON-CEN-TRAÇÃO (%)	CONCEN-TRADO DE ESPODU-MÊNIO 5,3% Li ₂ O (Mt)	Li ₂ O (Mt)	LCE (Mt)	LiOH·H ₂ O (Mt)	Li (Mt)
Volta Grande	AMG	Produção	20,29	1,06	5,2	80	3,31	0,17	0,43	0,48	0,08
Xuxa	Sigma Lithium Resources	Produção	14,7	1,55	5,2	80	3,44	0,18	0,45	0,5	0,08
Mina da Cachoeira	Com-panhia Brasileira de Lítio	Produção	4,5	1,4	5,2	80	0,97	0,05	0,12	0,13	0,02
Total em produção			39,49	1,34	5,2	80	7,72	0,4	1	1,13	0,19
Nezinho do Chicão - Lavra do Meio (NDC-LDM)	Sigma Lithium Resources	Pesquisa	38,4	1,41	5,2	80	8,33	0,43	1,07	1,21	0,2
Barreiro	Sigma Lithium Resources	Pesquisa	25,6	1,36	5,2	80	5,36	0,27	0,67	0,76	0,13
Projeto Bandeira	Lithium Ionic Corp	Pesquisa	23,68	1,34	5,2	80	4,88	0,24	0,6	0,69	0,11
Total em pesquisa			87,68	1,37	5,2	80	18,57	0,97	2,39	2,69	0,44
Murial	Sigma Lithium Resources	Não explorado	14,6	1,28	5,2	80	3,58	0,19	0,47	0,53	0,09
Salinas - Baixa Grande	Lithium Ionic Corp	Não explorado	6,52	1,11	5,2	80	1,11	0,06	0,15	0,17	0,03
Itinga - Outro Lado	Lithium Ionic Corp	Não explorado	2,97	1,46	5,2	80	0,67	0,03	0,09	0,1	0,02
TOTAL			151,26				30,94	1,61	3,39	4,49	0,74
Dados USGS para Reserva Brasil			0,39	1,55	5,2	80	0,09	0	0,01	0,01	0

Tabela 8. Cálculo de kwh potencial a partir do total de lítio contido no recurso

CATODO	LFP	LMO	LMNNO	NMCTII	NMC532	NMC622	NMC811	NMC955	NCA	MÉDIA
Li (kg por kwh)	0,08	0,08	0,08	0,11	0,1	0,1	0,09	0,09	0,09	0,091
kwh para oferta de lítio (O, 74Mt)	9,27x10	9,27x10	9,27x10	6,74x10	7,42x10	7,42x10	8,24x10	8,24x10	8,24x10	8,124x10

Tabela 9. Cálculo da estimativa de lítio contido no recurso

TECNOLOGIAS		LFP	LMO	LMNNO	NMCTII	NMC532	NMC622	NMC811	NMC955	NCA
Catodo	Li	0,08	0,08	0,08	0,11	0,1	0,1	0,09	0,09	0,09
	Ni			0,34	0,32	0,45	0,52	0,61	0,82	0,66
	Mn		1,37	0,97	0,33	0,27	0,18	0,08	0,04	
	Co				0,32	0,18	0,17	0,08	0,04	0,13
	Fe	0,68								
	P	0,38								
Anodo (0% Si)	Grafite	1	0,85	0,85	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
	Si									
Anodo (2% Si)	Grafite	0,84	0,71	0,71	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Si	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Anodo (10% Si)	Grafite	0,48	0,41	0,41	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
	Si	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Reciclabilidade

O lítio é infinitamente reciclável, e sua recuperação a partir de baterias de íons de lítio vem aumentando com a implantação de instalações de reciclagem em diversas partes do mundo. Os processos hidrometalúrgicos são considerados os mais promissores para a recuperação do lítio. No entanto, também é possível recuperar esse elemento por meio da lixiviação da escória gerada em processos pirometalúrgicos (amplamente utilizados na recuperação de cobalto e níquel). Apesar das perdas associadas, o teor de lítio presente nas baterias e, inclusive, na escória, é comparável ou até superior ao encontrado no espodumênio (Kresse et al., 2025; Brückner et al., 2020).

Substituibilidade

Diversas tecnologias de baterias vêm sendo pesquisadas e desenvolvidas como alternativas às baterias de íons de lítio (LIBs), oferecendo soluções promissoras para o armazenamento de energia. Entre essas alternativas, destacam-se as baterias de íons de sódio (SIBs), íons de magnésio (MIBs) e íons de zinco (ZIBs), além de tecnologias emergentes como as baterias de estado sólido e as baterias de fluxo redox (RFBs) (Stephan et al., 2023).

Algumas dessas tecnologias alternativas apresentam potencial significativo para aplicações específicas, em função de propriedades técnicas, econômicas ou ambientais. No entanto, a maioria ainda se encontra em estágios iniciais de maturidade tecnológica, apresentando limitações quanto à estabilidade operacional, desempenho consistente e viabilidade de escalonamento industrial. Além disso, a adoção em larga escala dessas tecnologias dependerá do desenvolvimento de infraestrutura produtiva adequada, bem como da consolidação de cadeias de suprimento robustas. Essas condições são essenciais para permitir a produção em volumes compatíveis com demandas energéticas da ordem de gigawatts-hora (GWh).

Diante desse panorama, projeta-se que as LIBs continuarão a desempenhar um papel dominante no futuro próximo. Espera-se, contudo, uma crescente diversificação do mercado de baterias, caracterizada pela coexistência de múltiplas tecnologias, cada uma voltada a aplicações específicas e complementares às LIBs.

2.3. Elementos Terras Raras: neodímio (Nd), praseodímio (Pr), disprosio (Dy) e térbio (Tb)

Dentre os 17 ETRs, quatro foram selecionados para este estudo: neodímio (Nd), praseodímio (Pr), disprosio (Dy) e térbio (Tb). Esses elementos são essenciais para a transição energética, pois integram a composição ETRs magnéticos utilizados na produção de ímãs permanentes, fundamentais para o funcionamento de motores de veículos elétricos, geradores de turbinas eólicas, entre outras tecnologias de baixo carbono.

Dotação Mineral no Brasil

De acordo com o Panorama do Potencial Brasileiro de Minerais Críticos e Estratégicos (SGB-PDAC, 2025), as principais ocorrências brasileiras de ETRs estão

associadas a rochas alcalinas-carbonatíticas, e ao manto de intemperismo²⁵ de rochas graníticas:

- **Rochas alcalinas-carbonatíticas:** Poços de Caldas (MG), Araxá (MG), Catalão (GO), Tapira (MG), Seis Lagos (AM), entre outros.
- **Rochas graníticas:** Pela-Ema (GO), Bluebush (TO), Iporá (GO), Capão Bonito (SP), Pitinga (AM), entre outros.

Outros tipos de ocorrência incluem:

- **Depósitos sedimentares:** Itapemirim (ES), São Francisco do Itabapoana (RJ)

Destaque especial deve ser dado ao depósito de Pela-Ema, em Minaçu-GO, operado pela Serra Verde Mineração, o primeiro empreendimento em operação no Brasil para extração de ETRs a partir de argilas de adsorção iônica (IAC) — tipo de depósito também comum no sul da China.

A empresa planeja produzir 5.000 toneladas de óxidos de ETR (TREO) na primeira fase do projeto. As reservas publicadas somam cerca de 300 Mt de argilas com teor médio de 0,15% de ETR+Ítrio.

Principais Projetos e Empresas no Brasil

Os principais depósitos de ETRs estão representados no mapa e listados na tabela a seguir:

25. Intemperismo refere-se às alterações físicas e químicas a que estão sujeitas as rochas e minerais na superfície da Terra

Figura 9. Mapa com localização dos principais depósitos de ETRs



Tabela 10. Principais depósitos de ETRs no Brasil²⁶

DEPÓSITO	EMPRESA	RECURSOS	TEOR (TREO*)	STATUS
Pela Ema	Serra Verde Pesquisa e Mineração	911 Mt ¹	1200 ppm ¹	Produção
Carina	Aclara Resources	298 Mt ²	1452 ppm ²	Pesquisa
Ema	Brazilian Critical Minerals	943 Mt ³	716 ppm ³	Pesquisa
PCH Project	Appia Rare Earth & Uranium	46,2 Mt ⁴	2.888 ppm ⁴	Pesquisa

26. A tabela apresentada não tem por objetivo listar todas as ocorrências de ETR no Brasil, mas sim destacar os projetos considerados mais relevantes. Para essa seleção, foram avaliados principalmente a robustez das informações de recursos e teores divulgadas em releases de bolsas ou em relatórios corporativos, o nível de avanço dos empreendimentos — incluindo estudos de licenciamento e a situação dos processos minerários na ANM — e a importância histórica ou estratégica de determinados depósitos. A inclusão de todos os depósitos conhecidos ampliaria excessivamente a tabela e comprometeria seu caráter sintético.

Caldeira	Meteoric Resources NL	1108 Mt ⁵	2413 ppm ⁵	Pesquisa
Colossus	Viridis Mining	201 Mt ⁶	2.590 ppm ⁶	Pesquisa
Araxá	St George Mining	40,6 Mt ⁷	4,13 % ⁷	Pesquisa
Rocha da Rocha/ Amargosa	Brazilian Rare Earths	40,6 Mt ⁷	4,13 % ⁷	Pesquisa
Bluebush	Alvo Minerals	510,3 Mt	1513 ppm	Pesquisa
Apuí	Brazilian Critical Minerals	-	-	Pesquisa
Pitinga	Mineração Taboca	-	-	Pesquisa
Bom Futuro	Canada Rare Earth	-	-	Pesquisa
Corrente	Axel REE Limited	-	-	Pesquisa
Iporá	Alvo Minerals	-	-	Pesquisa
Itiquira	Axel REE Limited	-	-	Pesquisa
Catalão II	CMOC Brasil	-	-	Pesquisa (subproduto)
Coda	Enova Mining	-	-	Pesquisa
Capão Bonito	PVW Resources	-	-	Pesquisa
Juquiá	Enova Mining	-	-	Pesquisa
Caladão	Axel REE Limited	-	-	Pesquisa
Itapemirim	-	-	-	Inativo
São Francisco do Itabapoana	-	-	-	Inativo

*T.R.E.O.: Total Rare Earth Oxides. Fontes - 1: Serra Verde Mineração (2016); Pinto-Ward (2017); 2: Aclara Resources (2023), (2025); 3: Brazilian Critical Minerals (2025); 4: Appia Rare Earths and Uranium Corp, 2024; 5: Meteoric Resources NL (2025); 6: Viridis Mining and Minerals Ltd. (2024); 7: St George Mining Limited (2024).

Cadeia de valor

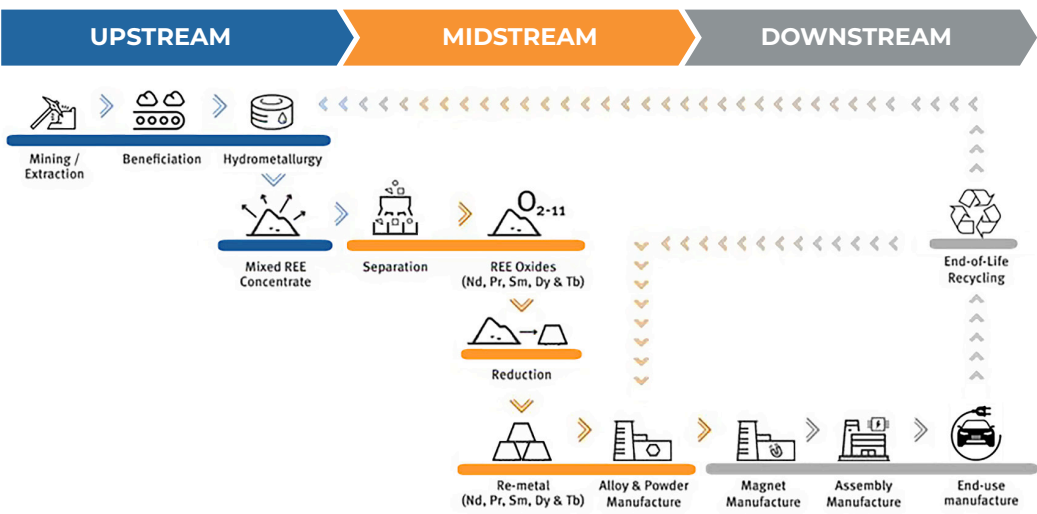
A cadeia de valor de ETR no Brasil tem início na mineração das argilas iônicas. Em depósitos iônicos, os elementos de ETR não se apresentam como minerais distintos, mas estão adsorvidos nas superfícies das partículas de argila, por meio de ligações iônicas. Para extração de ETR, a argila é submetida a uma etapa de lixiviação, sais de sódio e de amônio têm se mostrado especialmente eficazes para a troca iônica, liberando ETR para a fase aquosa. Durante a etapa de lixiviação, no entanto, ocorre a liberação concomitante de outros cátions, como alumínio e ferro, o que compromete a pureza do lixiviado. A eficiência de extração do processo de lixiviação varia entre os íons de ETR e de acordo com o método empregado.

A solução lixiviada, enriquecida com os complexos de ETR, é então submetida à precipitação química em soluções alcalinas como hidróxido de sódio ou de

amônio, convertendo os íons de ETR em hidróxidos insolúveis.

Após a precipitação, os hidróxidos mistos de ETR são coletados por filtração e lavados para remoção de impurezas residuais. Esses precipitados podem então ser submetidos a processos adicionais de separação e refino, visando a obtenção dos óxidos individuais de cada elemento de terra rara. Os óxidos separados são convertidos em sua forma metálica por meio de redução metalotérmica ou por processos eletrolíticos.

Figura 10. Cadeia de valor de ETR



Estimativa de teor de TREO contido no recurso

A tabela 11 apresenta a estimativa de óxidos mistos de ETR totais, sem considerar as perdas no processo de extração e precipitação. O conteúdo contido de Óxidos Totais de ETR (TREO) totais a partir dos recursos declarados para os depósitos em produção e em pesquisa é de 6,3 milhões de toneladas.

A recuperação de ETR a partir do minério é limitada pela tecnologia atual e pelas práticas industriais, situando-se entre 50% e 80% (McNulty et al., 2022). A eficiência de extração dos ETR varia significativamente tanto entre os métodos de recuperação empregados, quanto entre diferentes elementos, devido a diferenças em suas propriedades químicas, como raios iônicos e densidade de carga, que influenciam a intensidade da interação com os reagentes de extração. Além disso, alguns elementos apresentam baixa abundância nos minérios de ETR, o que torna sua extração ainda mais desafiadora (Azimi, 2025). Deste

modo, não foram realizados cálculos de estimativa de conteúdo contido dos óxidos de ETR separados.²⁷

Tabela 11. Cálculo da estimativa de TREO contido no recurso²⁸

DEPÓSITO	Tipo depósito	EMPRESA	STATUS	RECURSOS (Mt)	TREO* (ppm)	TREO (Kt)
Pela Ema	IAC (granitoide)	Serra Verde Pesquisa e Mineração	Produção	911	1200	1093,20
Carina	IAC (granitoide)	Aclara Resources	Pesquisa	298	1452	432,70
Ema	IAC (vulcânicas félsicas)	Brazilian Critical Minerals	Pesquisa	943	716	675,19
PCH Project	IAC (granitoide)	Appia Rare Earth & Uranium	Pesquisa	46,2	2888	133,43
Caldeira	IAC (alcalina)	Meteoric Resources NL	Pesquisa	1108	2413	2673,60
Colossus	IAC (alcalina)	Viridis Mining	Pesquisa	201	2590	520,59
Araxá	Complexo alcalino	St George Mining	Pesquisa	40,6	4,13	0,17
Rocha da Rocha/Amargosa	IAC (alcalina)	Brazilian Rare Earths	Pesquisa	510,3	1513	772,08
TOTAL				4058,1		6300,96

Reciclabilidade

ETRs secundários podem ser recuperados a partir da reciclagem de resíduos eletrônicos, como placas de circuito impresso (PCBs), painéis de telefones celulares, ímãs permanentes de NdFeB, lâmpadas fluorescentes exauridas, baterias do tipo níquel-hidreto metálico (NiMH), entre diversas outras fontes. Diferentes tecnologias têm sido desenvolvidas e investigadas para esse fim, destacando-

27. Cabe ressaltar que esses cálculos foram realizados a partir do total de recursos informados, desconsiderando perdas nos processos de beneficiamento. Para mais informações, ver Anexo A — Metodologia.

28. Os processos químicos utilizados para a separação e purificação dos elementos de terras raras são complexos e de alto custo. Isso ocorre porque esses elementos geralmente são encontrados juntos nos minérios e extraídos em conjunto, o que pode resultar em um desequilíbrio no mercado — com excesso de oferta de alguns elementos e escassez de outros —, tornando a economia de produção mais difícil de gerenciar. A presença de maiores teores de elementos desejáveis e valiosos, ou a ausência de outros elementos menos valiosos e contaminantes, pode tornar a extração mais econômica e tecnicamente viável. Por outro lado, minérios com baixas concentrações desses elementos ou com impurezas complexas tornam o processo de extração mais caro e menos vantajoso, podendo até inviabilizar o projeto. Entre os elementos de terras raras, o neodímio é o mais demandado, seguido pelo cério e pelo lantânio.

-se os processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e, mais recentemente, métodos baseados em extração por solventes.

Substituibilidade

Os ETR apresentam propriedades elétricas, magnéticas, químicas e físicas singulares, que os tornam fundamentais para tecnologias avançadas, como na fabricação de ímãs permanentes de alta performance, dispositivos optoeletrônicos, lasers, catalisadores, sensores e componentes eletrônicos de alta eficiência.

O crescente risco associado à concentração da produção global desses elementos, aliado a preocupações ambientais e à volatilidade de preços, tem estimulado a pesquisa e o desenvolvimento de materiais alternativos. Algumas dessas soluções já demonstram viabilidade técnica e industrial. Um exemplo promissor são as ligas à base de ferro e nitrogênio, como o ferro-nitreto, que apresentam propriedades magnéticas comparáveis ou superiores às dos ímãs com ETR, sendo compostas por elementos abundantes e de menor custo.

Outro desenvolvimento relevante é a tetraenita, uma liga de ferro e níquel com magnetismo permanente. Embora originalmente encontrada apenas em meteoritos, avanços recentes permitiram sua síntese em laboratório, abrindo possibilidades para uso comercial em substituição parcial a ímãs à base de neodímio ou samário.

Além da substituição direta por materiais funcionais alternativos, também estão em curso estratégias de redesenho tecnológico, nas quais dispositivos e sistemas são projetados ou adaptados para eliminar, ou ao menos reduzir, a necessidade de ETRs sem comprometer o desempenho técnico.

2.4. Níquel

O níquel é um metal de transição, cujas principais características são a resistência à corrosão, tenacidade e ductilidade, sendo essencial na produção de ligas metálicas. Cerca de 65% da demanda global de níquel é destinada à produção de aços inoxidáveis.

Os usos do níquel são variados, com aplicação nas indústrias química, naval e alimentícia. É utilizado em ligas com cromo, ferro e cobre, empregadas em turbinas aeronáuticas, usinas termoelétricas, e equipamentos de petróleo e gás, devido à sua capacidade de resistir a altas temperaturas e pressões. Tem uso na galvanoplastia, como revestimento protetor ou decorativo para metais, por sua

aparência brilhante e resistência à oxidação. Em setores tecnológicos, integra indústrias de defesa, aeroespacial e nuclear. É também um insumo essencial para catodos de baterias recarregáveis de alta densidade energética.

Dotação Mineral no Brasil

O Brasil produziu 82.7 mil toneladas de níquel em 2023 e 77 mil toneladas em 2024, e está entre os dez maiores produtores globais do bem mineral. Contém reservas de 16 Milhões de toneladas, sendo o terceiro país do mundo em volume de reservas, ficando atrás apenas da Indonésia (1º) e da Austrália (2º) (USGS, 2025).

Atualmente, o Brasil dispõe de quatro minas em operação e vários prospectos em diferentes estágios exploratórios. O minério de níquel é extraído tanto de depósitos sulfetados quanto de lateríticos.

O níquel de classe I, caracterizado por sua alta pureza, é o mais utilizado na produção de baterias recarregáveis. Embora seja comumente obtido a partir de depósitos sulfetados, devido à maior eficiência dos processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos aplicados a esse tipo de minério, essa relação não é uma regra, mas sim uma tendência tecnológica e econômica.

Já o níquel de classe II, de menor pureza, é geralmente proveniente de minérios lateríticos, que possuem teores mais baixos e são economicamente viáveis para aplicações que não exigem pureza tão elevada, como a produção de aço inoxidável. Com o avanço das tecnologias de processamento, contudo, é possível que no futuro também se produza níquel de classe I a partir de minérios lateríticos.

Os depósitos brasileiros são, em sua maioria, de níquel laterítico, com projetos em operação no Pará, Goiás e Bahia.

Principais Projetos e Empresas no Brasil

Os principais depósitos brasileiros estão representados no mapa e listados na tabela a seguir:

Figura 11. Mapa com localização dos principais depósitos de níquel



Tabela 12. Principais depósitos de níquel no Brasil

DEPÓSITO	MINÉRIO	EMPRESA	RECURSOS (Mt)	TEOR (Ni) %	STATUS
Americano do Brasil	Ni, Cu, Co	Prometálica Mineração Centro Oeste S.A.	3,09	ND	Inativo
Araguaia	Ni, Co, Fe, MgO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃	Horizonte Minerals	132,3	1,26%	Inativo
Barro Alto	Ni	MMG Limited	23,8	1,21 %	Produção
CODEMIN (Niquelândia)	Ni	MMG Limited	2,5	1,25 %	Produção
Fortaleza de Minas (O'Toole)	Ni, Cu, Co	ND	45,45	ND	Inativo
Itapitanga	Ni, Co, Sc	Centaurus Metals	40	0,95 %	Pesquisa
Jacaré	Ni, Co	MMG Limited	99,7	1,31 %	Pesquisa

Jaguar	Ni, Cu, Co	Centaurus Metals	112,6	0,87 %	Pesquisa
Lagoa Grande	Ni, Cu, Co	CBPM	405	0,16 %	Pesquisa
Liberdade (Morro do Corisco)	Ni	ND	1	ND	Inativo
Limoeiro	Ni, Cu, Pt	CBA	35	ND	Pesquisa
Luanga	EGP, Au, Ni	Bravo Mining Corp.	236	0,12%	Pesquisa
Caboclo dos Mangueiros	Ni, Cu, Co	Bahia Nickel	200	ND	Pesquisa
Morro do Engenho	Ni, Co, Sc	SGB-CPRM	67,24	1,07 %	Não explorado
Morro do Leme	Ni, Fe, SiO ₂ , MgO	Anglo American Níquel Brasil Ltda.	18	1,73 %	Pesquisa
Morro do Níquel	Ni	ND	2,3	1,5 %	Inativo
Morro Sem Boné	Ni, Fe, SiO ₂ , MgO	Anglo American Níquel Brasil Ltda.	40,3	1,79 %	Pesquisa
Mundial Carapanã	Ni	ND	30	1,4 %	Pesquisa
Níquelândia	Ni, Co	CBA	55	0,94 %	Inativo
Onça-Puma 1	Ni, Co, Fe, SiO ₂ , MgO	Vale Base Metals	142,5	1,45%	Produção
Piauí Níquel	Ni, Co	Brazilian Nickel Ltda.	98,8	0,84 %	Pesquisa
Santa Fé	Ni, Co, Sc	SGB-CPRM	39,73	1,14 %	Não explorado
Santa Rita (Fazenda Mirabela)	Ni, Cu, Co	Atlantic Nickel/ CBPM	255,1	0,5 %	Produção
Vermelho (V1 e V2)	Ni, Co, Fe ₂ O ₃ , MgO ₂ , SiO ₂	Horizonte Minerals	148,8	1,05 %	Inativo
Santa Maria e Santa Cruz	Ni, Co	ND	ND	ND	Inativo

Fontes: 1 - Vale S.A. 2024

Cadeia de Valor

A cadeia de valor dos minérios sulfetados é direcionada principalmente ao processamento de níquel eletrolítico. O beneficiamento tem início na concentração do minério. Em seguida o material concentrado passa por uma etapa de oxidação do enxofre, realizada em fornos do tipo flash ou retangulares, resultando na formação do matte, uma liga metálica composta predominantemente por sulfetos. A escória gerada nesse processo é tratada separadamente em forno elétrico, visando à recuperação de sulfetos residuais. O matte pode ser comercializado como produto intermediário ou seguir para o refino, onde sofre ataque ácido (com H₂SO₄) para solubilização dos metais. Posteriormente, utiliza-se a extração por solventes (SX) e eletrólise para a obtenção dos cátodos metálicos, como níquel e cobalto. Os metais residuais são precipitados e direcionados a tratamentos específicos.

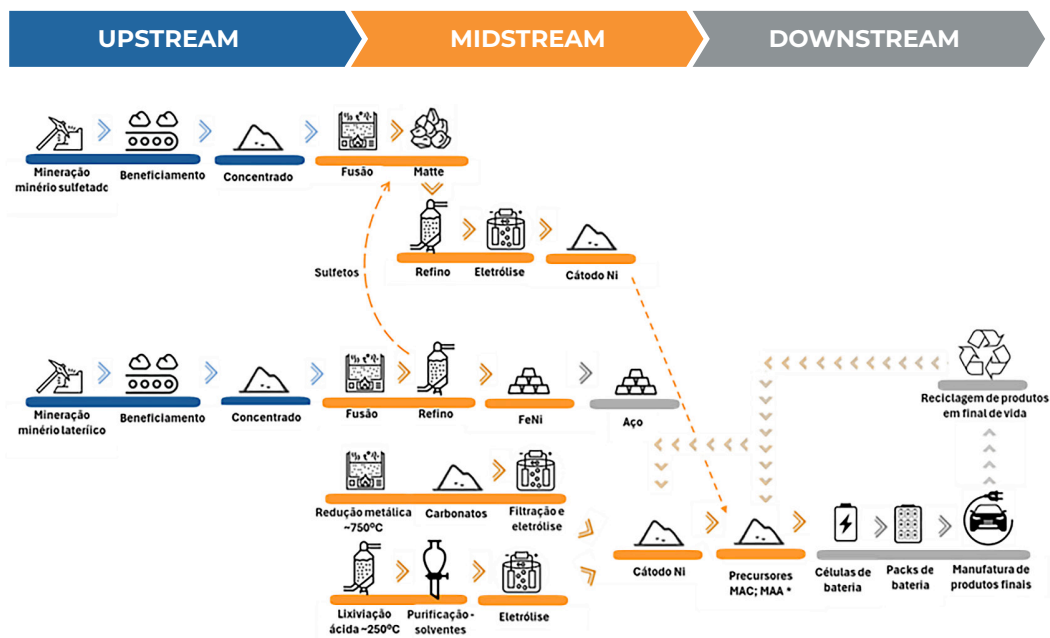
Os minérios lateríticos são mais utilizados para a produção de ferro-níquel e níquel eletrolítico, através de três rotas principais: pirometalurgia, hidrometalurgia e lixiviação ácida sob pressão (PAL – Pressure Acid Leach).

No processo pirometalúrgico o minério passa por britagem e fusão em fornos elétricos. O metal obtido passa por refino, com remoção de impurezas como enxofre e fósforo. Em certos casos, o enxofre pode ser reaproveitado para a produção de matte, tratado posteriormente conforme a rota dos minérios sulfetados.

Na rota hidrometalúrgica, o minério é britado, moído, seco e reduzido em fornos verticais, formando carbonatos metálicos que passam por etapas de filtração e eletrólise, resultando em cátodos de níquel.

No processo PAL, o minério passa por britagem e lavagem, sendo conduzido à lixiviação ácida sob temperatura e pressão elevadas (cerca de 250 °C). O licor obtido após a decantação é purificado por extração por solventes para recuperar cobalto e, posteriormente, níquel. A etapa final envolve a eletrólise, da qual se obtêm os cátodos metálicos.

Figura 12. Cadeia de valor de níquel



Estimativa de de teor de níquel contido no recurso

O teor contido de níquel nos recursos declarados para os depósitos em produção é de 3,66 milhões de toneladas. Somando todos os depósitos declarados (produção, pesquisa, não explorados e inativos) o total teórico de níquel é de 12,77 milhões de toneladas. Ressaltando que a estimativa foi calculada desconsiderando as perdas no processo.

Tabela 13. Cálculo da estimativa de níquel contido no recurso^{29 30}

DEPÓSITO	EMPRESA	STATUS	MINÉRIO	RECURSO (Mt)	TEOR (Ni) %	Ni (Mt)
Barro Alto	Anglo American Níquel Brasil Ltda.	Produção	Ni	23,8	1,21	0,29
CODEMIN (Niquelândia)	Anglo American Níquel Brasil Ltda.	Produção	Ni	2,5	1,25	0,03
Onça-Puma ¹	Vale Base Metals	Produção	Ni, Co, Fe, SiO ₂	142,5	1,45	2,07
Santa Rita (Fazenda Mirabela)	Atlantic Nickel/ CBPM	Produção	Ni, Cu, Co	255,1	0,5	1,28
Araguaia	Horizonte Minerals	Pesquisa	Ni, Co, Fe, MgO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃	132,3	1,26	1,67
Itapitanga	Centaurus Metals	Pesquisa	Ni, Co, Sc	40	0,95	0,38
Jacaré	Anglo American Níquel Brasil Ltda.	Pesquisa	Ni, Co	99,7	1,31	1,31
Jaguar	Centaurus Metals	Pesquisa	Ni, Cu, Co	112,6	0,87	0,98
Lagoa Grande	CBPM	Pesquisa	Ni, Cu, Co	405	0,16	0,65
Limoeiro	CBA	Pesquisa	Ni, Cu, Pt	35	ND	
Luanga	Bravo Mining Corp.	Pesquisa	EGP, Au, Ni	236	0,12	0,28
Caboclo dos Mangueiros	Bahia Nickel	Pesquisa	Ni, Cu, Co	200	ND	
Morro do Leme	Anglo American Níquel Brasil Ltda.	Pesquisa	Ni, Fe, SiO ₂ , MgO	18	1,73	0,31
Morro Sem Boné	Anglo American Níquel Brasil Ltda.	Pesquisa	Ni, Fe, SiO ₂ , MgO	40,287	1,79	0,72
Mundial Carapanã	ND	Pesquisa	Ni	30	1,4	0,42
Piauí Níquel	Brazilian Nickel Ltda.	Pesquisa	Ni, Co	98,8	0,84	0,83
Vermelho (V1 e V2)	Horizonte Minerals	Pesquisa	Ni, Co, Fe ₂ O ₃ , MgO ₂ , SiO ₂	148,8	1,05	1,56
Morro do Engenho	SGB-CPRM	Não explorado	Ni, Co, Sc	67,24	1,07	0,72
Santa Fé	SGB-CPRM	Não explorado	Ni, Co, Sc	39,73	1,14	0,45

29. O cálculo abrangeu as fases de pesquisa e produção, desconsiderando as reservas atualmente inativas.

30. Cabe ressaltar que esses cálculos foram realizados a partir do total de recursos informados, desconsiderando perdas nos processos de beneficiamento. Para mais informações, ver Anexo A — Metodologia.

Americano do Brasil	Prometálica Mineração Centro Oeste S.A	Inativo	Ni, Cu, Co	3,09	ND	
Fortaleza de Minas (O'Toole)	ND	Inativo	Ni, Cu, Co	45,45	ND	
Liberdade (Morro do Corisco)	ND	Inativo	Ni	1	ND	
Morro do Níquel	ND	Inativo	Ni	2,3	1,5	0,03
Niquelândia	CBA	Inativo	Ni, Co	55	0,94	0,52
Santa Maria e Santa Cruz	ND	Inativo	Ni, Co	ND	ND	
TOTAL PRODUÇÃO					3,66	
TOTAL PESQUISA					9,11	
TOTAL GERAL					12,77	

Reciclabilidade

O níquel pode ser reciclado completamente e repetidamente sem perda de qualidade, o que o torna um material valioso para a economia circular. Seu valor intrínseco impulsiona elevadas taxas de reciclagem, com uma parcela significativa dos produtos que contêm níquel — especialmente o aço inoxidável, sendo recuperada e reutilizada ao fim de sua vida útil.

Atualmente, estima-se que cerca de 68% do níquel utilizado em aços inoxidáveis e outros produtos metálicos seja reciclado. Outra importante fonte de níquel secundário é a reciclagem de baterias de íons de lítio. O valor do metal garante que uma parte expressiva dos produtos contendo níquel seja efetivamente coletada e direcionada à reciclagem.

Substituibilidade

O níquel pode ser parcialmente substituído em algumas aplicações, principalmente por razões econômicas, ambientais e de segurança de suprimento.

Em aços inoxidáveis, pode ser substituído por manganês, nitrogênio ou cobre, embora com perda de desempenho. Em superligas de alta temperatura, elementos como molibdênio, tungstênio, cobalto e tântalo são alternativas, mas geralmente mais caros ou difíceis de processar. Em baterias, especialmente com o avanço das tecnologias LFP (lítio-ferro-fosfato), busca-se reduzir a dependência do níquel, apesar da menor densidade energética. Já em catalisadores, cobalto e ródio podem atuar como substitutos em condições específicas.

Embora existam alternativas parciais, a combinação única de propriedades do níquel dificulta sua substituição completa em aplicações críticas, mantendo-o como um metal estratégico em diversas indústrias.

2.5. Nióbio

O nióbio (Nb) é um elemento estratégico amplamente utilizado na produção de ligas metálicas de alto desempenho, especialmente nas indústrias siderúrgica e aeroespacial. Sua principal aplicação é como aditivo em aços especiais, nos quais quantidades muito pequenas (geralmente <0,1%) aumentam significativamente a resistência mecânica, a soldabilidade e a resistência à corrosão.

Na transição energética, o nióbio contribui para a fabricação de estruturas mais leves e resistentes, como turbinas eólicas, chassis de veículos elétricos e oleodutos de alta pressão.

Dotação Mineral no Brasil

O Brasil detém as maiores reservas mundiais de nióbio, concentradas principalmente em Araxá, Minas Gerais, onde está localizada a maior mina do mundo, operada pela CBMM.

As ocorrências estão majoritariamente associadas a carbonatitos (Araxá, Catalão), complexos alcalinos (Seis Lagos), e granitos tipo A (Pitinga). Em Equador (RN), o nióbio ocorre em pegmatitos da Província Pegmatítica da Borborema.

A mina de Araxá, operada pela CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração) e St George Mining Ltd, é a maior produtora mundial de ferronióbio, com capacidade de produção superior a 100 mil toneladas por ano de óxidos equivalentes. A empresa é responsável por cerca de 80% da produção global. O teor médio do minério de Araxá é de aproximadamente 0,68% de Nb_2O_5 (St George Mining Ltd, 2025).

As minas de Catalão (Mina I e Mina II), em Goiás, são operadas pela CMOC International, com produção de ferronióbio a partir de mineralizações em carbonatito, cujos recursos são estimados em 148,9 milhões de toneladas (~1,02% Nb_2O_5) e 156,6 milhões de toneladas (~0,34 % Nb_2O_5) (CMOC Group Limited, 2025).

Principais Projetos e Empresas no Brasil

Os principais depósitos brasileiros estão representados no mapa e listados na tabela a seguir:

Figura 13. Mapa com localização dos principais depósitos de nióbio



Tabela 14. Principais depósitos de nióbio no Brasil

DEPÓSITO	EMPRESA	RECURSOS	TEOR (Nb ₂ O ₅)	STATUS
Araxá	CBMM	41,2 Mt ¹	0,68 % ¹	Produção
Catalão I	CMOC	148,9 Mt ²	1,02 % ²	Produção
Catalão II	CMOC	156,6 Mt ²	0,34 % ²	Produção
Seis Lagos	Taboca (Minsur)	28,3 Mt ³	2,97% ³	Pesquisa
Equador	Summit Minerals / Power Minerals	N.A.	até 30,34% ⁴	Pesquisa
Pitinga	Mineração Taboca	N.A.	N.A.	Produção (coproduto do Sn)
Santa Anna	Edem + Power Minerals	N.A.	3,36% ⁵	Pesquisa

Fontes: 1- St George Mining Ltd (2025); 2- CMOC Group Ltd (2024); 3- Bento et al. (2022); 4- Summit Minerals (2024); 5- Power Minerals (2024)

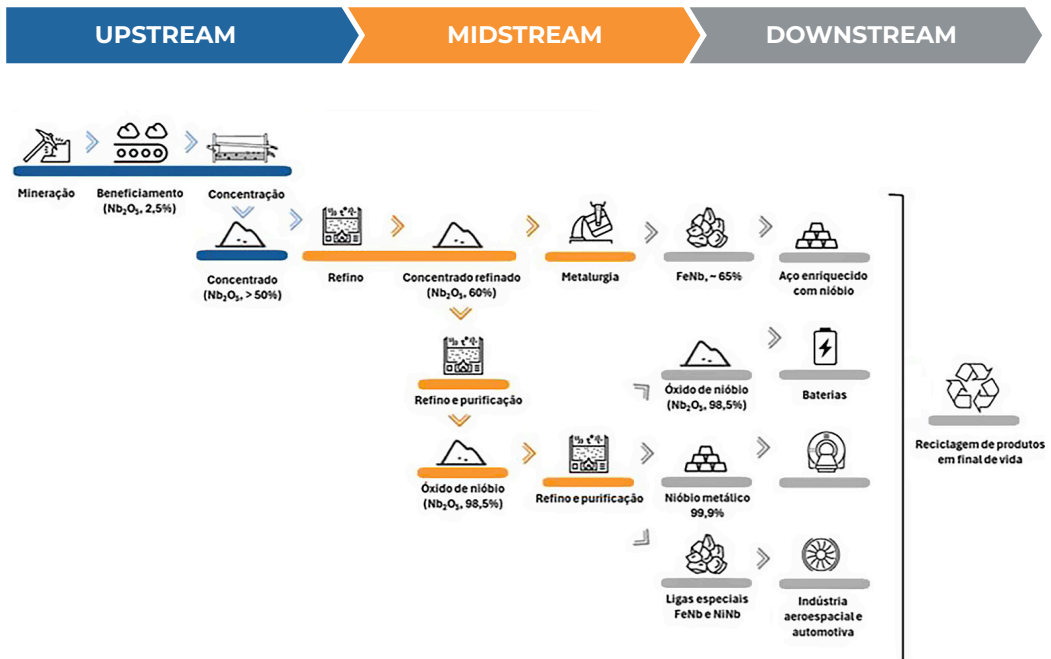
Cadeia de Valor

O pirocloro é o principal mineral para a extração de nióbio no Brasil. A cadeia de valor do nióbio tem início na mineração. Na sequência o minério passa por etapas de homogeneização e concentração e é refinado para remoção de impurezas. O concentrado refinado (Nb_2O_5 , 60%) pode passar por uma etapa de metalurgia ou por mais uma etapa de refino para produzir, respectivamente: i) ferro nióbio (FeNb) e ii) óxido de nióbio de alta pureza.

O FeNb é britado, classificado e comercializado para todo o mundo, sendo insumo, sobretudo para a fabricação de aço enriquecido de nióbio.

O óxido de nióbio de alta pureza é utilizado por diferentes rotas para a produção de: iii) óxidos de nióbio grau óptico (99,5%), utilizados na produção de lentes ópticas, células de hidrogênio e baterias, entre outras aplicações; iv) ligas especiais de ferronióbio e níquel nióbio, grau vácuo, insumo para as indústrias aeroespacial e automotiva; v) nióbio metálico (99,9% Nb), muito utilizado em aparelhos de ressonância magnética e aceleradores de partículas.

Figura 14. Cadeia de valor do nióbio



O domínio brasileiro sobre a cadeia produtiva do nióbio, desde a mineração até o beneficiamento e exportação de ligas de alto valor agregado, reforça o papel estratégico do país no suprimento global desse recurso crítico.

Estimativa de teor de nióbio contido no recurso

O conteúdo de pentóxido de nióbio (Nb_2O_5) nos recursos declarados para os depósitos em produção e em pesquisa é de 3,17 Mt. Esse total corresponde a produção teórica de 3,50 Mt de ferronióbio (FeNb) ou 2,22 Mt em nióbio metálico (Nb). Ressaltando que a estimativa foi calculada desconsiderando as perdas no processo.

Tabela 15. Cálculo da estimativa de nióbio contido no recurso³¹

DEPÓSITO	EMPRESA	STATUS	RECURSO (Mt)	TEOR (Nb_2O_5) %	Nb_2O_5 (Mt)	FeNb (Mt)	Nb (Mt)
Araxá	CBMM	Produção	41,2	0,68	0,28	0,31	0,20
Catalão I	CMOC	Produção	148,9	1,02	1,52	1,68	1,06
Catalão II	CMOC	Produção	156,6	0,34	0,53	0,59	0,37
Pitinga	Mineração Taboca	Produção (coproduto do Sn)	N.A.	N.A.			
Seis Lagos	Taboca (Minsur)	Pesquisa	28,3	2,97	0,84	0,93	0,59
Equador	Summit Minerals / Power Minerals	Pesquisa	N.A.	30,34			
Santa Anna	Edem + Power Minerals	Pesquisa	N.A.	3,36			
TOTAL					3,17	3,50	2,22

Reciclabilidade

A reciclagem secundária de nióbio, especialmente em ligas com baixos teores, é desafiadora devido à dificuldade de separação e recuperação do metal. O processo de reciclagem de nióbio junto com o aço, embora comum, resulta em uma diluição do nióbio na nova liga, dificultando a obtenção de concentrações adequadas para aplicações específicas.

31. Cabe ressaltar que esses cálculos foram realizados a partir do total de recursos informados, desconsiderando perdas nos processos de beneficiamento. Para mais informações, ver Anexo A — Metodologia.

Substituibilidade

Embora o nióbio apresente propriedades únicas, como elevada resistência mecânica, excelente soldabilidade e estabilidade térmica, há outros metais e materiais que podem atuar como substitutos em determinadas aplicações, especialmente na produção de aços e ligas de alta resistência. Entre os principais substitutos estão o vanádio, o titânio e o tântalo, além de aços microligados e outras ligas avançadas que incorporam esses elementos.

Ainda que existam substitutos viáveis, o equilíbrio entre desempenho mecânico, resistência à corrosão, custo e viabilidade de processamento faz com que o nióbio continue sendo um elemento estratégico em diversas aplicações industriais e tecnológicas.

2.6. Cobre

O cobre (Cu) é considerado um dos primeiros metais manuseados e trabalhados pela humanidade, com uso documentado há mais de 10 mil anos. No mundo contemporâneo, é um dos minerais mais estratégicos, sendo fundamental para a transição energética, a digitalização da economia e a infraestrutura moderna. Devido a propriedades físico-químicas como elevada condutividade elétrica e térmica, maleabilidade e ductilidade, e resistência à corrosão, o cobre é um insumo fundamental para tecnologias de energia limpa.

Dotação Mineral no Brasil

O Brasil apresenta uma ampla variedade de tipos de depósitos de cobre, associados principalmente a mineralizações sulfetadas e oxidadas. Os principais minerais de minério incluem calcopirita, calcosita e bornita nos depósitos sulfetados, e malaquita nos depósitos oxidados.

As maiores reservas e produções nacionais estão concentradas na província mineral de Carajás (PA), onde predominam depósitos do tipo IOCG (Iron Oxide–Copper–Gold), como o da mina Salobo, operadas pela Vale. Esses depósitos apresentam teores médios em torno de 0,6% de cobre e respondem pela maior parte da produção brasileira.

Em Goiás, ocorrem depósitos do tipo pórfiro, porém de menor expressão econômica quando comparados aos grandes sistemas da América Andina, dos Estados Unidos e do Sudeste Asiático, não havendo produção significativa a partir desses depósitos no Brasil.

Também são reconhecidos depósitos magmáticos e hidrotermais em outras regiões, como na Bahia e em Alagoas, além de ocorrências classificadas como VMS (Sulfeto Maciço Vulcanogênico), SEDEX e Sediment-hosted, que ampliam a diversidade geológica do cobre no país (ANM, 2024a; SGB, 2025).

Principais Projetos e Empresas no Brasil

Os principais depósitos brasileiros estão representados no mapa e listados na tabela a seguir:

Figura 15. Mapa com localização dos principais depósitos de cobre



Tabela 16. Principais depósitos de cobre no Brasil

DEPÓSITO	MINÉRIO	EMPRESA	RECURSOS	TEOR (Cu) %	STATUS
Alemão ¹	Cu-Au	Vale S.A.	139,1 Mt	1,54%	Produção
Antas Norte e Sul	Cu-Au	BHP Group Limited	1,5 Mt	0,5%	Produção
Breves	Cu-Au-Ag	Vale S.A.	50 Mt	1,22%	Produção
Cabaçal ⁶	Cu-Au-Ag	Meridian Mining	51,69 Mt	0,4%	Pesquisa
Caraíba ²	Cu	Ero Copper	262,52 Mt	0,84%	Produção
Chapada ⁵	Cu-Au	Lundin Mining Corp	1067,01 Mt	0,22%	Produção
Furnas ¹	Cu-Au	Ero Copper/Vale S.A.	313,6 Mt	0,6%	Pesquisa
Pantera	Cu-Au	BHP Group Limited	20,0 Mt	1,2%	Pesquisa
Paulo Afonso, Pojuca, Gameleira, Grota Funda ¹	Cu-Au	Vale S.A.	1407,5 Mt	0,57%	Pesquisa
Pedra Branca ⁴	Cu-Au	BHP Group Limited	11,4 Mt	1,65%	Produção
Pedra Verde	Cu	Pedra Verde	44,2 Mt	0,9%	Inativo
Salobo ¹	Cu-Au	Vale S.A.	1693,2 Mt	0,61%	Produção
Saúva ⁵	Cu-Au	Lundin Mining Corp.	277,07 Mt	0,31%	Pesquisa
Seival	Cu-Ag	Seival	0,2 Mt	ND	Produção
Serrote da Laje	Cu-Au	Mineração Vale Verde Ltda	119,2 Mt	0,5%	Produção
Sequeirinho, Cristalino, Mata II, Bacaba, Barão, 118, Visconde ¹	Cu-Au	Vale S.A.	887,1 Mt	0,63%	Produção/ Pesquisa ³²
Tucumã (Boa Esperança) ³	Cu-Co	Ero Copper	59,28 Mt	0,85%	Produção
GT-46/Igarapé Cinzento	Cu-Au	GT-46/Igarapé Cinzento	ND	ND	Pesquisa
Maravaia (Celesta)	Cu-Au	Maravaia (Celesta)	ND	ND	Produção

Fontes: 1 - Vale S.A. 2024; 2 - <https://erocopper.com/operations/caraiba-operations/>; 3 - <https://erocopper.com/operations/tucuma-project/>; 4- BHP, 2024 <https://www.sec.gov/ix?doc=/Archives/edgar/data/811809/000119312524210297/d812514d20f.htm>; 5 - Lundin Mining, 2025 <https://lundinmining.com/news/lundin-mining-announces-2024-mineral-resource-and-123185/>; 6 - Meridian Mining, 2025

Cadeia de valor

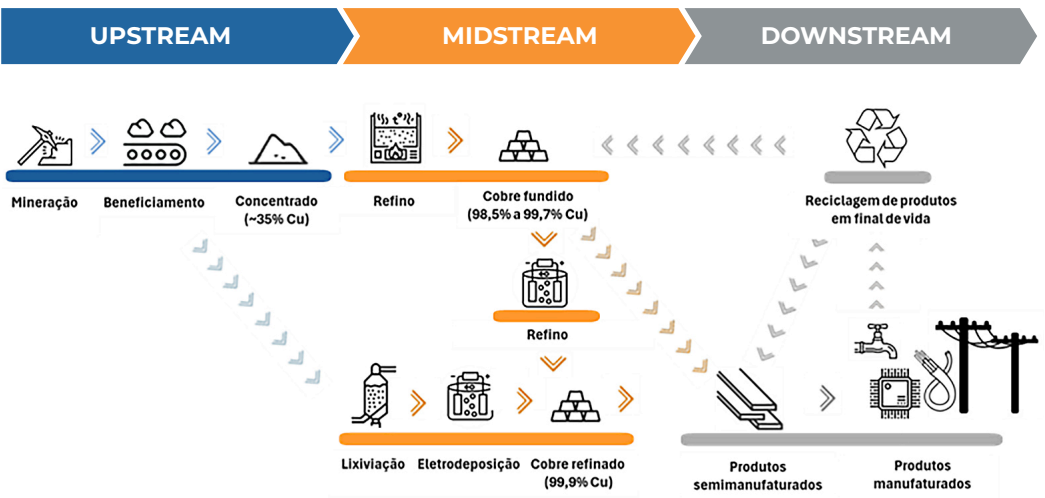
As primeiras etapas da cadeia de valor do cobre, após a mineração, variam de acordo com o tipo de minério. Para minérios sulfetados, com alto teor de cobre, o processo de obtenção do cobre inicia-se com a concentração (britagem, pe-neiramento, moagem e flotação). Essa etapa produz um concentrado com teor de 25 a 35% de cobre. Na etapa seguinte, o cobre é parcialmente purificado por

32. Sequeirinho e Mata II estão em produção, enquanto 118, Bacaba, Barão, Cristalino e Visconde estão em pesquisa.

meio de processos térmicos, cobre fundido (99,7% de pureza). Uma nova etapa de refino eletrolítico pode elevar o grau de pureza a 99,9% (grau catodo). Essa rota pirometalúrgica permite a recuperação de subprodutos metálicos, como ouro, prata e cobalto.

Minérios oxidados, silicatados e de baixo teor são tratados por processos hidrometalúrgicos. Essa rota envolve a lixiviação do minério com ácidos, dissolvendo o cobre, seguido por etapas de concentração (como cementação com ferro ou extração por solvente) e eletrodeposição. A combinação de extração por solvente e eletrodeposição é conhecida como processo SX-EW, e produz cobre com pureza de 99,9%. Apesar de eficiente, a rota hidrometalúrgica apresenta limitações para a recuperação de subprodutos.

Figura 16: Cadeia de valor do cobre



Estimativa de teor de cobre contido no recurso

O conteúdo de cobre nos recursos declarados para os depósitos em produção é de apenas 32,54 milhões de toneladas. Somando os depósitos em produção e em pesquisa o total teórico de cobre é de 35,73 milhões de toneladas. Ressaltando que a estimativa foi calculada desconsiderando as perdas no processo.

Tabela 17. Cálculo da estimativa de cobre contido no recurso^{33 34}

DEPÓSITO	EMPRESA	STATUS	MINÉRIO	RECURSO (Mt)	TEOR (Cu) %	Cu (Mt)
Alemão	Vale S.A.	Produção	Cu-Au	139,1	1,54	2,14
Antas Norte e Sul	OZ Minerals	Produção	Cu-Au	1,5	0,5	0,01
Breves	Vale S.A.	Produção	Cu-Au-Ag	50	1,22	0,61
Caraíba	Ero Copper	Produção	Cu	262,52	0,84	2,21
Chapada	Lundin Mining Corp	Produção	Cu-Au	1067,01	0,22	2,35
Paulo Afonso, Pojuca, Gameleira, Grota Funda	Vale S.A.	Produção	Cu-Au, Cu-Zn	1407,5	0,57	8,02
Pedra Branca	BHP Group Limited	Produção	Cu-Au	11,4	1,65	0,19
Salobo	Vale S.A.	Produção	Cu-Au	1693,2	0,61	10,33
Seival	Seival	Produção	Cu-Ag	0,2	ND	
Serrote da Laje	Mineração Vale Verde Ltda	Produção	Cu-Au	119,2	0,5	0,60
Sossego, Cristalino, Mata II, Bacaba, Barão, 118, Visconde)	Vale S.A.	Produção	Cu-Au	887,1	0,63	5,59
Tucumã (Boa Esperança)	Ero Copper	Produção	Cu-Co	59,28	0,85	0,50
Maravaia (Celesta)	Maravaia (Celesta)	Produção	Cu-Au	ND	ND	
Cabaçal	Meridian Mining	Pesquisa	Cu-Au-Ag	51,69	0,4	0,21
Furnas	Ero Copper/ Vale S.A.	Pesquisa	Cu-Au	313,6	0,6	1,88
Pantera	OZ Minerals	Pesquisa	Cu-Au	20	1,2	0,24
Saúva	Lundin Mining Corp.	Pesquisa	Cu-Au	277,07	0,31	0,86
GT-46/Igarapé Cinzento	GT-46/Igarapé Cinzento	Pesquisa	Cu-Au	ND	ND	
Pedra Verde	Pedra Verde	Inativo	Cu	44,2	0,9	0,40
TOTAL PRODUÇÃO						32,54
TOTAL PESQUISA						3,19
TOTAL GERAL						35,73

33. O cálculo abrangeu as fases de pesquisa e produção, desconsiderando as reservas atualmente inativas.

34. Cabe ressaltar que esses cálculos foram realizados a partir do total de recursos informados, desconsiderando perdas nos processos de beneficiamento. Para mais informações, ver Anexo A — Metodologia.

Reciclabilidade

O cobre é um dos raros materiais que mantém suas propriedades químicas e físicas mesmo após múltiplos ciclos de reciclagem, o que o torna altamente adequado para estratégias de recuperação de recursos e circularidade. Dados do International Copper Study Group indicam que, em 2022, cerca de 32% do consumo mundial de cobre teve origem em materiais reciclados.

Substituibilidade

A elevada volatilidade e os custos associados ao preço do cobre têm incentivado a busca por materiais alternativos que possam substituí-lo em diversas aplicações industriais. O cobre pode ser parcialmente substituído por diferentes materiais, dependendo das exigências técnicas de cada setor.

Dentre as alternativas mais estudadas, o alumínio se destaca como a principal opção para aliviar a pressão sobre a demanda por cobre, especialmente em equipamentos elétricos e sistemas de encanamento. Em aplicações elétricas, o grafeno também é uma possibilidade promissora, por apresentar excelente condutividade e estabilidade térmica. Na área de telecomunicações, a fibra óptica é amplamente empregada como substituto do cobre. Já em sistemas hidráulicos, diversos tipos de plásticos têm sido utilizados como alternativas viáveis. Além disso, materiais como o aço, o titânio e compósitos avançados podem substituir o cobre em trocadores de calor e outras aplicações térmicas.

No entanto, as propriedades naturais do cobre, como sua alta condutividade elétrica e térmica, resistência à corrosão e maleabilidade, aliadas à sua ampla gama de aplicações industriais, continuam a representar barreiras significativas à sua substituição.

2.7. Minério de Ferro

O minério de ferro é uma das matérias-primas mais abundantes e economicamente relevantes do planeta, sendo a principal fonte de extração do ferro (Fe). O ferro tem coloração prateada e brilho metálico, e é amplamente utilizado na indústria devido a propriedades como alta resistência mecânica, ductilidade, maleabilidade, condutividade térmica e capacidade de formar ligas, especialmente com o carbono, originando o aço.

A produção do aço representa mais de 90% do consumo global de minério de ferro. O aço é um insumo fundamental na construção civil, na indústria de

transportes, de bens de capital, além da produção de embalagens metálicas e produtos de consumo duráveis. Ainda, o ferro é usado diretamente na produção de componentes de motores, válvulas, engrenagens e utensílios industriais, na forma de ferro fundido ou forjado. Do ponto de vista estratégico, o minério de ferro tem seu papel na infraestrutura produtiva e logística, onde países com grandes reservas e capacidade de produção, como o Brasil, têm vantagem competitiva na cadeia de suprimentos global.

O minério de ferro é um mineral estratégico para o Brasil e importante para a infraestrutura global. A descarbonização da indústria siderúrgica é um dos grandes desafios da transição energética global. Responsável por aproximadamente 7 a 9% das emissões mundiais de CO₂, o setor busca alternativas tecnológicas e operacionais para reduzir seu impacto ambiental. Nesse contexto, o uso de minério de ferro de alta qualidade surge como uma peça fundamental para tornar a produção de aço mais limpa e eficiente.

Dotação Mineral no Brasil

No Brasil, os depósitos de Ferro estão associados a Formações Ferríferas Bandadas do tipo Lago Superior, que são sucessões sedimentares de margem passiva proterozoicas em que há predomínio de hematita como mineral de minério, e que ocorre no Quadrilátero Ferrífero - MG; e do tipo Algoma, relacionadas a sequências vulcanossedimentares arqueanas e paleoproterozoicas com magnetita e hematita, em Carajás - PA.

No Quadrilátero Ferrífero, os teores chegam a 49% com quase 582 Mt Minério Bruto Extraído (ROM); já em Carajás, são obtidos teores de 65% com mais de 174 Mt ROM. Além dessas, há produções no Mato Grosso do Sul (11 Mt com teores de 64%) e Bahia (3 Mt com teores de 49%), e produções secundárias no Piauí, Goiás, Ceará e Rio Grande do Norte (ANM, 2024a). O país possui a terceira maior reserva de minério bruto e segunda em conteúdo de minério, somando 27 Bt, atrás apenas da Austrália (USGS, 2024).

Os principais destinos de exportação de produtos de ferro brasileiro são China e Estados Unidos, que consomem principalmente o minério de ferro e seus concentrados (ANM, 2024b).

A Vale S.A. possui 69% de participação na mineração de ferro, dominando o mercado nacional, seguida pela Anglo American (cerca de 7% de participação). Predominam minas e usinas de beneficiamento de grande porte, e a CFEM proveniente do minério de ferro corresponde a 83% do montante arrecadado pelo tributo no país (ANM, 2024a).

Principais Projetos e Empresas no Brasil

Os principais depósitos brasileiros estão representados no mapa e listados na tabela a seguir:

Figura 17. Mapa com localização dos principais depósitos de minério de ferro



Tabela 18. Principais depósitos de minério de ferro no Brasil

DEPÓSITOS		EMPRESA	RECURSOS*	TEOR	STATUS
Sistema Norte¹	Serra Sul (S11C e S11D)	Vale S.A.	4414,3 Mt	65,42%	Produção
	Serra Norte	Vale S.A.	3286 Mt	65,64 %	Produção
	Serra Leste	Vale S.A.	880,8 Mt	57,98 %	Produção
	Serra do Rabo	Vale S.A.	578,8 Mt	66,04%	Produção

Sistema Sudeste ¹	Mariana (Alegria, Fábrica Nova, Fazendão, Capanema)	Vale S.A.	9066,2 Mt	41,29%	Produção
	Minas Centrais (Brucutu, Morro Agudo, Apolo)	Vale S.A.	4021 Mt	43,68%	Produção
	Itabira (Conceição, Minas do Meio)	Vale S.A.	1498,1 Mt	45,80%	Produção
Sistema Sul ¹	Vargem Grande (Sapecado, Galinheiro, Tamanduá, Capitão do Mato, Abóbora)	Vale S.A.	8900,4 Mt	40,42%	Produção
	Paraopeba (João Pereira, Segredo, Mar Azul, Capão Xavier)	Vale S.A.	5325,7 Mt	41,72%	Produção
Minas-Rio (Serra do Sapo, Itapanhoacanga) ²		Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A.	5783,9 Mt	32,72%	Produção
Minas Leste, Central e Oeste ³		Mineração Usiminas S.A.	2750 Mt	37,55%	Produção
Minas Andrade e Serra Azul ⁴		ArcelorMittal Brasil S.A.	805 Mt	43,65%	Produção
Amapá ⁵		Cadence Minerals PLC	276,24 Mt	38,33%	Pesquisa
Mina de Alegria (Complexo de Germano) ⁸		Samarco Mineração S.A. (em recuperação judicial)	5,2 Bt ⁶	ND	Produção
Casa de Pedra e Engenho		CSN Mineração	6 Bt ⁷	ND	Produção
Fazenda Mocó (Ferro Verde)		Brazil Iron Mineração Ltda.	1,7 Bt ⁷	ND	Pesquisa
Baratinha e Mongais		Bemisa Holding S.A.	>300 Mt ⁷	ND	Pesquisa
Planalto Piauí		Bemisa Holding S.A.	>1,6 Bt ⁷	ND	Pesquisa
Pedra Branca		Bemisa Holding S.A.	130 Mt	ND	Pesquisa
Minas Tico-Tico e Ipê		Mineração Morro do Ipê S.A.	ND	ND	Produção
Mina Pedra de Ferro		Bahia Mineração	ND	ND	Produção
Minas Urucum e Santa Cruz		LHG Mining (antiga Mineração Corumbaense Reunida S.A.)	ND	ND	Produção
Pau Branco		Vallourec Tubos do Brasil Ltda	ND	ND	Produção
Várzea do Lopes e Miguel Burnier		Gerdau Açominas S.A.	ND	ND	Produção
Ferro + Mineração S.A.		Ferro + Mineração S.A.	ND	ND	Produção

*Recursos totais, incluindo reservas P+P, e recursos M+I+Inf. Os dados do projeto Serra do Rabo são de recursos M+I+Inf (sem estimativa de reservas). FONTES: 1 - Vale S.A. 2024; 2 - Anglo American 2024; 3 - Usiminas 2025; 4 - ArcelorMittal 2024; 5 - Cadence Minerals, 2023; 6 - não auditado; 7 - declarado no site da empresa; 8 - Samarco, 2023.

Cadeia de valor

O minério de ferro extraído pode ser classificado em três tipos: granulado, sín-ter feed e pellet feed. O pellet feed possui granulometria inferior a 0,15 mm, en-quanto o sínter feed varia entre 0,15 mm e 6,3 mm. Esses finos são aglomerados para se tornarem úteis na produção de aço.

Figura 18. Comparativo dos processos de preparação de insumos de ferro para metalurgia

Briquetagem	Pelotização	Sinterização
Moagem	Moagem	Moagem
Espessamento	Espessamento	Espessamento
Prensagem	Prensagem	Prensagem
Mistura	Mistura	Mistura
Briquetagem	Pelotização	Sinterização
Secagem (~200°C)	Queima (~1.300°C)	Queima (~1.300°C)
Peneiramento	Peneiramento	Peneiramento

Fonte: Vale

O sínter feed é processado em uma unidade de sinterização dentro da siderur-gia antes de ser usado no alto-forno. A sinterização é um processo térmico que aglomera finos de minério de ferro, formando uma carga porosa adequada ao alto-forno. A porosidade aumenta a reatividade, mas reduz a resistência mecâ-nica, especialmente sem aglomerantes. Para aumentar a resistência, são adi-cionados fundentes (CaO, MgO). As pelotas finais da sinterização apresentam um teor em ferro de 63-65% e são conhecidas como pelotas AF (para alto forno).

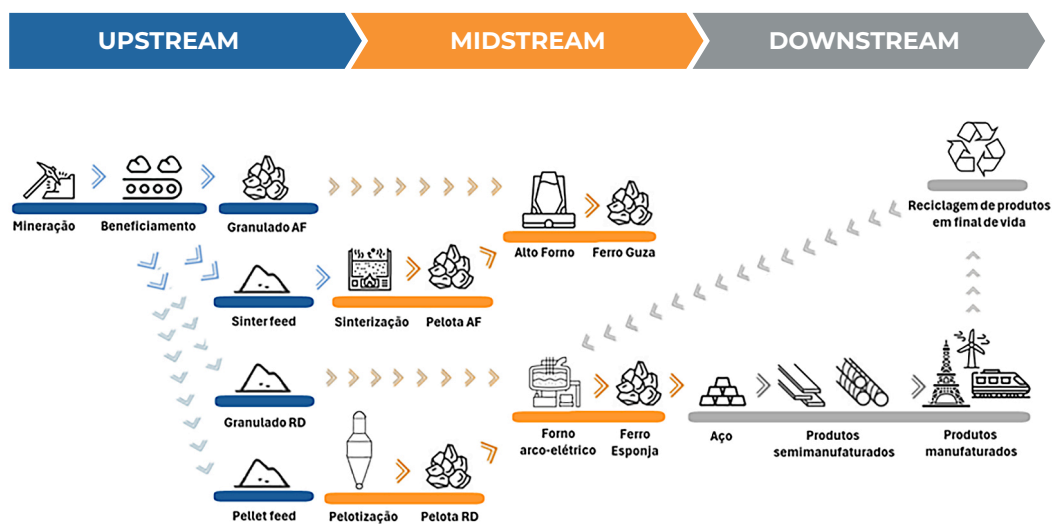
Tanto o minério granulado quanto as pelotas produzidas por sinterização são reduzidos em alto forno para produção de ferro gusa.

O pellet feed (< 0,15 mm) é separado após a flotação ou outros processos de be-neficiamento do minério de ferro. Essa fração passa por separação magnética de alta intensidade, para remoção de impurezas, resultando em um material concentrado (90 % de Fe2O3). Para a agregação do material em pelotas, há a adição de CaO/fundentes, porém em menor quantidade do que na sinteriza-ção. O processo mais usual de aglomeração utiliza um forno de grelha e quei-ma à aproximadamente 1.300°C. Pelotas produzidas por essa rota tecnológica

são mais concentradas em ferro (67%) e chamadas de pelotas RD (para redução direta). São insumo para produção de ferro esponja através de redução direta e seguem para siderúrgicas a arco elétrico.

A Vale desenvolveu uma tecnologia para produção de briquetes, aglomerados de minério de ferro de alta qualidade a partir de um processo de cura em baixas temperaturas e uma solução tecnológica de aglomerantes. Os briquetes de minério de ferro podem ser utilizados em altos-fornos e em rotas de redução direta. O produto apresenta diversas vantagens ambientais e operacionais: reduz em até 10% as emissões de CO₂ na cadeia siderúrgica em comparação à pelletização e sinterização, além de diminuir significativamente a emissão de SOx, NOx e particulados. Sua produção dispensa o uso de água e permite o aproveitamento de areia proveniente de rejeitos de mineração, tornando o processo mais sustentável e eficiente.

Figura 19. Cadeia de valor do minério de ferro



Estimativa de teor de ferro contido no recurso

O total de ferro contido nos recursos declarados para os depósitos em produção é de 21.219,55 Mt. Somando os depósitos produção e pesquisa o total teórico de ferro é de 21.325,44 Mt. Ressaltando que a estimativa foi calculada desconsiderando as perdas no processo.

Tabela 19. Cálculo do total de ferro contido no recurso

DEPÓSITO	EMPRESA	STATUS	RECURSO (Mt)	TEOR (Fe) %	Fe (Mt)
Serra Sul (S11C e S11D)	Vale S.A.	Produção	4414,3	65,42	2887,84
Serra Norte	Vale S.A.	Produção	3286	65,64	2156,93
Serra Leste	Vale S.A.	Produção	880,8	57,98	510,69
Serra do Rabo	Vale S.A.	Pesquisa	578,8	66,04	382,24
Mariana (Alegria, Fábrica Nova, Fazendão, Capanema)	Vale S.A.	Produção	9066,2	41,29	3743,43
Minas Centrais (Brucutu, Morro Agudo, Apolo)	Vale S.A.	Produção	4021	43,68	1756,37
Itabira (Conceição, Minas do Meio)	Vale S.A.	Produção	1498,1	45,8	686,13
Vargem Grande (Sapicado, Galinheiro, Tamanduá, Capitão do Mato, Abóbora)	Vale S.A.	Produção	8900,4	40,42	3597,54
Paraopeba (João Pereira, Segredo, Mar Azul, Capão Xavier)	Vale S.A.	Produção	5325,7	41,72	2221,88
Minas-Rio (Serra do Sapo, Itapanhoacanga)	Anglo American Minério de Ferro Brasil S.A.	Produção	5783,9	32,72	1892,49
Minas Leste, Central e Oeste	Mineração Usiminas S.A.	Produção	2750	37,55	1032,63
Minas Andrade e Serra Azul	ArcelorMittal Brasil S.A.	Produção	805	43,65	351,38
Mina de Alegria (Complexo de Germano)	Samarco Mineração S.A. (em recuperação judicial)	Produção	5,2 Bt	ND	
Casa de Pedra e Engenho	CSN Mineração	Produção	6 Bt	ND	
Minas Tico-Tico e Ipê	Mineração Morro do Ipê S.A.	Produção	ND	ND	
Mina Pedra de Ferro	Bahia Mineração	Produção	ND	ND	
Minas Urucum e Santa Cruz	LHG Mining (antiga Mineração Corumbaense Reunida S.A.)	Produção	ND	ND	
Pau Branco	Vallourec Tubos do Brasil Ltda	Produção	ND	ND	
Várzea do Lopes e Miguel Burnier	Gerdau Açominas S.A.	Produção	ND	ND	
Ferro + Mineração S.A.	Ferro + Mineração S.A.	Produção	ND	ND	
Amapá5	Cadence Minerals PLC	Pesquisa	276,24	38,33	105,88

Fazenda Mocó (Ferro Verde)	Brazil Iron Mineração Ltda.	Pesquisa	1,7 Bt	ND
Baratinha e Mongais	Bemisa Holding S.A.	Pesquisa	>300	ND
Planalto Piauí	Bemisa Holding S.A.	Pesquisa	>1,6 Bt	ND
Pedra Branca	Bemisa Holding S.A.	Pesquisa	130	ND
TOTAL PRODUÇÃO				21219,55
TOTAL PESQUISA				105,88
TOTAL GERAL				21325,44

Reciclabilidade

O aço é totalmente reciclável e pode ser reprocessado indefinidamente sem perda de qualidade. Sua reciclagem proporciona economias significativas de energia e de matérias-primas. A produção de aço em fornos elétricos a arco, que utilizam exclusivamente sucata metálica, reduz de forma significativa o consumo de energia em comparação aos métodos tradicionais baseados em minério. Desde 1960, a energia necessária para produzir uma tonelada de aço caiu cerca de 40%.

Substituibilidade

O ferro e o aço possuem diversos substitutos, metálicos e não metálicos, dependendo da aplicação. Na indústria automotiva, materiais mais leves, como o alumínio e os plásticos, são frequentemente utilizados em substituição ao ferro e ao aço. Na construção civil, alternativas comuns incluem alumínio, concreto e madeira. Para embalagens, os principais substitutos são alumínio, vidro, papel e plásticos.

2.8. Cobalto

O cobalto é um metal de transição cujas propriedades físicas e químicas o tornam essencial para aplicações em alta tecnologia. Características como um elevado ponto de fusão (1495 °C), resistência à corrosão e boas propriedades magnéticas possibilitam seu uso na produção de superligas metálicas aplicadas em turbinas de aviação, implantes médicos e componentes industriais de alto desempenho (Dehaine et al., 2021). No entanto, a maior parte de sua demanda concentra-se na indústria de baterias recarregáveis, representando cer-

ca de 60% do consumo global de cobalto. Tal elemento é um componente essencial dos catodos das baterias NMC (níquel-manganês-cobalto) e LCO (óxido de lítio-cobalto), amplamente empregados em veículos elétricos, dispositivos eletrônicos e sistemas de armazenamento de energia (IEA, 2021).

Em reconhecimento à sua importância, o cobalto é listado como mineral estratégico no Brasil, de acordo com a Resolução nº 2/2021 do Ministério de Minas e Energia. Além disso, de acordo com a International Energy Agency (2021) e a International Renewable Energy Agency (2021), a demanda global por cobalto poderá crescer entre 60% e 300% até 2040, impulsionada pela eletrificação dos transportes e transição energética.

Dotação Mineral no Brasil

As ocorrências de cobalto no Brasil estão associadas a três tipos principais de depósitos, nos quais o metal aparece sobretudo como coproduto de outras operações: lateríticos de Níquel e Cobalto, sulfetos magmáticos e manganês-cobalto. Os depósitos lateríticos de níquel-cobalto (Ni-Co) são formados pelo intemperismo de rochas ultramáficas, acumulando cobalto nas zonas limonítica e saprolítica. Em Niquelândia, no estado de Goiás, os depósitos são desenvolvidos sobre serpentinitos e peridotitos, com teores típicos de 0,05–0,15 % Co, integrando-se à mina de níquel (ANM, 2024). Outro exemplo é no Piauí, onde há projetos exploratórios em rochas ultramáficas, com características similares a lateritos de Cuba (Marsh et al., 2013). Já os depósitos de sulfetos magmáticos localizados em Fortaleza de Minas, no estado de Minas Gerais, onde a mineração ocorre em rochas máfica e komatítica, com teores de cobalto variando entre 0,05 e 0,08 % (Almeida et al., 2007). Por fim, há registros nos depósitos de manganês-cobalto (Mn-Co) na Bahia, onde veios de manganês apresentam enriquecimento pontual de cobalto, ainda em fase exploratória.

De acordo com a ANM (2024), o Brasil possui cerca de 1.000 toneladas de reservas medidas de cobalto contido. Já o relatório do IBRAM (2024) aponta que o Brasil, com reservas globais na ordem de 70 mil toneladas (dados de 2017), figura em 9º colocado no ranking mundial, atrás de países como a RDC, Austrália e Cuba.

Principais Projetos e Empresas no Brasil

Os principais depósitos de cobalto no Brasil estão representados no mapa e listados na tabela a seguir:

Figura 20. Mapa com localização dos principais depósitos de cobalto



Tabela 20. Principais depósitos de minério de cobalto no Brasil

DEPÓSITO	EMPRESA	COMMODITIES	RECURSO	TEOR (CO)	STATUS
Santa Rita (Fazenda Mirabela)	Atlantic Nickel	Ni, Cu, Co	281* kt ¹	0,01% ¹	Produção
Piauí Nickel	Brazilian Nickel Ltda	Ni, Co	72* Mt ³	0,05% ³	Pesquisa
Jacaré	Anglo American	Ni, Co	N.D.	0,19% ⁴	Pesquisa
Araguaia	Horizonte Minerals	Ni, Co, Fe, MgO, SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃	N.D.	N.D.	Pesquisa
Jaguar	Centaurus	Ni, Cu, Co	N.D.	N.D.	Pesquisa
Fortaleza de Minas (O ´Toole)	-	Ni, Cu, Co	N.D.	N.D.	Inativo
Niquelândia	CBA	Ni, Co	N.D.	N.D.	Inativo
Vermelho (V1 e V2)	Horizonte Minerals	Ni, Co, Fe ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂	148,8 Mt ²	0,05 % ²	Inativo

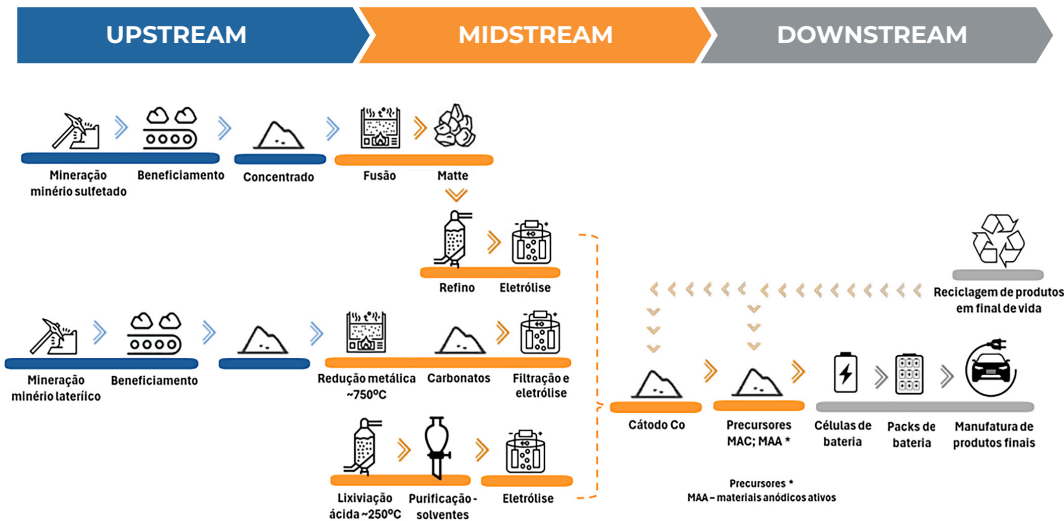
Fonte: 1 - Atlantic Nickel, 2022. 2 - Horizonte Minerals, 2019. 3 - Brazilian Nickel, 2021. 4 - Anglo American, 2024.
*Recursos totais (medidos + indicados + inferidos).

Cadeia de valor

O cobalto é obtido principalmente como subproduto da extração de níquel e cobre. A primeira etapa na cadeia de valor do cobalto consiste na concentração do minério. Os minérios concentrados de cobalto são refinados por diferentes processos, resultando em diversas formas: produtos intermediários (como mattes contendo cobalto e hidróxido bruto de cobalto), produtos de cobalto metálico refinado (como cátodos, briquetes, lingotes, grânulos e pó) e compostos químicos refinados (como cloreto, óxido, hidróxido e sais de cobalto).

A figura abaixo ilustra desde a extração do cobalto como subproduto da extração de níquel até o seu papel na cadeia de valor das baterias de íons de lítio:

Figura 21. Cadeia de valor do cobalto



Estimativa de teor de cobalto contido no recurso

Considerando os recursos declarado para os depósitos em produção, o cobalto contido é de 30 toneladas. Ao somar os depósitos em produção e em pesquisa, o total de cobalto contido é de 110,43 kt. Vale ressaltar que tal estimativa foi calculada desconsiderando as perdas no processo.

Tabela 21. Cálculo da estimativa de cobalto contido no recurso³⁵

DEPÓSITO	EMPRESA	STATUS	COMMODITIES	RECURSO (Mt)	TEOR (Co) %	Co (kt)
Santa Rita (Fazenda Mirabela)	Atlantic Nickel	Produção	Ni, Cu, Co	0,28	0,01	0,03
Vermelho (V1 e V2)	Horizonte Minerals	Pesquisa	Ni, Co, Fe2O3, MgO, SiO2	148,8	0,05	74,40
Piauí Nickel	Brazilian Nickel Ltda.	Pesquisa	Ni, Co	72	0,05	36,00
Jacaré	Anglo American	Pesquisa	Ni, Co	N.D.	0,19	
Araguaia	Horizonte Minerals	Pesquisa	Ni, Co, Fe, MgO, SiO2, Al2O3, Cr2O3	N.D.	N.D.	
Jaguar	Centaurus	Pesquisa	Ni, Cu, Co	N.D.	N.D.	
Fortaleza de Minas (O´Toole)	-	Inativo	Ni, Cu, Co	N.D.	N.D.	
Niquelândia	CBA	Inativo	Ni, Co	N.D.	N.D.	
TOTAL						110,43

Reciclabilidade

Teoricamente, o cobalto é infinitamente reciclável. Estima-se que 65% do cobalto reciclado seja originado da reciclagem de baterias. Assim, a presença de cobalto nas baterias é um fator-chave, pois torna a reciclagem economicamente viável.

Substituibilidade

Devido a preocupações éticas, ambientais e econômicas relacionadas à sua extração, o cobalto tem sido substituído em diversas aplicações. Além disso, a volatilidade de preços e os riscos associados à cadeia de suprimentos contribuem para acelerar esse movimento. Como resultado, o teor de cobalto nas baterias de íons de lítio vem sendo gradualmente reduzido. No entanto, essa substituição pode comprometer o desempenho ou elevar custos, limitando sua viabilidade em algumas tecnologias.

Entre os materiais alternativos utilizados em diferentes setores, destacam-se: ferritas de bário ou estrôncio, ligas de neodímio-ferro-boro, níquel-ferro, cério, manganês, ligas metálicas diversas e cerâmicas. A viabilidade da substituição depende de fatores como desempenho técnico e custo-benefício. Assim, apesar do avanço de alternativas, o cobalto ainda é um elemento de difícil substituição em várias aplicações industriais estratégicas.

35. O cálculo abrangeu as fases de pesquisa e produção, desconsiderando as reservas atualmente inativas.

2.9. Bauxita

A bauxita é um agregado mineral composto por hidróxidos de alumínio, óxi-hidróxidos de ferro e óxidos de titânio, além de caulinita. Sua formação ocorre em depósitos lateríticos, a partir da alteração de rochas pelo intemperismo em regiões úmidas e quentes. É utilizada, por exemplo, para a produção de alumina, que possui aplicação primordial na metalurgia para a fabricação de ligas de alumínio. Além disso, é importante para produtos como abrasivos, cerâmicas e químicos, além de possuir outras aplicações como para a fabricação de químicos e cimento — possuindo grande relevância econômica.

Como matéria-prima para a fabricação de alumínio, a bauxita desempenha um papel cada vez mais relevante na transição energética, uma vez que ligas de alumínio possuem alta resistência mecânica e à corrosão. Devido a esses fatores, tornam-se cruciais na indústria de transportes, contribuindo para veículos mais leves e, portanto, com melhor performance. Além disso, a alta condutividade elétrica e maleabilidade do alumínio o fazem um metal importante para linhas de transmissão de energia, setor em que vem substituindo o cobre. Também é amplamente utilizado estruturalmente, em construções, e em embalagens, substituindo o aço.

Dotação Mineral no Brasil

No Brasil, as principais ocorrências de bauxita economicamente viáveis estão associadas a depósitos lateríticos desenvolvidos por intemperismo intenso em regiões de clima quente e úmido. Nesses depósitos, predominam os perfis com espessura entre 4 e 7 metros e mineralogia dominada por gibbsita — a forma de alumínio preferida para o processo Bayer.

As jazidas brasileiras concentram-se em duas grandes regiões: na Amazônia Oriental (PA), onde há depósitos de grande porte, que apresentam espessos perfis lateríticos, desenvolvidos sobre depósitos sedimentares. Nessa área, destacam-se os depósitos de Porto Trombetas (MRN), Paragominas (Hydro) e Juruti (Alcoa). As outras regiões relevantes são o Sudeste e Centro-Oeste (MG e GO), onde há depósitos residuais, associados tanto a rochas vulcânicas alcalinas (como no Planalto de Poços de Caldas) quanto a rochas ígneas alteradas, com destaque para as minas da CBA e da Terra Goyana, nos municípios de Barro Alto e Niquelândia (GO), Mirai e Itamarati de Minas (MG).

As reservas medidas e indicadas de bauxita no Brasil somam cerca de 2,7 bilhões de toneladas, segundo o Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2025), o que posiciona o país em quarto lugar entre os maiores detentores de reservas globais. As jazidas do Pará respondem por mais de 90% dessas reservas.

Principais Projetos e Empresas no Brasil

O mapa e a tabela a seguir apresentam os principais depósitos de bauxita no Brasil:

Figura 22. Mapa com localização dos principais depósitos de bauxita



Tabela 22. Principais depósitos de bauxita no Brasil

DEPÓSITO	EMPRESA	RECURSO	TEOR (Al)	STATUS
Porto Trombetas (Oriximiná)	Mineração Rio do Norte S.A. (MRN)	600 Mt	49,5%	Produção
Juruti	Alcoa Alumínio S.A.	558,1 Mt	34,25%	Produção
Paragominas	Norsk Hydro	249,7 Mt	82,4 %	Produção

Barro Alto	Terra Goyana	180 Mt	56%	Produção
Barro Alto, área norte ¹	Companhia Brasileira de Alumínio (CBA)	30,87 Mt	53,7% (Al ₂ O ₃)	Produção
Bela Cruz	Mineração Rio do Norte S.A.	55,86 Mt	50,2%	Produção
Poços de Caldas	Alcoa Alumínio S.A.	50 Mt	46%	Produção
Itamarati de Minas (MG)	Companhia Brasileira de Alumínio (CBA)	ND	ND	Fechada/ Exaurida
Mirai (MG) ¹	Companhia Brasileira de Alumínio (CBA)	85,09 Mt	41,89% (Al ₂ O ₃)	Produção
Almeirim	MSL Minerals S.A.	46 Mt	57,4%	Fechada/ Exaurida

Fonte: SGB, 2025. 1 - CBA, 2021.

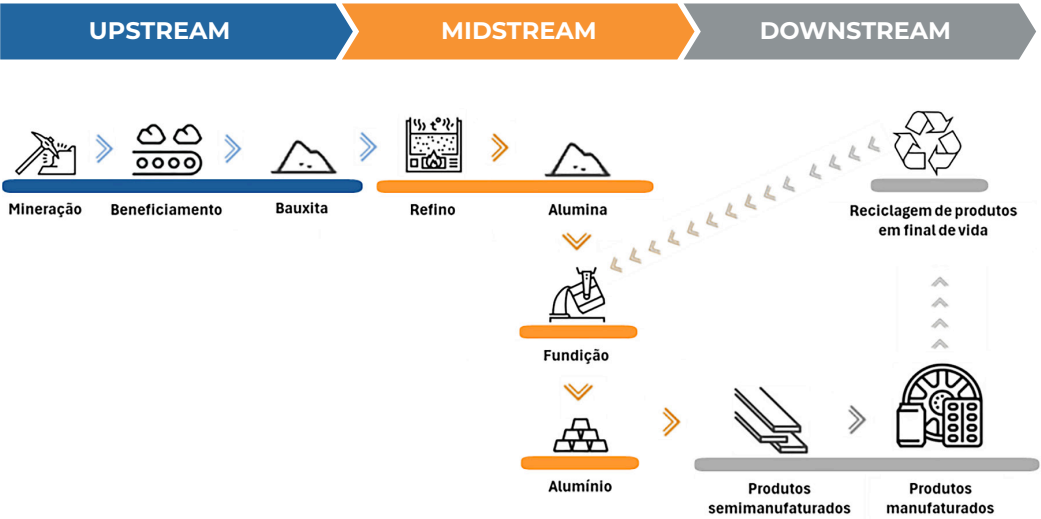
Cadeia de valor

A cadeia de valor do alumínio inicia-se com a extração da bauxita, principal minério utilizado na produção desse metal. Após a mineração, a bauxita passa por etapas de trituração, lavagem e secagem, sendo então direcionada ao processo de refino — conhecido como Bayer. Esse método permite a conversão da bauxita em alumina (óxido de alumínio), um composto intermediário de ampla aplicação industrial.

A alumina resultante do refino não é utilizada apenas como matéria-prima para a produção de alumínio metálico, mas também é fundamental em setores como o de materiais refratários, no tratamento de água, na formulação de compostos abrasivos e de polimento. Além disso, pode ser utilizada como agente retardante de chamas e na fabricação de componentes como velas de ignição, entre outras aplicações especializadas.

A transformação da alumina em alumínio metálico ocorre por meio do processo de eletrólise denominado Hall-Héroult. Nessa etapa, a alumina calcinada é submetida à redução eletrolítica em cubas específicas, operando a temperaturas elevadas. Esse processo consome grandes quantidades de energia elétrica e exige, em média, cerca de duas toneladas de alumina para a obtenção de uma tonelada de alumínio primário.

Figura 23. Cadeia de valor do alumínio



Estimativa de teor de alumínio contido no recurso

Em média, são necessárias 4 toneladas de bauxita seca para produzir 2 toneladas de alumina, que, por sua vez, geram 1 tonelada de alumínio (USGS, 2025). Para o cálculo teórico da oferta de alumínio, foram considerados os teores indicados para cada depósito. Com base nesses dados, o potencial de produção total de alumínio, a partir dos recursos declarados para os depósitos em produção, é estimada em 898 Mt de alumina — o que equivale a 475,4 Mt de alumínio.

Tabela 23. Cálculo da estimativa de produção potencial de alumina e alumínio

DEPÓSITO	EMPRESA	STATUS	RECURSO (Mt)	TEOR (Al2O3)	ALUMINA (Al2O3) (Mt)	ALUMÍNIO (Mt)
Porto Trombetas (Oriximiná)	Mineração Rio do Norte S.A.	Produção	600	49,5%	297,0	157,2
Juruti	Alcoa Alumínio S.A.	Produção	558,1	34,3%	191,1	101,2
Paragominas	Norsk Hydro	Produção	249,7	82,4%	205,8	108,9
Barro Alto	Companhia Brasileira de Alumínio	Produção	30,87	53,7%	16,6	8,8
Barro Alto	Terra Goyana	Produção	180	56,0%	100,8	53,4

Bela Cruz	Mineração Rio do Norte S.A.	Produção	55,86	50,2%	28,0	14,8
Poços de Caldas	Alcoa Alumínio S.A.	Produção	50	46,0%	23,0	12,2
Miraf (MG) ¹	Companhia Brasileira de Alumínio (CBA)	Produção	85,09	41,9%	35,6	18,9
TOTAL			1809,62		898,0	475,4

Reciclabilidade

O alumínio pode ser reciclado indefinidamente sem perder suas características essenciais, o que o torna um dos metais mais reciclados. Em setores como o automotivo e o da construção civil, mais de 90% do alumínio utilizado provém de reciclagem, favorecendo a adoção de um modelo circular de produção e consumo.

A produção de alumínio secundário consome cerca de 95% menos energia do que a produção a partir de minério, o que representa uma significativa redução de emissões de carbono, além de menores custos para empresas e consumidores. O Brasil é referência na reciclagem de alumínio. Em 2022, o Brasil reciclou 100% das latas de alumínio para bebidas comercializadas, o que equivale a 390,2 mil toneladas de alumínio.

Substituibilidade

Em aplicações nos setores aeronáutico e automotivo, o alumínio pode ser substituído por materiais como compósitos, magnésio, aço ou titânio, dependendo dos requisitos de desempenho, peso e resistência. Já em aplicações elétricas e de transferência de calor, o alumínio e o cobre são frequentemente intercambiáveis, embora apresentem diferenças em condutividade e custo.

Apesar do elevado consumo energético envolvido no processamento da bauxita até a obtenção do alumínio metálico, o material permanece amplamente utilizado devido à combinação de suas propriedades, tais como: leveza, resistência à corrosão, boa condutividade térmica e elétrica, bem como alta reciclabilidade.

Maturidade das cadeias de valor

Ainda que o Brasil possua potencial geológico e uma infraestrutura de mineração robusta, o país enfrenta dificuldades significativas em avançar no processamento e na verticalização de seus minerais, especialmente os críticos, devido à maturidade tecnológica e à concentração de etapas-chave da cadeia em ou-

tros países. Essa lacuna na cadeia produtiva é reflexo de importantes indicadores como a geração de empregos de maior qualificação, desenvolvimento de novas tecnologias e captura de valor adicionado ao longo da cadeia. A maturidade tecnológica em certas áreas de processamento dos minerais críticos é um fator limitante, exigindo investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação para superar essa deficiência. O desafio para o Brasil se estende à construção de uma cadeia produtiva completa, que inclua o beneficiamento, o processamento e a fabricação de produtos de maior valor agregado. Esses pontos serão detalhados nos capítulos 5 e 6 do relatório.



3.

Demanda brasileira por minerais na sua trajetória de neutralidade climática

3.1. Contextualização Global e Nacional da Demanda por Minerais Críticos e Estratégicos

A IEA projeta que, sob cenários alinhados à meta de emissões líquidas zero para 2050, a demanda global por minerais deve triplicar até 2030 e quadruplicar até 2040. Segundo a Agência, a demanda global por lítio cresceu cerca de 30% em 2024, enquanto níquel, cobalto, grafite e terras raras apresentaram crescimento entre 6% e 8%, impulsionados principalmente por aplicações no setor de energia limpa (veículos elétricos, armazenamento e redes).³⁶ No mesmo documento, estima-se que o mercado agregado desses minerais, em 2024, já ultrapassava 325 bilhões de dólares, valor que pode mais do que dobrar até 2040 no cenário NZE (Net Zero Emissions).

Entretanto, essa trajetória disruptiva não ocorre em um ambiente de oferta homogênea: as cadeias produtivas de mineral possuem altos graus de concentração, especialmente no refino e no processamento, aumentando a vulnerabilidade a choques geopolíticos e logísticos. Segundo a IEA, em 2024 os três principais países refinadores já detinham, em média, 86% da capacidade de processamento para cobre, lítio, níquel, cobalto, grafite e terras raras — percentual superior aos 82 % observados em 2020. A dependência de poucos elos

36. IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025

da cadeia implica riscos significativos para a segurança mineral de nações que iniciam ou intensificam processos de industrialização verde.

Nesse cenário global, o Brasil possui características e vantagens singulares que o posicionam tanto como consumidor emergente quanto potencial ator estratégico nos mercados de MCE. O país detém algumas das maiores reservas mundiais de minerais como nióbio, grafita e terras raras, além de desenvolver projetos promissores de produção de lítio e outros elementos (e.g. projetos no polo “Lithium Valley” em Minas Gerais). O grande desafio consiste em articular uma estratégia de valorização interna desses minerais, integrando mineração, beneficiamento e tecnologia, a fim de reduzir vulnerabilidades externas e capturar mais valor agregado no país.

Diante desse contexto global de forte aceleração da demanda e elevada concentração de oferta, a análise da demanda brasileira por MCE torna-se ainda mais relevante. Na Seção 3, essa demanda será projetada no horizonte 2025–2050, considerando não apenas a expansão da infraestrutura tecnológica de baixo carbono, mas também os processos de substituição de equipamentos ao fim de sua vida útil. Esse exercício visa tanto fornecer subsídios para políticas minerais e industriais no Brasil quanto posicionar o país no panorama global de transição energética.

3.2. Premissas e Abordagem Metodológica

A estimativa da demanda brasileira por minerais críticos e estratégicos (MCE) foi construída a partir de uma abordagem integrada entre planejamento energético, modelagem econômica e análise tecnológica, tomando como referência os compromissos de mitigação e adaptação expressos na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) e na meta de neutralidade climática até 2050. Essa abordagem parte do reconhecimento de que a transição energética nacional demandará transformações profundas em setores intensivos em insumos minerais — notadamente energia elétrica, transporte, indústria e agricultura —, implicando em novas cadeias produtivas baseadas em tecnologias de baixo carbono.

O exercício de modelagem considera o cenário de referência de neutralidade de emissões adotado no âmbito do Programa de Transição Energética (PTE2), no qual o Brasil alcança emissões líquidas nulas de gases de efeito estufa (GEE) até meados do século (ver anexo A). O modelo utilizado busca a otimização de mínimo custo do sistema energético e agropecuário nacional, garantindo simultaneamente:

- (i) o atendimento da demanda por serviços energéticos e produtos agropecuários;
- (ii) o cumprimento das metas climáticas estabelecidas pela NDC; e
- (iii) a seleção endógena de tecnologias de mitigação.

A partir dessa estrutura, foram selecionadas múltiplas rotas tecnológicas capazes de reduzir emissões e sustentar o crescimento econômico e demográfico projetado. As rotas selecionadas pelo modelo representam conversores tecnológicos críticos para o alcance da neutralidade, compreendendo sistemas de geração elétrica (eólica, solar e nuclear), armazenamento estacionário de energia, motorização elétrica, baterias veiculares e por pilha à combustível, entre outros vetores associados à eletrificação e descarbonização da economia.

A avaliação da demanda de MCE foi realizada com base em uma análise qualitativa e quantitativa que pondera aspectos técnicos, econômicos e ambientais das principais famílias tecnológicas em cada rota. Essa metodologia permite identificar não apenas a viabilidade de adoção das tecnologias, mas também os requisitos materiais subjacentes — incluindo metais e minerais de relevância estratégica para o país, como lítio, níquel, cobalto, grafite, cobre e terras raras.

A trajetória de expansão tecnológica projetada até 2050 combina a consolidação de soluções maduras e economicamente competitivas — como baterias de íon-lítio, módulos fotovoltaicos de silício e turbinas eólicas de ímãs permanentes — com a introdução gradual de tecnologias emergentes condicionadas à redução de custos e superação de barreiras de escala e sustentabilidade.

Essa abordagem fornece as bases para a estimativa da demanda total e incremental de minerais críticos e estratégicos no Brasil, abrangendo tanto o acréscimo de estoques necessários à expansão de infraestrutura quanto às reposições decorrentes do fim de vida útil de equipamentos e componentes. O resultado é uma visão de longo prazo sobre como a trajetória de descarbonização nacional moldará o perfil mineral do país, com implicações diretas para políticas de mineração, inovação tecnológica e segurança de suprimento.

3.3. Principais Famílias Tecnológicas Analisadas

Foram avaliadas sete rotas de conversores tecnológicos, abrangendo sistemas de geração, armazenamento, motorização e conversão energética. A seguir, são descritas as características centrais, as tendências de uso e o horizonte de consolidação de cada uma.



Energia Nuclear

Tecnologia predominante: Reatores do tipo PWR (Pressurized Water Reactor).

Premissas: Considera-se a entrada em operação de Angra III em 2030, sem previsão de novas usinas até 2050.

Demanda mineral associada: Urânio enriquecido (U_3O_8), com foco exclusivo na geração elétrica.

Tendência:

- **Curto prazo (2025–2035):** operação plena de Angra I e II, retomando as ações para viabilizar a construção de Angra III.
- **Médio prazo (2035–2045):** conclusão de Angra III.
- **Longo prazo (2045–2050):** operação plena de Angra III, atuando em conjunto com as usinas nucleares Angra I e II.



Armazenamento Estacionário de Energia

Tecnologias avaliadas:

Convencionais: chumbo-ácido (Pb-ácido), Ni-Cd, NiMH, íon-Lítio (Li-íon), NaS, NaNiCl₂, Na-íon.

De fluxo: VRFB (vanádio), ZnBr (bromo-zinco), PSB (polissulfeto de bromo).

Critérios de seleção: densidade energética, eficiência no ciclo de carga/descarga, custo por MWh e maturidade tecnológica.

Tendência:

- **Curto prazo (2025–2030):** domínio das baterias de Li-íon (mais especificamente a LFP e NMC-alto níquel), bem como a presença de chumbo-ácido devido à sua participação já consolidada na indústria brasileira.
- **Médio prazo (2030–2040):** consolidação das baterias LFP como tecnologias dominantes, em detrimento da Chumbo-Ácido e da NMC de Alto Níquel. Ao mesmo tempo, uma introdução de baterias de Na-íon no sistema de armazenamento estacionário de energia brasileiro.

- **Longo prazo (2040–2050):** predominância das baterias LFP, com participação das NMC de Alto Níquel e aumento da presença de bateria de íon-sódio.



Motores Elétricos

Famílias avaliadas: Motor DC com escovas (BDC), Motor de Indução (IM), Motor Síncrono de Ímã Permanente (PMSM), Motor DC sem escovas (BLDC), Motor Síncrono com Excitação Elétrica (EESM), Motor de Relutância Chaveada (SRM).

Principais critérios: eficiência energética, torque específico, custo de fabricação e dependência de terras raras.

Tendência:

- **Curto prazo (2025-2030):** presença majoritária de motores de ímãs permanentes (PMSM) em transporte urbano. Em veículos leves, motores assíncronos por indução (IM) e motores de relutância comutada (SRM) seguem com participação menor, impulsionados pela maturação do setor e demandas diversificadas.
- **Médio prazo (2030-2040):** PMSM prevalece como escolha tecnológica, especialmente por sua excelente performance em perímetros urbanos — ampliando a dependência por terras raras. No entanto, nos veículos leves, ainda permanece a presença de motores de indução (IM) em menor quantidade, associadas a nichos de mercado específicos.
- **Longo prazo (2040-2050):** consolidação da adoção de motores PMSM, impulsionada pela forte atuação de montadoras chinesas no país, elevando a dependência de ETR, como exemplo, neodímio e disprósio.



Baterias para Veículos Elétricos

Famílias e gerações:

Pré-lítio: chumbo-ácido e Ni-MH.

Lítio (atual): LCO, LMO, LTO, LFP, NMC, NCA.

Pós-lítio (emergente): Na-beta, íon-metálico (Na, Zn, Mg), estado sólido (Li-S, Li-O₂), e metal-ar (Zn-ar, Al-ar, Fe-ar, Mg-ar, Ca-ar, Li-ar).

Critérios de priorização: densidade energética, custo por kWh, tempo de recarga, segurança e impacto ambiental.

Tendência:

- **Curto prazo (2025–2030):** domínio da tecnologia de LFP no Brasil para ônibus e caminhões devido à boa estabilidade térmica, maior vida útil e menor custo. Isso se estende para todos os períodos analisados. Em veículos leves, domínio das baterias LFP, por menor custo e boa segurança, com participação de NMC de Alto Níquel pela alta densidade energética.
- **Médio prazo (2030–2040):** redução da participação de NMC de Alto Níquel e avanço das baterias de LFP, impulsionado por custos competitivos e maior penetração de veículos chineses no mercado brasileiro.
- **Longo prazo (2040–2050):** manutenção do domínio das baterias LFP para ônibus, automóveis e caminhões. Em veículos comerciais leves, coexistência de LFP e NMC de Alto Níquel em um cenário de duopólio tecnológico.



Pilhas a Combustível

Tecnologias analisadas: Pilha à combustível Alcalina (PCA), Pilhas à Combustível de Membrana de Troca Aniônica (PCMTA), Pilha à combustível de Ácido Fosfórico (PCAF), Pilha à combustível de Carbonato Fundido (PCCF), Pilha à combustível de Óxido Sólido (PCOS).

Critérios: eficiência elétrica, temperatura de operação, vida útil, custo e adequação a aplicações veiculares ou estacionárias.

Tendência:

- **Curto prazo (2025–2030):** primeiros passos para a participação de PCMTA (Membrana de Troca Protônica) em veículos e sistemas portáteis, destacando-se entre as demais pilhas à combustível.
- **Médio prazo (2030–2040):** domínio das PCMTA (Membrana de Troca Protônica) devido à sua baixa temperatura de operação, alta densidade de potência, boa estabilidade e maior vida útil.

- **Longo prazo (2040-2050):** Manutenção da preponderância das PCMT, visto que as demais tecnologias ainda precisam atingir um estágio de maturidade tecnológica para então começar a ganhar escala produtiva no e de mercado, o que – através da revisão da literatura e pelos pontos aqui levantados – não aparenta ser factível até 2050.



Energia Eólica

Tecnologias avaliadas: Gerador de Indução de Gaiola de Esquilo (SQIG), Gerador de Indução de Rotor Enrolado (WRIG), Gerador de Indução Duplamente Alimentado (DFIG), Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes (PMSG) e Gerador Síncrono com Excitação Elétrica (EESG).

Critérios: fator de capacidade, custo nivelado (LCOE) e eficiência de conversão.

Tendência:

- **Curto prazo (2025-2030):** manutenção da predominância do DFIG no parque nacional.
- **Médio prazo (2030-2040):** participação de DFIG, com crescimento das turbinas PMSG, viabilizado pela presença de fabricantes chineses, que dispõem de melhor acesso a ímãs permanentes — o que facilita a adoção dessa tecnologia —, além de vantagens como maior tolerância a falhas, flexibilidade operacional e menores custos estruturais.
- **Longo prazo (2045-2050):** coexistência de DFIG e PMSG num cenário de duopólio tecnológico.



Energia Solar Fotovoltaica

Famílias avaliadas:

1ª geração: silício monocristalino e policristalino.

2ª geração: filmes finos (CdTe, CIGS, a-Si).

3ª geração: células orgânicas, perovskitas e multijunções III-V.

Critérios: eficiência, custo de produção, disponibilidade de insumos, estabilidade e impacto ambiental.

Tendência:

- **Curto prazo (2025–2035):** domínio absoluto do silício cristalino, consolidado pela maturidade industrial e custo competitivo.
- **Médio prazo (2035–2045):** crescimento gradual dos filmes finos (CdTe e CIGS), conforme superem desafios de eficiência e reduzam seu custo de energia nivelado (LCOE).
- **Longo prazo (2045–2050):** predomínio do silício cristalino e crescimento dos painéis CdTe e CIGS, impulsionados pela capacidade dessas tecnologias formarem painéis solares flexíveis — e, portanto, menor custo estrutural e de instalação.

Tendências de Consolidação e Substituição Tecnológica

A análise agregada das famílias evidencia uma trajetória de dualidade tecnológica até 2050:

- **Consolidação de tecnologias** — íon-lítio, silício cristalino, motores PMSM e pilhas PCMTMP — que dominam o mercado no curto e médio prazo;
- **Introdução gradual de tecnologias**, como baterias de Na-íon, turbinas PMSG, módulos fotovoltaicos CdTe e CIGS, que exigem avanços em P&D, infraestrutura de reciclagem e disponibilidade de minerais críticos.

A seleção das rotas vencedoras reflete a busca por equilíbrio entre maturidade e inovação: tecnologias suficientemente comprovadas para garantir confiabilidade e competitividade, mas abertas à incorporação de avanços que reduzam custos e ampliem a sustentabilidade ambiental. Essa abordagem permite visualizar, de forma integrada, como o portfólio tecnológico da transição energética impactará a demanda por minerais estratégicos, tanto em termos de expansão de capacidade quanto de substituição de componentes ao longo do ciclo de vida.

Ao analisar a evolução das famílias tecnológicas em setores-chave da transição energética até 2050, observa-se uma tendência clara de consolidação de tecnologias maduras, ao passo que soluções emergentes enfrentam barreiras econômicas, tecnológicas e de escala.

A evolução tecnológica até 2050 será marcada por uma combinação entre a

consolidação de tecnologias maduras e a introdução seletiva de inovações, condicionada à superação de barreiras econômicas, ambientais e de escala produtiva.

Conclusões em relação a cada uma das rotas tecnológicas analisadas:

1. **Nuclear:** em relação às usinas nucleares brasileiras, não são esperadas grandes alterações nas tecnologias empregadas, uma vez que não há planos para construção de outras usinas que não utilizem os reatores PWR;
2. **Armazenamento Estacionário:** as baterias de íon-lítio permanecem como a principal aposta para o cenário brasileiro, sobretudo pelas suas características técnicas superiores. No entanto, tecnologias alternativas como chumbo-ácido e Na-íon despontam como opções complementares;
3. **Motores Elétricos:** embora haja preocupação quanto à dependência de elementos de terras raras, a alta performance dos motores de ímãs permanentes (PMSM) e sua consolidação no mercado global indicam que deverão manter posição de liderança ao longo do período analisado, especialmente em aplicações urbanas no Brasil.
4. **Armazenamento Veicular:** as baterias LFP e NMC devem continuar dominando o mercado global e nacional, com destaque crescente para as LFP, dada sua competitividade econômica e sinergia com a crescente penetração de veículos chineses.
5. **Pilhas À Combustível:** A predominância das PCMTF se mostra provável até 2050, dada sua maior maturidade tecnológica em relação às demais alternativas ainda em fase de desenvolvimento.
6. **Eólica:** os geradores DFIG continuam predominando no curto prazo, mas a instalação local de fabricantes de turbinas com PMSG, associada à busca por maior escala e eficiência, tende a configurar um cenário de duopólio no médio e longo prazo.
7. **Solar:** os módulos de silício cristalino seguirão como tecnologia dominante até 2050, sustentados por sua maturidade e competitividade. Ainda assim, espera-se uma expansão gradual das tecnologias de filmes finos (CdTe e CIGS) a partir da década de 2040, à medida que superem os desafios associados a materiais críticos e eficiência. Tecnologias mais disruptivas, como perovskitas e células multijunção, devem permanecer restritas a aplicações de nicho ou em estágio pré-comercial no horizonte considerado.

Tabela 24: Tendências tecnológicas identificadas

Tecnologias	Famílias tecnológicas selecionadas		
	Curto prazo	Médio prazo	Longo prazo
Nuclear	Reatores PWR	Reatores PWR	Reatores PWR
Armazenamento Estacionário	Pb-ácido; Li-íon	Li-íon	Li-íon; Na-íon
Armazenamento Veicular	Li-íon (NMC e LFP)	Li-íon (NMC e LFP)	Li-íon (NMC e LFP)
Pilhas à Combustível	Pilhas a Combustível de Troca Protônica	Pilhas a Combustível de Troca Protônica	Pilhas a Combustível de Troca Protônica
Motores Elétricos	PMSM; IM; SRM	PMSM; IM	PMSM
Geradores de Turbinas Eólicas	DFIG	PMSG; DFIG	PMSG; DFIG
Painéis Fotovoltaicos	Silício-cristalino	Silício-cristalino; CdTe	Silício-cristalino; CdTe; CIGS

3.4. Estimativa da Demanda de Materiais

3.4.1. Abordagem Metodológica e Conceito de Intensidade Material

A estimativa da demanda total de materiais associada à transição energética nacional no horizonte 2025–2050 foi realizada a partir da combinação entre a projeção tecnológica do modelo energético e as intensidades materiais de cada família tecnológica.

O conceito de intensidade material (IM) representa a quantidade de determinado material (kg ou t) necessária para produzir uma unidade de capacidade tecnológica instalada — seja um MW de geração elétrica, ou MWh de armazenamento. Trata-se, portanto, de um indicador de conteúdo mineral incorporado a cada conversor tecnológico, que reflete o estágio tecnológico, a eficiência dos materiais e a maturidade produtiva da solução.

Além do incremento de capacidade nova, a estimativa inclui o estoque de substituição — isto é, os materiais necessários para repor equipamentos que atingem o fim de vida útil, assumindo taxas médias de durabilidade específicas por tecnologia. As intensidades materiais correspondentes a essa etapa do estudo estão detalhadas no Anexo B.

3.4.2. Material por Família Tecnológica

A seguir, são detalhadas as principais intensidades materiais consideradas para as tecnologias selecionadas pelo modelo energético, bem como suas tendências de evolução até 2050.



Energia Eólica

Principais materiais: cobre e elementos de terras raras — como exemplo: neodímio, praseodímio e disprósio — em geradores PMSG.

Tendências:

- Redução progressiva da massa estrutural por unidade de potência;



Energia Solar Fotovoltaica

Materiais principais: silício, prata, Índio, Gálio, cobre, Selênio, Cádmio e Telúrio.

Tendências: Crescente participação de CdTe e CIGS após 2035, exigindo maior demanda por índio, gálio, cádmio e Telúrio.



Armazenamento Estacionário de Energia

Materiais principais: lítio, níquel, manganês, cobalto, grafita e cobre.

Tendências:

- Menor teor de cobalto e níquel em novas gerações (LFP, Na-íon);
- Ampliação do uso de materiais abundantes (ferro e sódio).



Baterias Veiculares

Materiais principais: lítio, níquel, ferro, manganês, cobalto, cobre e grafita.

Tendências:

- Redução da participação do cobalto como consequência da perda de mercado da NMC nas baterias veiculares;

- Crescimento da penetração de baterias LFP com menor conteúdo crítico.



Motores Elétricos

Materiais principais: aço elétrico, cobre e ímãs permanentes (ETR).

Tendências:

- Adoção gradual de motores PMSM e em detrimento do SRM e do IM, exercendo maior pressão sobre terras raras;
- Redução do peso estrutural do veículo a partir de ligas metálicas mais modernas;
- Alta penetração da motorização elétrica.



Pilhas a Combustível

Materiais principais: platina³⁷.

Tendências:

- Expansão da durabilidade operacional (>20.000 horas);
- Introdução de catalisadores avançados.



Energia Nuclear

Material principal: urânio enriquecido (U_3O_8).

Tendências:

- Ganhos de eficiência na utilização de combustível;
- Ampliação do ciclo de reprocessamento e reaproveitamento de resíduos.

37. Considerando o recorte adotado, as unidades conversoras das pilhas a combustível são compostas principalmente por platina, PFSA e carbono black. Contudo, apenas a platina representaria uma restrição relevante no escopo da análise para estimar a demanda de materiais.

3.4.3. Projeção da Demanda de Materiais (2025–2050)

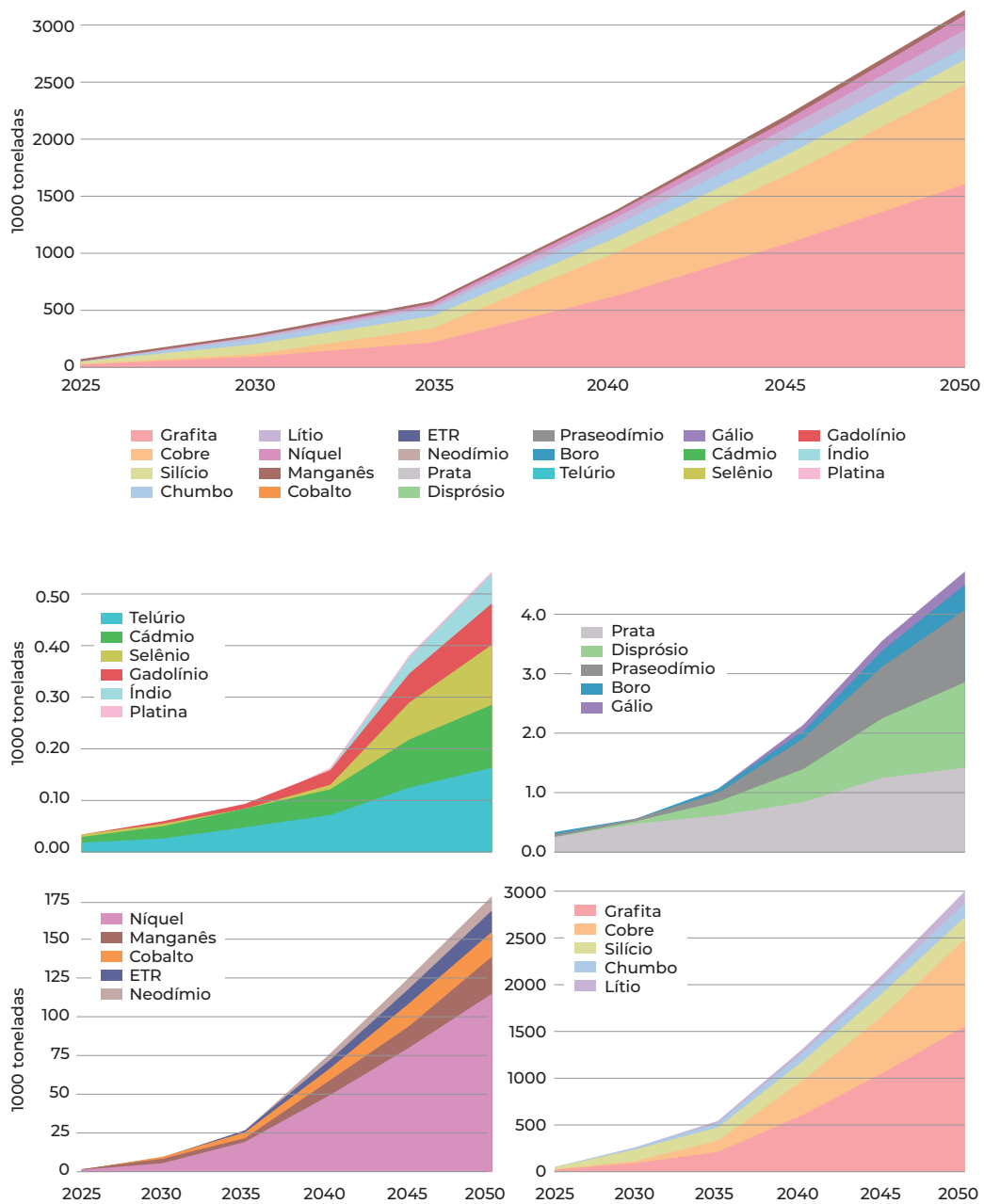
A combinação entre as trajetórias de expansão tecnológica e as intensidades materiais ajustadas permitiu estimar a evolução da demanda nacional por MCE associados aos conversores chaves para a transição energética entre 2025 e 2050 compatível com o atendimento da NDC brasileira e a sua meta de neutralidade climática³⁸. Segue abaixo alguns dos resultados que merecem destaque:

- **Lítio** - de uma demanda de pouco mais de mil toneladas de lítio em 2025, espera-se que a demanda deste mineral salte para 37,2 mil toneladas em 2045. Em termos acumulados, entre 2025 e 2050, espera-se uma demanda de 133 mil toneladas de lítio para atendimento dos conversores associados às baterias.
- **Grafita** - a demanda por grafita destaca-se como uma das que mais cresce. De uma demanda esperada de 13,9 mil toneladas em 2025, projeta-se uma demanda de 446 mil toneladas em 2045. Em termos acumulados, entre 2025 e 2050, espera-se uma demanda de 1,6 milhão de toneladas de grafita para atendimento dos conversores associados às baterias.
- **Cobre** - a demanda pelo cobre é impulsionada não apenas para a aplicação em baterias, embora esta corresponda a 75% da demanda total acumulada, mas também em turbinas eólicas e, principalmente, motores elétricos. Em 2025 projeta-se uma demanda total de 8,2 mil toneladas, chegando a 255,6 mil toneladas em 2045. No acumulado total do período, temos uma demanda esperada de 893,9 mil toneladas de cobre.
- **Cobalto** - demanda também concentrada para aplicação em baterias (95% da demanda total). Verifica-se um crescimento mais forte na demanda a partir de 2035. Até esse período, a demanda esperada é inferior a mil toneladas. Em 2045, a demanda esperada de cobalto chega a 4,7 mil toneladas. No período entre 2025-2050, a demanda projetada de cobalto é de 17,4 mil toneladas.
- **Níquel** - demanda também quase que exclusivamente impulsionada pelas baterias (99,2% da demanda total). Em 2025, há uma demanda de 1,4 mil toneladas, com forte aceleração após 2035, chegando a ~32 mil toneladas em 2045. Entre 2025 e 2050, a demanda total de níquel é de 117,2 mil toneladas.

38. Trata-se do aumento da demanda em função da maior difusão de tecnologias de baixo carbono, sem considerar a demanda para os demais usos dos materiais

- **Terras raras** - os principais elementos destacados no estudo foram o praseodímio, neodímio, disprósio e o gadolínio. Os volumes envolvidos são muito inferiores quando comparados aos demais minerais. O mais relevante, em termos de toneladas, diz respeito ao neodímio, representando quase 80% da demanda total acumulada destes elementos de terras raras. Tais elementos são utilizados na fabricação de geradores eólicos e motores elétricos. A demanda total destes elementos seria de aproximadamente apenas 70 toneladas, chegando ao final da década. Em 2045, a uma demanda total atinge 4,3 mil toneladas. No período entre 2025 a 2050, projeta-se uma demanda de 12,8 mil toneladas.
- **Urânio** - a demanda deste mineral está voltada para o atendimento previsto da geração de energia nuclear. Em 2025, espera-se uma demanda acumulada de 446 toneladas, passando por forte crescimento até 2040, ficando praticamente estável na última década entre 2040 e 2050. A partir de 2040, projeta-se uma demanda de 910 toneladas, a mesma demanda esperada até 2050. Entre 2025 e 2050, a demanda esperada é de 4,7 mil toneladas de urânio para o atendimento da geração nuclear.

Figura 24. Demanda material acumulada no período de análise, com os materiais aglutinados (superior) e separados por ordem de grandeza (inferior)



Fonte: Elaboração própria (2025).

Essas tendências configuram um cenário de transição materialmente intensiva especialmente após 2035³⁹, à medida que a ambição climática brasileira requer a adoção acelerada de tecnologias de baixo carbono para atingir emissões líquidas zero de Gases de Efeitos Estufa (GEE).

Esse aumento súbito pode trazer um risco de descasamento entre oferta e demanda, podendo criar gargalos nas cadeias produtivas. A evolução tecnológica, aliada à reciclagem e à inovação em design, será determinante para reduzir a pressão sobre a oferta de minerais críticos e fortalecer a autossuficiência mineral e industrial brasileira.

39. Antes de 2035, a maior parte da redução de emissões de GEE ocorre por meio de transformações no setor AFOLU, conforme apresentado no PTE 2 (ver anexo A). Dessa forma, é possível postergar uma penetração mais ampla de soluções de maior custo, como a adoção massiva de veículos elétricos, baterias estacionárias e fontes de energia renovável.



4.

Principais destaques a partir da análise comparativa entre oferta e demanda de minerais críticos e estratégicos no Brasil

Os estudos referentes à demanda e à oferta de minerais estratégicos foram conduzidos de forma independente e em paralelo, cada um com objetivos, metodologias e fontes de informação específicas ao seu escopo. O levantamento de demanda concentrou-se nos minerais relevantes para as tecnologias de conversão e armazenamento de energia, enquanto o estudo de oferta baseou-se principalmente na dotação mineral brasileira, considerando os minerais críticos e estratégicos para a transição energética e sua potencial disponibilidade para exploração. Em função dessas diferenças metodológicas e de enfoque analítico, as listas de minerais analisadas em cada estudo não são idênticas, ainda que apresentem interseções relevantes em alguns casos. Essa divergência não compromete a consistência dos resultados, mas evidencia a complementaridade das abordagens adotadas para representar, de maneira integrada, os desafios e oportunidades associados à transição energética no contexto nacional.

Um aspecto importante que viabilizou a análise comparativa para alguns minerais refere-se ao fato de que os levantamentos dos dados, tanto de oferta quanto de demanda, terem sido elaborados em termos “líquidos”, ou seja, os volumes calculados já correspondem efetivamente ao mineral “puro” (disponibilizado e/ou efetivamente consumido nos conversores). Sabe-se que para chegar aos diferentes tipos de minerais aqui abordados, é necessário a extração

bruta em base mássica muito superiores à quantidade específica dos minerais, em função da presença das rochas e demais impurezas.

No que se refere à oferta, foram consideradas informações sobre a dotação em recursos minerais brutos, as quantidades estimadas de minerais contidos nesses volumes e, quando disponíveis, dados sobre reservas e produção anual mais recente (ano-base: 2024), conforme apresentado nas seções seguintes. A estimativa da oferta mineral neste estudo baseou-se principalmente em dados de recursos, sendo importante considerar que apenas uma fração desse potencial é efetivamente convertida em reservas economicamente viáveis. Destaca-se ainda que as estimativas não incorporam perdas associadas às etapas de beneficiamento e processamento mineral, refletindo apenas os teores in situ dos recursos atualmente conhecidos.

Já pelo lado da demanda, além de serem as quantidades líquidas, vale a ressalva de que os números correspondem apenas ao uso para fins energéticos associado aos conversores, não abrangendo outras possíveis aplicações. Dessa forma, não trataremos da demanda total pelos minerais, apenas a parcela mais diretamente associada à transição energética.

A partir da lista de minerais estratégicos brasileiros, cada instituição de pesquisa definiu seu próprio recorte analítico. Dessa forma, o escopo das listas de minerais examinados sob as perspectivas da oferta e da demanda varia para alguns minerais, refletindo as distintas abordagens de cada instituição. Segue a lista levantada por cada instituição e quais deles é possível fazer a análise comparativa:

Tabela 25: Relação de Minerais por Escopo dos Estudos de Oferta e Demanda

Lista COPPE	Em comum	Lista CETEM
Chumbo	Praseodímio	Nióbio
Prata	Disprósio	Ferro
	Gadolínio	
Sílica	Cobre	Bauxita (Alumínio)
Boro	Neodímio	-
Cádmio	Lítio	-

Telúrio	Grafita	-
Selênio	Cobalto	-
Gálio	Níquel	-
Índio	-	-
Platina	-	-
Manganês	-	-

As terras raras (ETR) constituem um grupo de 17 elementos químicos com propriedades físico-químicas semelhantes, geralmente encontrados associados em determinados minerais. A proporção de cada elemento nos óxidos de terras raras varia de acordo com a composição geológica de cada jazida. Embora o Brasil possua a segunda maior reserva mundial de ETR, os dados públicos disponíveis sobre a distribuição individual desses elementos ainda são limitados.

Atualmente, as informações disponíveis sobre ETR no Brasil referem-se, em sua maioria, aos teores de óxidos mistos totais, que correspondem ao material atualmente produzido e exportado pelo país. No entanto, não há dados detalhados sobre os teores de elementos específicos, como neodímio (Nd), praseodímio (Pr) ou disprósio (Dy), nos depósitos brasileiros.

Essa limitação decorre, principalmente, do estágio ainda incipiente da produção nacional e da escassez de estudos geológicos aprofundados voltados à caracterização composicional dos depósitos. Os dados atualmente disponíveis sobre recursos e reservas geológicas referem-se ao total de ETR, sem discriminação individual dos elementos que os compõem. Como consequência, não há informações públicas consolidadas ou suficientemente detalhadas sobre o conteúdo de elementos estratégicos nos depósitos brasileiros.

Dessa forma, não é possível estabelecer com precisão estimativas que aproximem a oferta potencial à demanda projetada para elementos específicos de terras raras.

Os minerais para os quais foi possível desenvolver uma análise comparativa entre os dados de oferta e demanda foram os seguintes: cobre, grafita, lítio, níquel e cobalto.

Segue abaixo a tabela com todas as informações disponíveis sobre oferta e demanda dos minerais críticos e estratégicos no Brasil:

Tabela 26: Estimativas de oferta e demanda de minerais críticos e estratégicos no Brasil

OFERTA					DEMANDA	
Mineral	Recurso Bruto ⁴⁰ (Kt)	Teor Contido (Kt)	Reserva 2024 (Kt) ^{[2]41}	Produção 2024 (Kt) ²	Uso	Kt
Cobre	6.360.370	35.730	17.000	527 ⁴²	Bateria	684
					Energia Eólica	69
					Energia Solar	0
					Motor Elétrico	141
					Total	894
Grafita	698.330	105.350 ⁴³	74.000	68	Bateria	1.600
					Total	1.600
Lítio	151.260	740	390 ⁴⁴	10	Bateria	133
					Total	133
Níquel	2.020.387	12.770	16.000	77	Bateria	116
					Energia Eólica	0
					Motor Elétrico	1
					Total	117
Cobalto	221.080	110	N/D ⁴⁵	N/D	Bateria	16
					Energia Eólica	0
					Motor Elétrico	1
					Total	17
ETR	4.058.100	6.301	21.000	0,020	N/D	N/D
Neodímio	N/D	N/D	N/D	N/D	Energia Eólica	2
					Motor Elétrico	8
					Total	10
Disprósio	N/D	N/D	N/D	N/D	Energia Eólica	0
					Motor Elétrico	1
					Total	1
Praseodímio	N/D	N/D	N/D	N/D	Energia Eólica	0
					Motor Elétrico	1
					Total	1,22
Gadolínio	N/D	N/D	N/D	N/D	Energia Eólica	0
					Motor Elétrico	1
					Total	0,08

40. Recurso Mineral Bruto – mineral de interesse + estéril (rochas e impurezas).

41. USGS Mineral Commodity Summary 2025 - <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>

42. Cobre contido.

43. Carbono grafítico total.

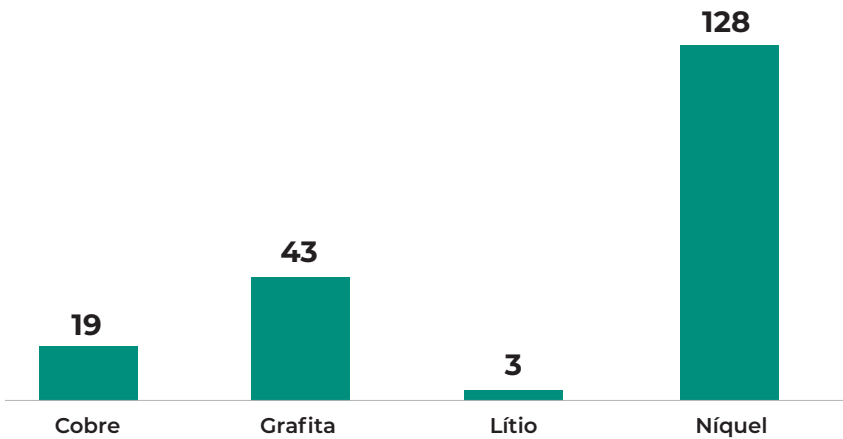
44. O valor atualizado para reservas de lítio é de 1.370.000 toneladas (MME).

45. N/D – não disponível

Conforme pode ser visualizado na tabela, observam-se amplas diferenças entre as massas de minério bruto necessárias e as massas dos minerais específicos contidos nesses materiais minerados. Os números também mostram que a transformação do recurso bruto específico de cada mineral em reserva efetiva também não é simples. A conversão de recursos minerais em reservas minerais requer a comprovação de viabilidade técnica e econômica, considerando fatores modificadores como lavra, processamento, infraestrutura, custos de produção, mercado (demanda e preço), além dos aspectos ambientais e sociais. Recursos classificados como medidos e indicados podem ser convertidos, respectivamente, em reservas provadas e prováveis, apenas após essa análise detalhada. Ademais, o avanço da produção mineral e do beneficiamento depende não apenas da disponibilidade das reservas, mas também dos insumos, tecnologias e maquinários necessários para viabilizar a operação.

Quando comparamos o atual nível de reserva com a demanda acumulada de 2025 a 2050, conforme gráfico abaixo, fica evidente que o país tem condições teóricas de suprir a sua própria demanda e atender em parte à demanda global. Para tal, o Brasil precisa desenvolver sua capacidade de inserção competitiva nas cadeias de valor globais — oferecendo produtos de qualidade, com maior valor agregado e a custos alinhados ao mercado.

Figura 25: Relação entre reservas atuais e demanda acumulada até 2050



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do projeto.

Para o cobalto não foi possível fazer esse indicador uma vez que não há dados disponíveis sobre o volume de reservas, tampouco sobre a produção.

Neste subgrupo de minerais críticos e estratégicos, o maior destaque, sem dúvida, é o níquel, cuja quantidade em forma de reservas é 128 vezes superior à necessária para atender a demanda dos setores econômicos para fins energéticos. No caso do cobre e da grafita as diferenças também são muito expressivas, de 19 e 43 vezes, respectivamente.

O único mineral que ainda não tem um volume de reservas tão superior à demanda acumulada para fins energéticos diz respeito ao lítio. No entanto, houve recentemente a divulgação de um novo número de reservas por parte do MME, o qual elevaria as reservas de lítio para 1,37 milhões de toneladas. Caso este novo número seja confirmado, a reserva passaria a ser mais de 10 vezes superior à referida demanda acumulada.

Contudo, a despeito dos grandes volumes de reservas, os níveis de produção destes minerais ainda são pequenos. Levando em conta que parte importante da produção atual é direcionada para outros usos que não os energéticos, a indústria extrativa destes minerais precisará de novos investimentos para que a demanda dos conversores seja de fato atendida por produção nacional.

Em suma, a análise deixa claro que não há restrições pelo lado da dotação mineral. O Brasil tem condições de produzir os minerais para atender sua própria demanda, ao mesmo tempo em que pode se tornar um grande fornecedor global destes minerais, cujas demandas crescerão em ritmo bastante acelerado nas próximas décadas. No entanto, a transformação das reservas em produção dependerá de esforços públicos e privados para o desenvolvimento deste segmento no país.

Ademais, este estudo evidencia também uma demanda crescente pelos conversores energéticos (baterias, motores elétricos, turbinas eólicas, painéis solares etc), que por sua vez demandam os minerais críticos e estratégicos para sua fabricação. Atualmente, a demanda pelos conversores é atendida majoritariamente por meio de importações, o que revela uma dependência tecnológica e industrial que limita a autonomia nacional em um setor estratégico. Considerando que o Brasil dispõe de uma oferta significativa de MCEs, surge a oportunidade de integrar essas duas pontas — a disponibilidade de insumos minerais e a necessidade de produtos tecnológicos — fortalecendo as cadeias internas de produção, assim como a geração de renda e emprego no país. Essa conexão é especialmente relevante para minerais como lítio, níquel, cobalto, cobre, grafita e terras raras, uma vez que são os principais minerais demandados para a fabricação dos referidos conversores.

Neste sentido, é importante destacar que possuir uma ampla dotação geológica não significa, necessariamente, deter uma vocação mineral consolidada. É o

uso inteligente e estratégico desses recursos, aliado ao fortalecimento das cadeias produtivas e industriais, que permite transformar o potencial geológico em vantagem competitiva, soberania mineral e liderança tecnológica. O Brasil, nesse sentido, tem condições de evoluir de uma nação com expressiva dotação geológica para um país com vocação mineral estruturada, capaz de agregar valor às suas cadeias produtivas, impulsionar a indústria mineral e metalúrgica e atuar de forma protagonista na transição energética global (IBRAM, 2025).⁴⁶

Ainda assim, é importante destacar que a relação entre oferta e demanda de minerais ocorre em uma cadeia globalmente interconectada, em que a extração, o beneficiamento e a fabricação das tecnologias finais frequentemente se dão em países distintos. Dessa forma, o uso dessas tecnologias no Brasil não depende necessariamente da disponibilidade doméstica dos minerais, mas da integração nas cadeias globais de suprimento. Além disso, a reciclagem de produtos em fim de vida pode se tornar uma fonte relevante de suprimento interno, especialmente para minerais como lítio, contribuindo para a segurança material e a sustentabilidade do ciclo produtivo nacional.

Cabe, portanto, ao Brasil definir em quais cadeias de valor estratégicas — como as de conversores energéticos, minerais críticos e tecnologias limpas — concentrará seus investimentos, de modo a fortalecer sua posição internacional, reduzir vulnerabilidades externas e assegurar autonomia e sustentabilidade em um cenário global caracterizado pela crescente demanda por recursos minerais e pela transição rumo a uma economia de baixo carbono.

46. IBRAM, 2025^o: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/05/IBRAM_news_green-paper_2025_web.pdf



5.

Principais barreiras e desafios à produção

○ Brasil, detentor de ampla base geológica e sólida tradição mineradora, reúne condições para ocupar posição de destaque na transição energética e na produção de tecnologias avançadas. Ainda assim, persiste uma distância significativa entre seu potencial geológico e sua capacidade produtiva e tecnológica.

O setor mineral brasileiro enfrenta barreiras estruturais e institucionais que limitam sua competitividade e reduzem o aproveitamento econômico de seus recursos. Entre elas, destacam-se a infraestrutura industrial insuficiente, o custo logístico elevado, a burocracia e complexidade tributária, a escassez de financiamento e mão de obra qualificada e a baixa integração entre ciência, tecnologia e indústria. Essas limitações dificultam o beneficiamento e a verticalização da produção, mantendo o país como exportador de bens minerais de baixo valor agregado.

Apesar desses desafios, há um conjunto de oportunidades emergentes para o Brasil posicionar-se nas cadeias globais de valor — tanto pela diversificação da base produtiva quanto pelo suprimento da demanda doméstica e internacional por minerais estratégicos. As seções a seguir apresentam o status regulatório, as principais limitações à pesquisa, exploração e processamento, e as oportunidades de inserção competitiva em cadeias específicas.

5.1. Status atual da legislação

O marco regulatório do setor mineral brasileiro encontra-se em processo

contínuo de adaptação às novas dinâmicas da economia global e à crescente demanda por minerais críticos, impulsionada pela transição energética. A governança mineral nacional passa a ocupar um papel estratégico, exigindo coordenação entre os eixos industrial, ambiental, tecnológico e de inovação.

A base normativa do setor é estruturada pelo Código de Mineração (Decreto-Lei nº 227/1967, regulamentado pelo Decreto nº 9.406/2018) e pela Agência Nacional de Mineração (ANM), criada pela Lei nº 13.575/2017. Esses instrumentos definem as regras fundamentais para pesquisa, lavra e fiscalização da atividade mineral. O arcabouço é complementado por planos de longo prazo, como o Plano Nacional de Mineração 2050 (PNM 2050) e o Plano Duodecenal de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (PDGMTM 2010–2030), ambos formulados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) com o objetivo de integrar as dimensões produtiva, ambiental e tecnológica do setor.

Nos últimos anos, o país tem avançado na articulação entre política mineral, transição energética e reindustrialização, incorporando a mineração à estratégia de desenvolvimento sustentável. Iniciativas como o Plano de Transformação Ecológica (PTE), a Nova Indústria Brasil (NIB) e o Plano Nacional de Transição Energética (PLANTE) promovem diretrizes de descarbonização, inovação tecnológica e competitividade industrial (ver tabela 1). As áreas priorizadas por esses planos — infraestrutura verde, tecnologias limpas e cadeias produtivas de baixo carbono — sinalizam o potencial para o fortalecimento de cadeias minerais integradas e sustentáveis no médio e longo prazo.

Tabela 27: Políticas que norteiam o processo de reindustrialização do Brasil

Programa de Transformação Ecológica - PTE	Nova Indústria Brasil - NIB	Plano Nacional de Transição Energética - PLANTE
Financiamento Sustentável	Cadeias agroindustriais	Cadeias agroindustriais
Adensamento tecnológico	Saúde	Saúde
Bioeconomia	Bem estar das pessoas nas cidades	Bem estar das pessoas nas cidades
Transição energética	Transformação digital	Transformação digital
Economia Circular	Bioeconomia, descarbonização e transição e segurança energética	Bioeconomia, descarbonização e transição e segurança energética
Nova infraestrutura e adaptação às mudanças climáticas	Defesa	Defesa

Fonte: CETEM, 2025.

Apesar desses avanços, persistem desafios que limitam a modernização do marco regulatório e a previsibilidade dos investimentos. A morosidade dos licenciamentos, a sobreposição de competências entre órgãos federais e estaduais, e a ausência de instrumentos estáveis de incentivo à agregação de valor continuam a restringir a competitividade do setor.

A complexidade da regulação ambiental e social, especialmente em áreas como a Amazônia, também exige novas soluções institucionais baseadas em diálogo, transparência e previsibilidade (FGV, 2025). Paralelamente, o Brasil precisa alinhar-se aos padrões internacionais de sustentabilidade e rastreabilidade mineral, cada vez mais exigidos por mercados e investidores e úteis para acompanhar o cumprimento de normas ambientais e sociais.

Superar essas lacunas é condição essencial para consolidar um ambiente regulatório favorável à inovação e à industrialização verde. A efetividade dessas reformas depende não apenas de novos instrumentos legais e econômicos, mas de coordenação interinstitucional e visão de longo prazo, capazes de conectar o marco regulatório à transição energética e à competitividade global do país.

Diante disso, as próximas seções combinam o diagnóstico das principais limitações à pesquisa, à exploração e ao processamento com a apresentação de alavancas regulatórias, tecnológicas e financeiras capazes de impulsionar a pesquisa mineral, promover a exploração responsável e ampliar a capacidade de processamento no Brasil.

5.2. Limitações à pesquisa, exploração e processamento

Mesmo com avanços regulatórios e institucionais, o setor mineral brasileiro ainda enfrenta barreiras estruturais que limitam sua capacidade de transformar potencial geológico em valor econômico. Estudos recentes do IBRAM e do CETEM (2024) destacam que a insuficiência de instrumentos de financiamento, a limitação da infraestrutura logística e tecnológica e a baixa integração entre pesquisa, indústria e inovação continuam a restringir o desenvolvimento de novas minas e a verticalização da produção. Esses fatores afetam diretamente as etapas de pesquisa, exploração e processamento, que permanecem marcadas por alta dependência externa, custos elevados e incertezas regulatórias.

Diante desse diagnóstico, esta seção tem como objetivo mapear os principais gargalos que ainda dificultam a expansão e a modernização da cadeia mineral brasileira, servindo como base para a formulação de estratégias capazes de aumentar sua competitividade e alinhar o setor às demandas da transição energética e tecnológica em curso.

5.2.1 Pesquisa e exploração

A fase de pesquisa e prospecção mineral no Brasil segue marcada por obstáculos estruturais que reduzem sua atratividade e limitam a descoberta de novas reservas. Embora o país tenha ampliado o conhecimento geológico nas últimas décadas, cerca de 49% do território encontra-se coberto na escala 1:250.000 — adequada apenas para uma visão geral —, enquanto apenas 27% dispõe de mapeamento 1:100.000, necessário para identificar áreas promissoras e avaliar riscos geológicos (MME, 2022; Amaral, 2025).

As assimetrias regionais agravam o quadro. Na Amazônia, apenas 37% da área está mapeada em 1:250.000 e 8% em 1:100.000 (MME, 2022), ao passo que no território não amazônico a cobertura em 1:100.000 alcança 55% (Amaral, 2025). Essa combinação de vazios cartográficos e baixa resolução limita a capacidade de estimar reservas e o potencial real, sobretudo em regiões de difícil acesso. O cenário decorre de baixa prioridade histórica e de restrições logísticas, ambientais e institucionais, elevando custos operacionais e a complexidade de novos levantamentos (Costa, 2023; Szlafsztein, 2018).

Além da limitação do mapeamento, a escassez de instrumentos de financiamento e alto risco exploratório também dificultam a expansão de projetos de pesquisa. Segundo estudo do IBRAM e CETEM (2024), o volume de recursos públicos destinados à pesquisa mineral é fragmentado, enquanto o investimento privado é desestimulado pela falta de garantias e pela instabilidade regulatória. Em comparação internacional, países como Austrália e Canadá destinam entre 5% e 8% de seus investimentos minerais à exploração geológica, enquanto o Brasil aplica menos de 1%, segundo o Fraser Institute e o World Mining Data (2023).

Outros gargalos estruturais comprometem a eficiência da prospecção, como:

- infraestrutura deficiente para mapeamento geológico detalhado;
- carência de mão de obra especializada em geologia, engenharia de minas e geoprocessamento;
- baixa integração entre universidades, institutos de pesquisa e empresas mineradoras;
- insuficiência de bases de dados geológicos públicas e atualizadas.

Apesar das limitações, o Brasil possui forte capacidade científica e institucional⁴⁷, com destaque para o CETEM, o SGB/CPRM e universidades federais com

47. Outros centros e laboratórios com atuação relevante em mineração e metalurgia — públicos e privados — estão mapeados no Catálogo de Centros de Tecnologia Mineral (IBRAM, 2018), que reúne mais de 70 instituições de pesquisa no país, indicando o potencial de articulação entre ciência, indústria e governo para a inovação mineral.

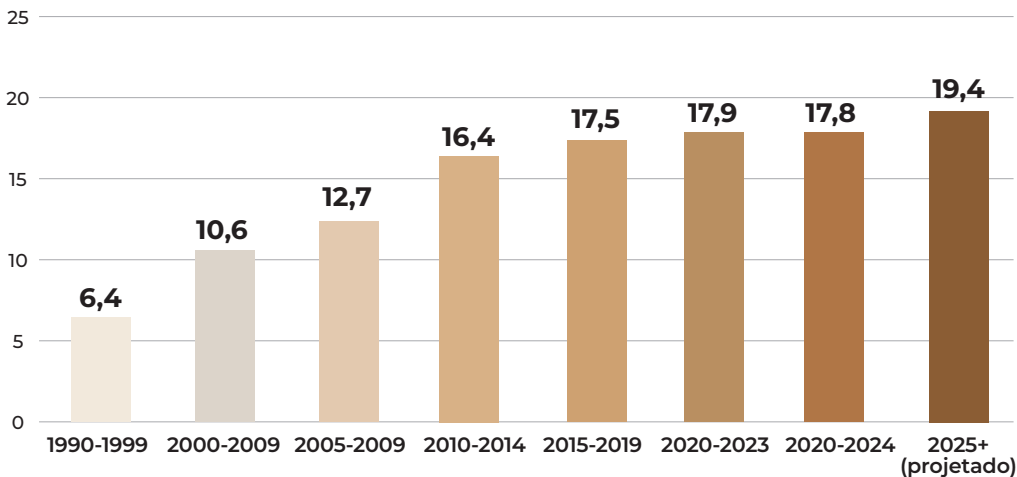
tradição em P&D em engenharia de minas, energia e sustentabilidade industrial, como a COPPE/UFRJ. Essas instituições formam parte de uma rede técnica capaz de sustentar redes de pesquisa aplicada, sobretudo se articuladas em torno de programas de P&D cooperativos, modelos de open data e parcerias internacionais voltadas à inovação e rastreabilidade mineral.

5.2.2 Tempo entre identificação de uma reserva e início da produção em escala comercial

O intervalo entre a descoberta de uma jazida e o início efetivo da produção mineral representa um dos principais gargalos estruturais da mineração no Brasil, com forte impacto sobre o fornecimento de minerais críticos à transição energética e digital. Globalmente, o tempo médio de desenvolvimento de minas pode chegar até 18 anos, aumento de 40% em relação a 15 anos atrás. Cada semana adicional de atraso pode gerar perdas de dezenas de milhões de dólares, afetando significativamente o Valor Presente Líquido (VPL) dos projetos (ERM, 2025).

Segundo dados da S&P Global Market Intelligence (2025), o tempo médio global para que uma mina entre em produção passou de 6,4 anos na década de 1990 para 19,4 anos em 2025, refletindo o aumento da complexidade regulatória e das exigências socioambientais (Figura 26).

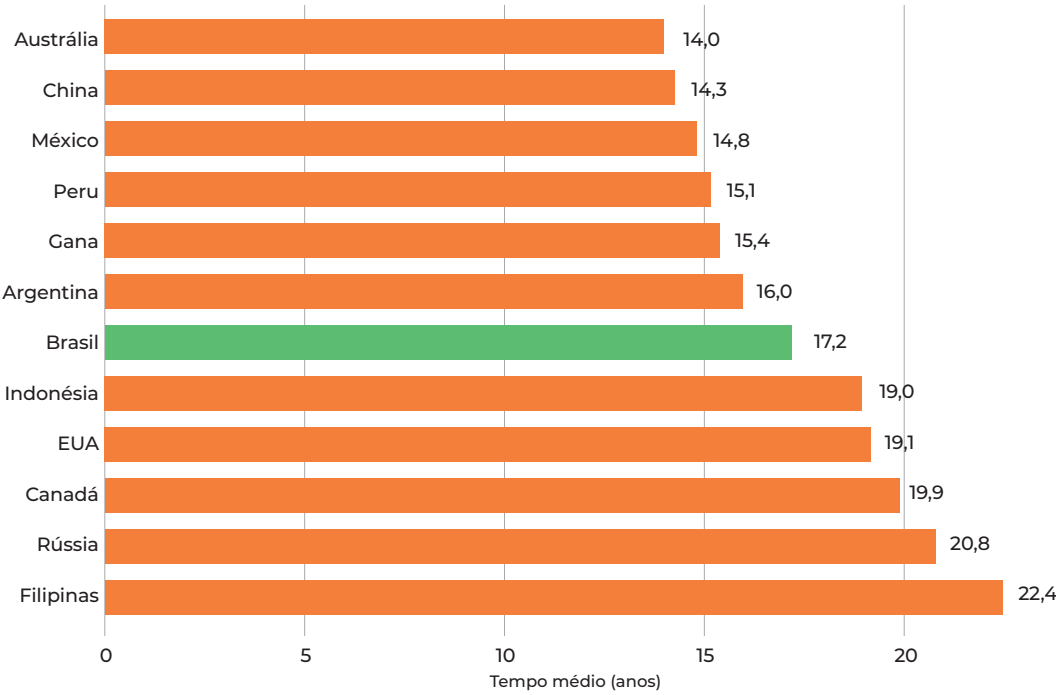
Figura 26. Evolução do tempo médio até o início da produção mineral (1990–2024)



Fonte: S&P Global Market Intelligence, 2025

Embora o Brasil possua ampla diversidade geológica e capacidade técnica consolidada, o ciclo de desenvolvimento de minas — da prospecção à operação comercial — ainda se caracteriza por elevada complexidade institucional e prazos superiores à média internacional. Atualmente, o tempo médio entre a descoberta e o início da produção mineral é de 17,2 anos, acima da média global de 15,5 anos (S&P Global, 2025). O país mantém um ciclo mais longo que o observado em economias mineradoras maduras, como Austrália, China e México, o que evidencia desafios persistentes de coordenação regulatória e ambiental. Esses números ilustram a dificuldade de converter o potencial geológico em produção efetiva — e, conseqüentemente, em competitividade — em um cenário de transição energética e digital em rápida aceleração.

Figura 27. Tempo médio entre descoberta e produção mineral, por país e por commodity (2024)



Fonte: Elaboração própria com base em dados do S&P Global Market Intelligence, 2025

Essa extensão temporal resulta de um conjunto de fatores interdependentes: crescente complexidade regulatória e socioambiental; morosidade e fragmentação dos processos de licenciamento ambiental, baixa previsibilidade regulatória, insuficiência de dados geológicos detalhados e desarticulação entre

órgãos públicos e investidores privados.

Além das limitações institucionais, há desafios estruturais ligados à infraestrutura e logística, especialmente em regiões de fronteira mineral, como a Amazônia Legal, onde as restrições ambientais e o isolamento geográfico elevam custos e atrasam a implantação de novos empreendimentos.

Em síntese, o tempo necessário para colocar uma mina em operação no Brasil não está alinhado com a velocidade e a urgência da transição energética e digital em curso. Se o país não avançar na integração entre as políticas mineral, ambiental e industrial (sem prejuízo à robustez das salvaguardas ambientais), corre o risco de perder oportunidades estratégicas em um cenário global de forte reconfiguração das cadeias minerais. A agilidade institucional, aliada à segurança jurídica e à sustentabilidade integrada, será determinante para que o Brasil converta seu potencial geológico em vantagem competitiva e liderança produtiva global.

5.2.3 Processamento e industrialização

Um dos maiores gargalos estruturais da cadeia mineral brasileira reside na etapa de beneficiamento, refino e transformação industrial. Historicamente, o país consolidou-se como exportador de minério bruto, com baixa capacidade de verticalização produtiva. Essa limitação reduz a geração de valor agregado e a competitividade do setor, que ainda depende da importação de produtos manufaturados derivados de seus próprios recursos minerais.

Em 2023, apenas 5% do lítio extraído no país foi processado internamente, e o níquel refinado representou menos de 40% da produção total, segundo dados do MME e ANM (2024). A insuficiência de infraestrutura industrial, os custos elevados de energia e insumos químicos, a baixa maturidade tecnológica em rotas de separação e purificação, a falta de incentivos fiscais e de crédito para plantas de refino e a insegurança regulatória em torno do licenciamento e tributação de operações industriais compõem os principais entraves.






Esses gargalos técnicos se inserem em um ambiente econômico marcado pelo chamado “Custo Brasil” — um conjunto de barreiras estruturais que inclui alta carga tributária, burocracia, deficiências logísticas e incertezas regulatórias, que encarecem a produção mineral e reduzem a atratividade de novos investimentos. A falta de previsibilidade fiscal e a complexidade do sistema de licenciamento seguem como entraves à expansão de projetos e à consolidação de um ambiente de negócios mais competitivo.

No campo tributário, o sistema brasileiro de *royalties* (CFEM) incide sobre o faturamento bruto, com alíquotas que variam de 1% para o ouro a 3% para o manga-

nês e 2% para outras substâncias, o que, embora comparável a modelos como o canadense ou o australiano, carece de mecanismos de reinvestimento produtivo, incentivos à inovação e integração com políticas de agregação de valor.

A Tabela 28 sintetiza as diferentes estruturas de cobrança de *royalties* minerais em países selecionados. Apesar de o Brasil apresentar alíquotas moderadas e competitivas em termos internacionais, a ausência de instrumentos de reinvestimento e de estímulo tecnológico contribui para a defasagem industrial e a baixa taxa de beneficiamento doméstico.

Tabela 28. Carga tributária e competitividade no setor mineral





País	Tipo de Cobrança	Faixa média de incidência ⁴⁸	Observações Principais
 Brasil	Receita bruta de venda	1% (ouro), 3% (manganês), 2% (demais substâncias)	Sem destinação específica para inovação ou P&D
 Canadá	Receita líquida (varia por província)	5% a 14%	Incentivos fiscais regionais e reinvestimento local
 Austrália	Produção (por tonelada ou percentual equivalente, conforme estado)	3% a 7% (equivalente médio)	<i>Royalties</i> vinculados a reinvestimento em tecnologia e inovação local
 China	Receita bruta de venda	1% a 9% (ferro), até 12% (grafita)	Controle estatal e subsídios à verticalização
 EUA	Receita bruta (por estado)	2% a 12,5%	Estrutura complexa, mas previsível e descentralizada

Fonte: Elaboração própria com base em dados do CETEM, 2025.

Complementarmente, uma análise comparativa mais ampla — apresentada na Tabela 29 — evidencia como fatores institucionais e regulatórios influenciam a competitividade do setor mineral em escala global. Países como Austrália, Canadá e Estados Unidos se destacam pela maturidade de seus mecanismos fiscais, transparência nos processos de licenciamento, estabilidade política e eficiência administrativa. Mesmo com elevado controle estatal, a China ocupa posição de destaque por sua dotação mineral, capacidade produtiva e poder de formação de preços.

48. As faixas representam médias ou valores equivalentes de cobrança de *royalties* sobre produção ou receita, conforme metodologia de cada país.

Tabela 29. Classificação dos principais países mineradores e o Brasil quanto aos indicadores de desenvolvimento do setor mineral⁴⁹

Indicadores de desenvolvimento	 Brasil	 EUA	 Austrália	 Canadá	 China
Viabilidade fiscal e regulatória					
Maturidade do sistema tributário					
Transparência e eficiência dos processos de licenciamento					
Sistema de pagamento de <i>royalties</i>					
Compatibilidade da carga tributária					
Nível de desburocratização interna					
Segurança energética					
Competência regulatória					
Estabilidade da política mineral					
Liberdade nas relações comerciais					
Maturidade da gestão ambiental					
Contribuição para produção mineral global					
Vocação mineral					
Capacidade de formação de preço					

Muito altoAltoMédioMédio-baixoBaixo

Fonte: CETEM, 2025.

49. As classificações de “Muito Alto”, “Alto”, “Médio”, “Médio-Baixo” e “Baixo” para cada indicador refletem a percepção geral do setor de mineração internacional em 2024 sobre o ambiente de negócios e operacional em cada país. Essa percepção é construída a partir de uma análise de diversos fatores cruciais para o investimento e a atividade minerária. As informações foram compiladas com base em relatórios e pesquisas de organizações renomadas no setor, como o Fraser Institute (Annual Survey of Mining Companies 2024), análises de mercado da Deloitte & Touche LLP (Government of Brazil Mining Sector Technical Support and Cooperation Reports) e KPMG/ICMM (International Council on Mining and Metals), dados de associações do setor mineral (como o IBRAM no Brasil e a PDAC no Canadá), além de notícias e análises econômicas relevantes publicadas ao longo de 2024. É importante ressaltar que essas classificações representam uma síntese da visão predominante da indústria e podem ter nuances dependendo da fonte específica ou do tipo de commodity mineral.

Além das barreiras internas de natureza fiscal e regulatória, o Brasil enfrenta desafios estruturais inseridos em um contexto internacional de forte concentração geográfica do processamento de minerais críticos. Atualmente, a China responde por cerca de 80% do refino de terras raras e 60% do lítio e do cobalto (IEA, 2024), o que reforça sua posição dominante nas cadeias globais de valor e amplia a vulnerabilidade de países exportadores de matérias-primas. Países como Austrália e Canadá têm buscado reduzir essa dependência por meio de programas de estímulo ao *midstream* — fase intermediária entre a extração e a manufatura —, combinando incentivos tributários, crédito direcionado e apoio tecnológico para expandir suas capacidades industriais.

O Brasil, embora disponha de vantagens geológicas e capacidade científica relevantes, ainda carece de uma política industrial mineral robusta, capaz de criar condições equivalentes de competitividade e promover a integração entre extração, transformação e inovação tecnológica. Superar esses entraves é essencial para converter o potencial geológico em protagonismo produtivo.

Nesse contexto, as tendências globais de reconfiguração das cadeias minerais e a crescente demanda por tecnologias de baixo carbono abrem novas oportunidades estratégicas para o país.



6.

Oportunidades de investimentos e cooperação

A reconfiguração das cadeias globais de minerais críticos e estratégicos cria um ambiente favorável para o Brasil expandir suas atividades e avançar para etapas de maior valor agregado — sobretudo beneficiamento e refino. Depois de décadas com perfil primário-exportador, o país reúne hoje condições geológicas, técnicas e institucionais para competir melhor no *midstream*.

A posição de destaque do Brasil ganha relevância diante da demanda crescente por insumos da transição energética. Projeções do SGB/MME (2025) sinalizam risco de insuficiência de oferta até 2050, elevando a criticidade desses minerais, destacando grafita, cobre, lítio, níquel, terras raras e ferro como vetores centrais para o avanço industrial.

Transformar essa dotação natural em capacidade produtiva e tecnológica exige políticas industriais consistentes, marcos regulatórios estáveis e integração entre pesquisa e indústria. A importância dos minerais para a transição reforça a necessidade de desenvolver cadeias domésticas capazes de suprir a demanda interna e posicionar o Brasil como fornecedor confiável e sustentável no mercado global.

Para tal, o Brasil possui — e deve continuar desenvolvendo — as seguintes alavancas:

- **Mecanismos econômicos e linhas de financiamento:** o governo e o setor privado têm criado mecanismos como fundos de investimento e linhas de crédito específicas. Um exemplo é o edital FINEP-BNDES para fomentar

planos de negócios que visem a transformação de minerais estratégicos, com o orçamento de R\$5 bilhões, linhas de crédito, participação acionária em empresas e recursos não reembolsáveis. Essas iniciativas estimulam novos projetos, atraem tecnologia e facilitam a verticalização da cadeia produtiva mineral.

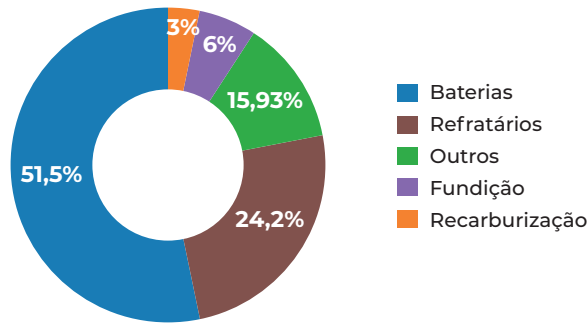
- **Modernização regulatória e estratégia de políticas públicas:** projetos de lei e planos estratégicos (PL 2780/24, MEL, PlanGeo) visam simplificar processos, fortalecer o setor e oferecer maior previsibilidade e segurança jurídica. Regulamentações mais claras podem aumentar a atratividade para investidores e promover a sustentabilidade. Uma estratégia mineral abrangente e robusta fornece um rumo e garante a integração com políticas industriais e de desenvolvimento.
- **Protagonismo estadual na governança mineral:** Estados brasileiros vêm assumindo papel estratégico na agenda mineral. Minas Gerais e Goiás lideram com planos e órgãos próprios para fomentar o setor, enquanto Amazonas, Bahia, Ceará, Pará e Rio Grande do Norte desenvolvem iniciativas regionais voltadas à pesquisa e atração de investimentos. Esse movimento descentralizado, quando alinhado com os objetivos nacionais, reforça a governança mineral, estimula o desenvolvimento sustentável e amplia o protagonismo do Brasil nas cadeias globais de minerais estratégicos.
- **Integração regional e cooperação internacional:** A articulação com outros países da América Latina pode reduzir desigualdades, aumentar a competitividade e evitar que a região permaneça apenas fornecedora de matérias-primas. A integração fortalece a posição estratégica na economia global.

À luz desse panorama, as subseções a seguir abordam alguns minerais prioritários — selecionados por sua relevância para a transição energética e pelo potencial do Brasil em seu suprimento —, detalhando onde avançar no *midstream* (beneficiamento/refino) e em P&D aplicado, em articulação com políticas nacionais e iniciativas estaduais.

6.1. Grafita

Como mencionado, a grafita é um insumo crítico para a transição energética, com papel central nas baterias de íon-lítio usadas em veículos elétricos e em sistemas de armazenamento. Hoje, as baterias já respondem pela maior parcela do consumo global de grafita (~51%), superando aplicações industriais tradicionais como refratários e fundição (Figura abaixo).

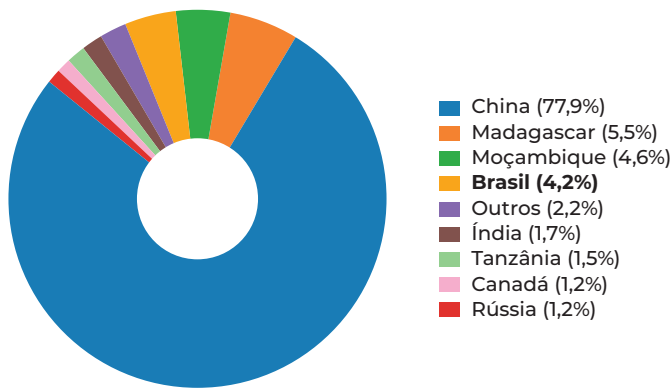
Figura 28. Principais aplicações da grafita



Fonte: <https://natural-resources.canada.ca>

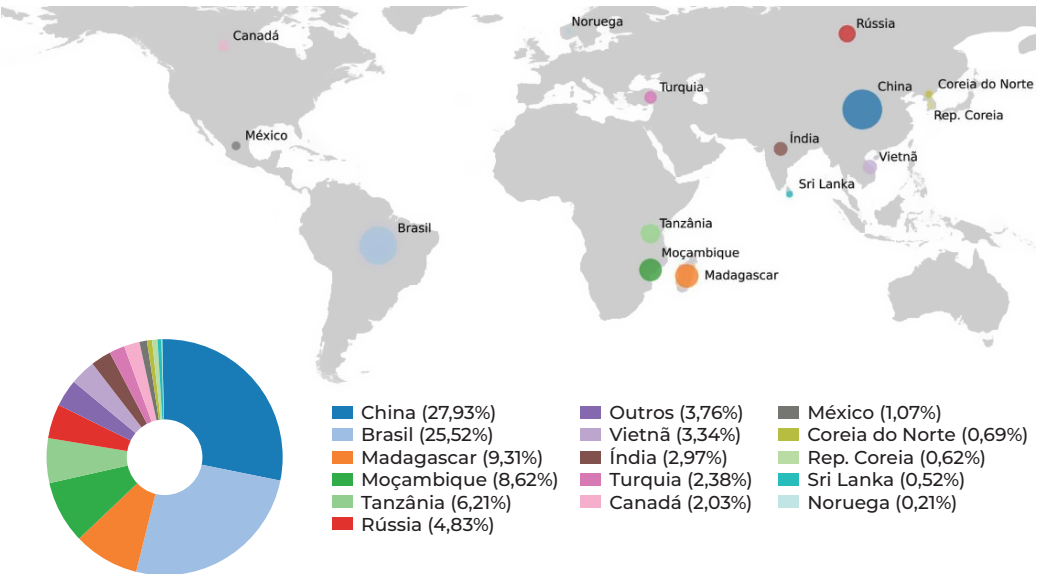
O panorama internacional é altamente concentrado: a China responde por cerca de 78% da produção de grafita natural e 60% da sintética, além de deter quase um terço das reservas. O Brasil ocupa posição estratégica, com 25,5% das reservas mundiais (≈ 74 Mt; USGS, 2025) e é o 4º maior produtor global, com cerca de 4,2% da produção global. Em 2024, a produção nacional atingiu 68 mil t (+2,6% a/a); a Mina de Santa Cruz (BA) entrou em operação em 2024 e planeja expandir de 12 mil para 50 mil t/ano.

Figura 29. Distribuição da produção global de grafita entre os principais países produtores



Fonte: CETEM, 2025

Figura 30. Distribuição dos recursos globais de grafita

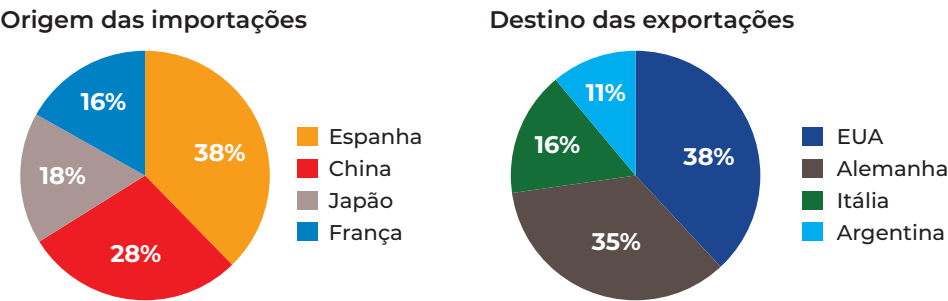


Fonte: CETEM, 2025

Apesar da dotação geológica e do ganho recente de produção, o país ainda está concentrado nas etapas iniciais da cadeia, com baixo processamento interno. Província Bahia-Minas e o Cinturão Grafítico do Ceará despontam como polos para atrair investimentos, inovação tecnológica e consolidar clusters de beneficiamento e refino de grafita anódica.

No comércio exterior, a balança brasileira foi deficitária em US\$ 42,5 milhões (2023). O Brasil exporta majoritariamente grafita natural bruta e importa produtos refinados e sintéticos de maior valor agregado. Os principais destinos das exportações são EUA e Alemanha; as importações vêm sobretudo de Espanha e China (ver figura abaixo).

Figura 31. Origem das importações e destinos das exportações brasileiras de grafita: participação por país (%)



Fonte: Sumário mineral brasileiro 2024.

A estrutura comercial atual confirma o perfil ainda primário-exportador, o que mantém déficit na balança e dilui a captura de valor doméstico. Reverter esse quadro exige base tecnológica e industrial mais robusta — combinando inovação, estímulos à industrialização e padrões de sustentabilidade/rastreabilidade — para reduzir assimetrias, atrair CAPEX e garantir acesso a mercados mais exigentes.

Oportunidades em grafita

Três frentes integradas podem orientar projetos e parcerias:

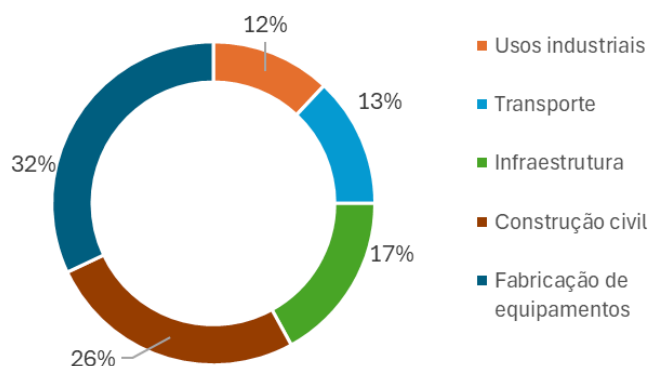
- **Potencial para integração produtiva e agregação de valor:** ampliar a capacidade de tratar a grafita para uso em baterias (purificação e preparo do material anódico), reduzindo a dependência de importados. Polos como Bahia, Minas Gerais e Ceará podem atrair joint ventures e parcerias público-privadas para instalar/expandir plantas e consolidar um ecossistema ligado à cadeia de baterias e a componentes elétricos.
- **Inovação tecnológica e sustentabilidade:** aproximar empresas, instituições como SGB/CPRM, CETEM e universidades para desenvolver projetos-piloto e plantas de demonstração, aumentar a qualidade do produto e melhorar o aproveitamento de resíduos industriais e de baterias (reciclagem). O SGB (2025) destaca que as formações geológicas brasileiras favorecem grafita de boa qualidade e que há amplo espaço de crescimento, com interesse do governo em desenvolver a produção — base para acelerar testes e novas rotas de processamento com menor impacto ambiental.

- **Cooperação internacional e posicionamento geopolítico:** firmar acordos com fabricantes de baterias e montadoras para *offtakes* e transferência de tecnologia; adotar rastreabilidade e rotulagem de baixo carbono para acessar mercados mais exigentes; e buscar financiamento verde para projetos no *midstream*. Com demanda global em alta, essa agenda ajuda a posicionar o Brasil como fornecedor confiável de grafita para baterias, com padrão ESG competitivo.

6.2. Cobre

O cobre é um insumo estratégico para a transição energética e a digitalização, presente em painéis solares, turbinas eólicas, veículos elétricos e estações de recarga, armazenamento de energia e redes inteligentes, além de aplicações em eletrônica, telecomunicações e data centers (Natural Resources Canada, 2025). Suas propriedades — alta condutividade elétrica/térmica, maleabilidade e resistência à corrosão — sustentam seu uso disseminado na infraestrutura moderna.

Figura 32. Principais aplicações do cobre no cenário global

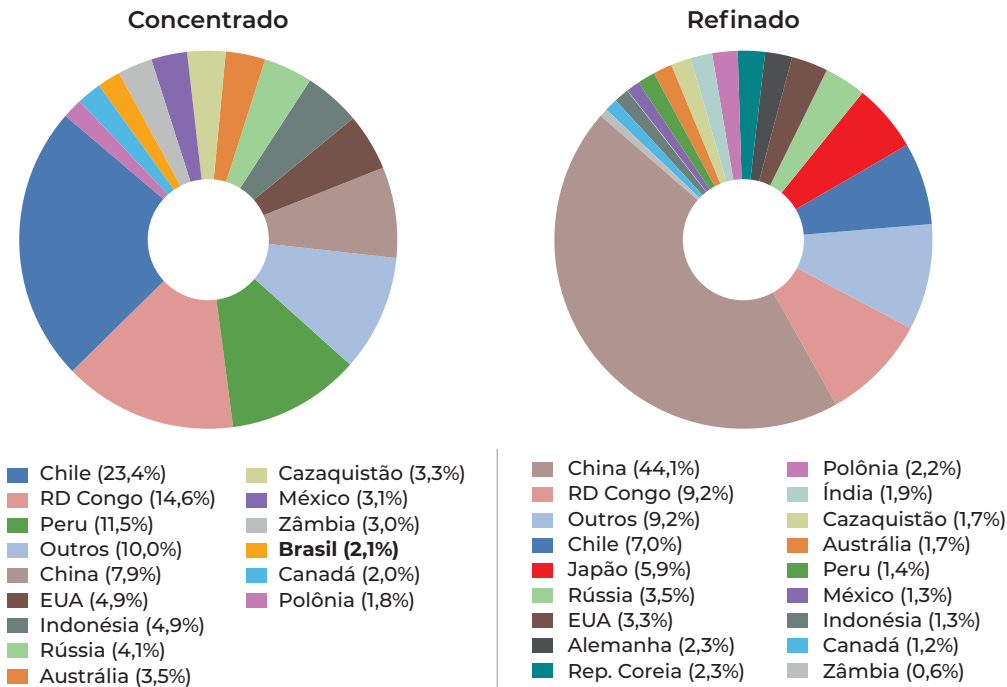


Fonte: elaboração própria com base em dados do Natural Resources Canada, 2025

Além de versátil, o cobre é pilar da economia circular: mantém integralmente suas propriedades químicas e físicas após sucessivos ciclos de reciclagem, sem perda de desempenho (ICSG, 2025; Natural Resources Canada, 2024). Em 2024, foram recuperadas ~150 kt de pós-consumo e reinseridas 720 kt de sucata industrial (USGS, 2025), consolidando a reciclagem como suprimento secundário relevante e reforçando seu papel em economias de baixo carbono e alta eficiência material (IBRAM, 2024).

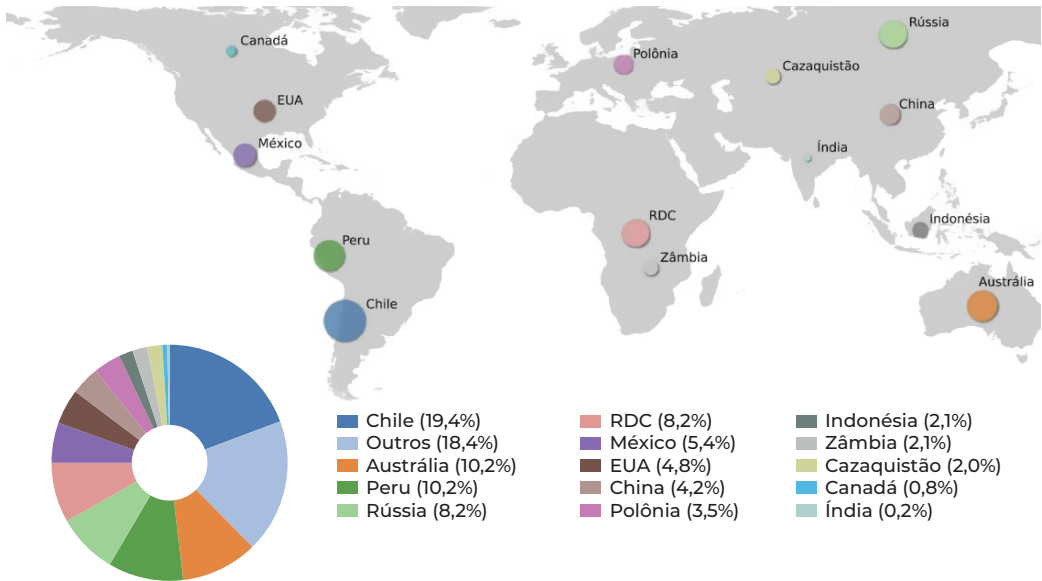
No panorama internacional, a produção permanece concentrada: o Chile lidera o minério, seguido por República Democrática do Congo, Peru e China — esta última responde pela maior parcela do cobre refinado (Figura abaixo). Segundo o USGS (2025), os recursos globais totalizam cerca de 2,1 bilhões de toneladas (1,5 bilhão ainda não exploradas e 0,6 bilhão já produzidas), com estimativas de 3,5 bilhões de toneladas ainda não descobertas. Nesse contexto, o Brasil detém reservas da ordem de 17 milhões de toneladas, cerca de 1,9% do total mundial (SGB/MME, 2025), ocupando a 10ª posição global. A dotação geológica concentra-se na Província Mineral de Carajás e em áreas emergentes de Goiás e Bahia, o que sustenta potencial de expansão produtiva em um mercado cada vez mais competitivo e geopoliticamente sensível.

Figura 33. Distribuição da produção global de cobre entre os principais países produtores



Fonte: CETEM, 2025

Figura 34. Distribuição dos recursos globais de cobre



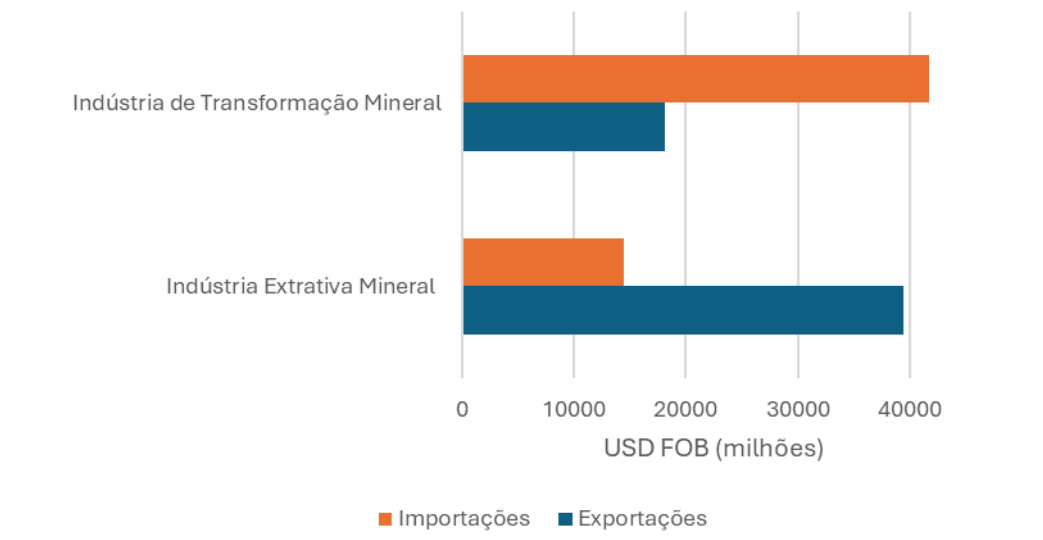
Fonte: CETEM, 2025

A demanda por esta *commodity* possui tendência crescente, dada a ampla gama de aplicações do elemento em tecnologias diversas — como a eletrificação e a expansão das redes —, mas a abertura de novas minas avança lentamente, com crescimento concentrado em projetos *brownfield*⁵⁰. Do ponto de vista técnico, o avanço metalúrgico permite operar teores mais baixos, compensando a exaustão de depósitos de alto rendimento; ainda assim, persiste o descompasso entre oferta e demanda (Northey, 2014).

No comércio exterior, a balança brasileira do cobre permanece deficitária: o país exporta cobre majoritariamente concentrado e importa produtos refinados e manufaturados de maior valor agregado. As figuras abaixo evidenciam a baixa integração industrial doméstica e a dependência tecnológica nas etapas de refino e transformação.

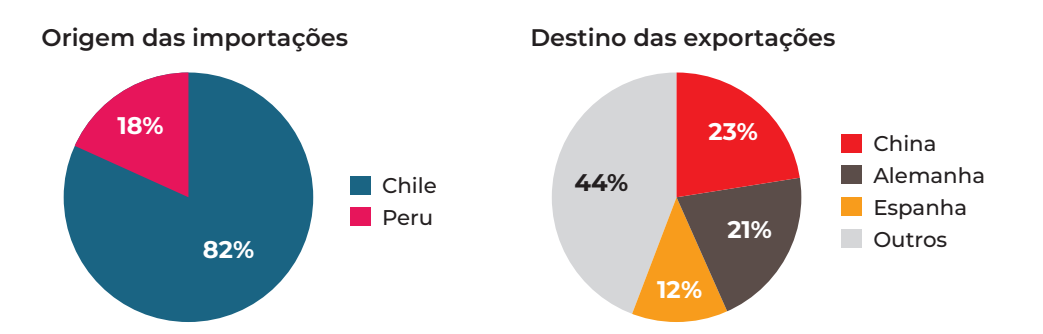
50. Em mineração, *brownfield* refere-se a expansões, reativações ou novas frentes em torno de operações existentes, aproveitando infraestrutura e licenças já instaladas.

Figura 35. Importações e exportações de produtos de cobre em 2024



Fonte: CETEM, 2025.

Figura 36. Origem das importações e destinos das exportações brasileiras de cobre: participação por país (%)



Fonte: CETEM, 2025.

Em síntese, capturar mais valor exige avançar no *midstream* — fundição/re-fino até cátodo, laminação e fio-lâmina — com energia competitiva, logística eficiente e previsibilidade regulatória. A reciclagem é uma alavanca estrutural.

Oportunidades em cobre

Três frentes integradas podem orientar projetos e parcerias:

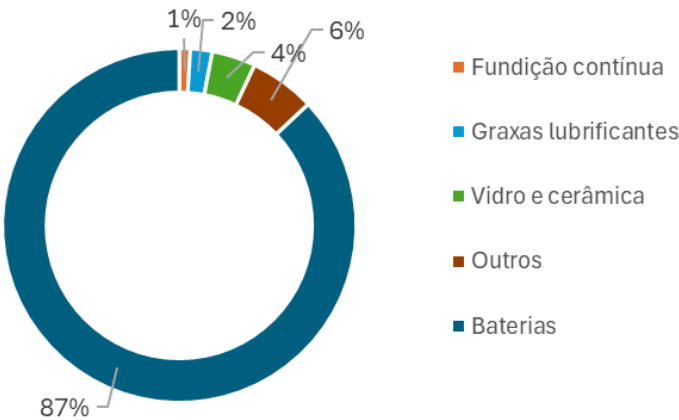
- **Potencial para integração produtiva e agregação de valor:** a expansão da capacidade doméstica de refino e fundição é essencial para reduzir o déficit comercial e consolidar um polo nacional de cobre refinado. O estímulo à verticalização industrial⁵¹, com estímulos a *joint ventures* e parcerias público-privadas em polos como Carajás, Vale do Curaçá e Goiás, permitiria atrair investimentos voltados à produção de cabos, ligas e componentes elétricos.
- **Inovação tecnológica e sustentabilidade:** o fortalecimento da rede científica — liderada por instituições e universidades federais — pode ampliar a competitividade brasileira nas etapas de beneficiamento, reciclagem e refino. Programas de P&D cooperativo, voltados à metalurgia verde, à recuperação de subprodutos e à rastreabilidade de origem, são fundamentais para inserir o Brasil nas cadeias de fornecimento sustentáveis. Além disso, a reciclagem deve ganhar centralidade na estratégia nacional, elevando a participação do cobre secundário e reduzindo a pressão sobre novas lavras.
- **Cooperação internacional e posicionamento geopolítico:** o Brasil tem potencial para liderar, junto a Chile e Peru, uma agenda regional de cobre sustentável, baseada em padrões ambientais convergentes e transparência nas cadeias de suprimento. A formação de um corredor sul-americano do cobre, articulado em torno de inovação, eficiência energética e certificação ESG, fortaleceria a posição do país em fóruns como o G20 e a COP 30, ampliando sua influência na governança global de minerais críticos.

6.3. Lítio

O lítio é um metal alcalino com propriedades físico-químicas singulares — baixa densidade, alto potencial eletroquímico e elevada reatividade com eletrólitos — que o colocam no centro da corrida por fontes de energia mais limpas e eficientes. Embora tenha histórico de uso em graxas lubrificantes, fármacos, cerâmicas e vidros, consolidou-se, nos últimos anos, como insumo estratégico para baterias de veículos elétricos e híbridos. Hoje, estima-se que 87% do uso global esteja em baterias, com os demais 13% distribuídos entre aplicações industriais e de consumo (USGS, 2025).

51. A verticalização da cadeia mineral depende da reindustrialização e de uma demanda que viabilize economicamente as etapas de maior valor agregado, como beneficiamento, refino e transformação industrial.

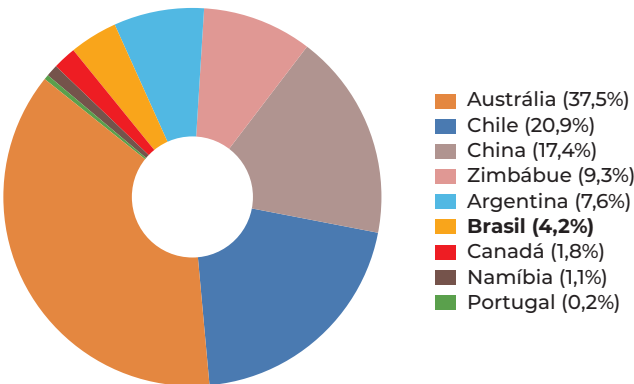
Figura 37. Principais aplicações do lítio



Fonte: CETEM, 2025.

Em 2024, a oferta global de lítio alcançou ~240 mil t LCE (+18% vs. 2023), com produção concentrada em Austrália (~91,7 kt), Chile (~41,4 kt), China (~35,7 kt) e Argentina (~8,63 kt) (USGS, 2025). Apesar do avanço de capacidade, a cadeia permanece geograficamente concentrada e sensível a choques de oferta. Os recursos globais somam ~115 Mt, dos quais ~59,3 Mt estão na América Latina; as reservas totalizam ~30 Mt, com Chile ~31% e Austrália ~23,3% (USGS, 2025).

Figura 38. Distribuição da produção global de lítio entre os principais países produtores⁵²

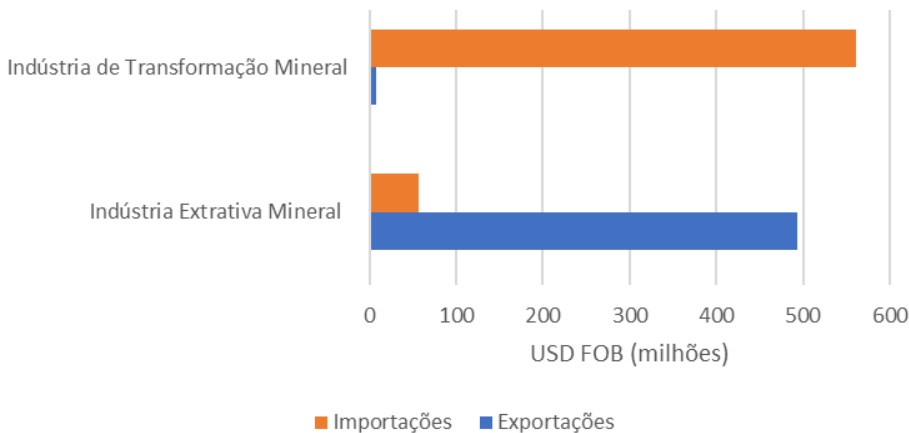


Fonte: CETEM, 2025.

52. A produção dos EUA e dos outros países não foi declarada (Fonte: USGS, 2025).

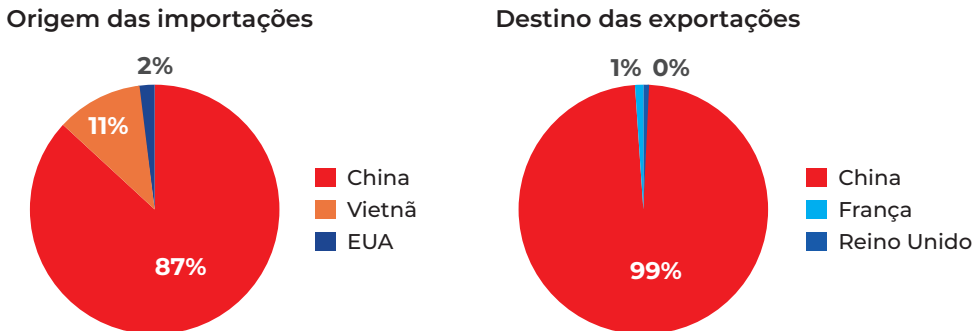
Em 2023, o Brasil produziu cerca de 263,9 mil toneladas de concentrado de espodumênio — o principal mineral usado na produção de lítio — com um teor médio de 5,7% de Li_2O , o que equivale a aproximadamente 15,2 mil toneladas de óxido de lítio. Apesar desse crescimento, a balança comercial do lítio permaneceu negativa em US\$ 60,3 milhões, refletindo a dependência de produtos processados importados. As figuras a seguir mostram a estrutura do comércio exterior brasileiro e a distribuição geográfica dos principais parceiros comerciais.

Figura 39. Importações e exportações de produtos de lítio em 2023



Fonte: Sumário mineral brasileiro, 2024.

Figura 40. Origem das importações e destinos das exportações brasileiras de lítio: participação por país (%)



Fonte: Sumário mineral brasileiro, 2024.

Em síntese, a combinação de demanda em alta, base geológica relevante e balança comercial ainda deficitária aponta para a necessidade de acréscimo de valor doméstico nas rotas associadas ao lítio — da qualificação de concentrados à produção de compostos grau bateria e ao fortalecimento da reciclagem.

Oportunidades em lítio

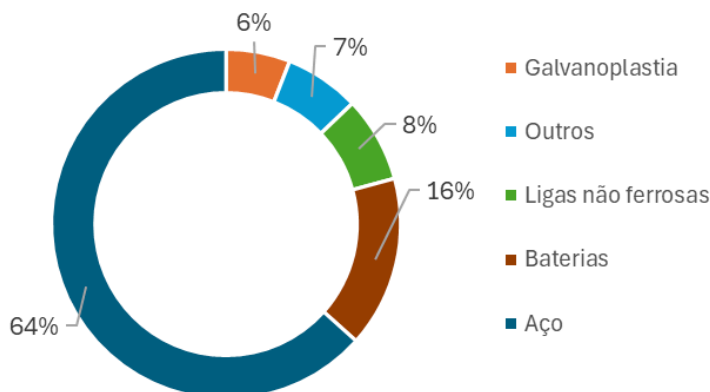
Três frentes integradas podem orientar projetos e parcerias:

- **Potencial para integração produtiva e agregação de valor:** a oportunidade é consolidar o Brasil como produtor competitivo de lítio “verde”, transformando o avanço dos depósitos LCT (espodumênio) em conversão química grau bateria no país (carbonato/hidróxido). O Vale do Lítio em Minas Gerais já reúne projetos em operação e em rampa — CBL, Sigma Lithium, Atlas Lithium, Lithium Ionic e o projeto Colina (Pilbara Minerals) — formando um eixo onde faz sentido concentrar plantas de conversão e firmar contratos de longo prazo com fabricantes de cátodos e células, elevando conteúdo local e previsibilidade (SGB-CPRM, 2025). O estímulo à verticalização, no entanto, depende de uma demanda que viabilize economicamente determinadas etapas de maior valor agregado, como beneficiamento, refino e transformação industrial.
- **Inovação tecnológica, circularidade e qualificação:** ganham tração as rotas hidrometalúrgicas para conversão e recuperação de lítio de baterias ao fim de vida e de escórias pirometalúrgicas, além da metrologia para atender especificações grau bateria. O SGB-CPRM tem identificado alvos e reduzido risco geológico nas províncias Jequitinhonha e Borborema, com trabalhos em Leste de MG e Solonópole (CE), base útil para pilotos e demonstração de rotas de menor impacto (SGB-CPRM, 2025; Kresse et al., 2025; Brückner et al., 2020).
- **Cooperação territorial e expansão de fronteiras:** embora MG lidere, há potencial no Nordeste (CE, RN, PB) e em áreas greenfield no Sul do Tocantins–Norte de Goiás e em Itambé (BA). Arranjos regionais que conectem mineração, conversão e logística, combinados a padrões de rastreabilidade e transparência, e parcerias com players globais podem acelerar a maturação do *midstream* e dar previsibilidade à expansão (SGB-CPRM, 2025).

6.4. Níquel

O níquel é um metal de transição essencial para a indústria moderna e para a transição energética, graças à sua resistência à corrosão, tenacidade e ductilidade, que permitem sua aplicação em ligas metálicas de alto desempenho. Atualmente, cerca de 64% do uso global está ligado à produção de aços inoxidáveis (ver figura 41), mas o metal também é empregado em setores como a indústria química, naval e alimentícia, na galvanoplastia e em ligas utilizadas em turbinas aeronáuticas, usinas termoeletricas e equipamentos de petróleo e gás. Além disso, o níquel é estratégico para tecnologias emergentes, sendo um dos principais componentes dos cátodos de baterias recarregáveis de alta densidade energética, como NMC (níquel-manganês-cobalto) e NCA (níquel-cobalto-alumínio), que garantem maior autonomia a veículos elétricos e sistemas de armazenamento estacionário.

Figura 41. Principais aplicações do níquel



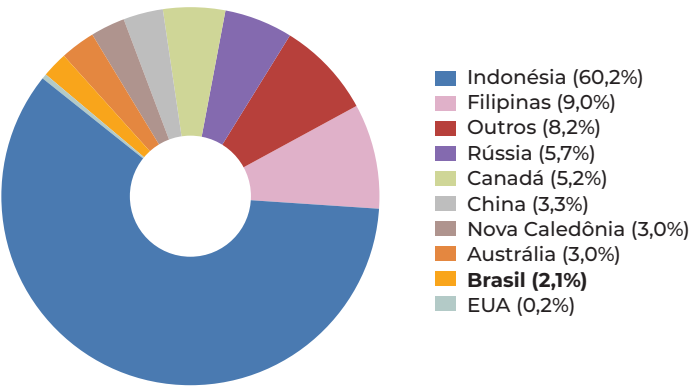
Fonte: CETEM, 2025.

Em escala global, os recursos de níquel ultrapassam 350 milhões de toneladas, com cerca de 54% concentrados em depósitos lateríticos, 35% em sulfetados, 10% em nódulos marinhos e 1% em outras fontes (USGS, 2025). Essa composição influencia diretamente as rotas de processamento, os custos de produção e a distribuição geográfica da oferta. A produção mundial é altamente concentrada na Indonésia, responsável por mais de 60% do total, com o Brasil respondendo por cerca de 3% (Figura 42).

A concentração produtiva contrasta com uma distribuição de recursos mais dispersa: a Indonésia continua liderando com 41,7% dos recursos conhecidos, mas países como Austrália (18,3%), Brasil (6,3%) e Rússia (5,4%) também figu-

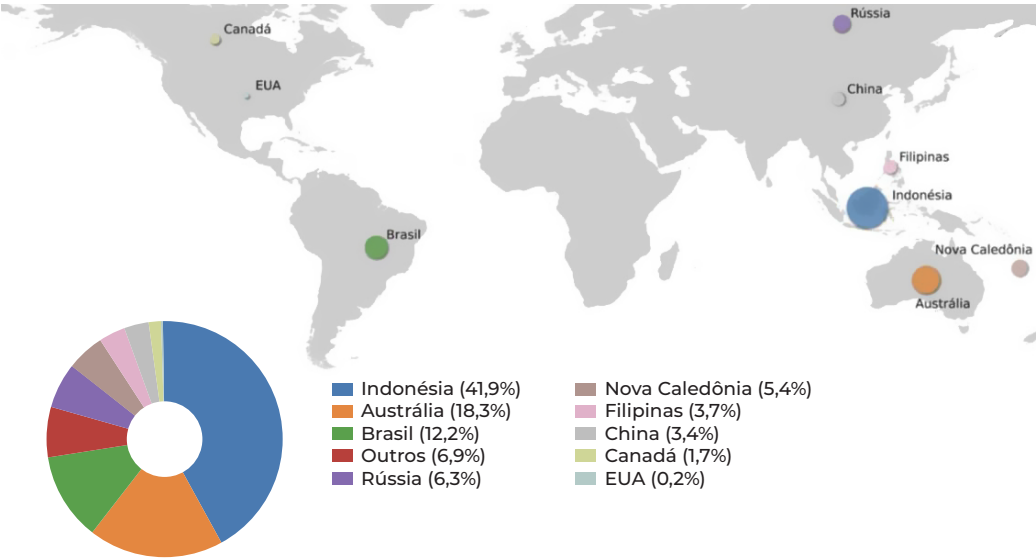
ram entre os detentores de reservas significativas (Figura 33). Essa geografia evidencia não apenas a dominância atual da Indonésia na produção, mas também o potencial de países emergentes — como o Brasil — de expandirem sua participação na cadeia global à medida que novos projetos entrem em operação e tecnologias de processamento avancem.

Figura 42. Distribuição da produção global de níquel entre os principais países produtores



Fonte: CETEM, 2025.

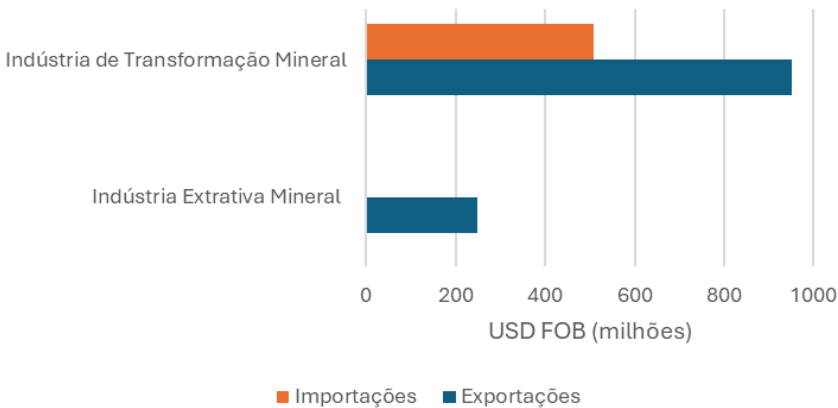
Figura 43. Distribuição dos recursos globais de níquel



Fonte: CETEM, 2025.

No Brasil, a produção de 2023 — considerada em metal contido — alcançou 72.398 t de Ni, e a balança comercial dos produtos de níquel foi superavitária, somando US\$ 668,9 milhões. As exportações concentraram-se em produtos beneficiados, enquanto as importações ficaram restritas a itens da indústria de transformação, o que indica uma base industrial com capacidade de agregar valor em parte da cadeia, embora ainda dependente de componentes específicos do segmento manufatureiro.

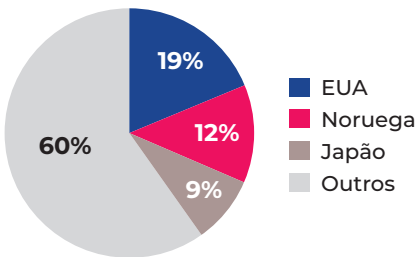
Figura 44. Importações e exportações de produtos de níquel em 2023



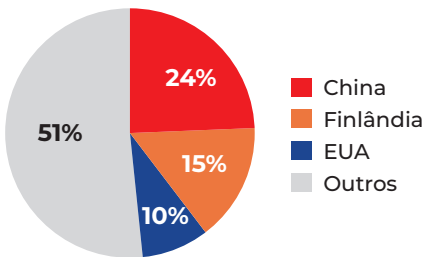
Fonte: Sumário mineral brasileiro, 2024.

Figura 45. Origem das importações e destinos das exportações brasileiras de níquel: participação por país (%)

Origem das importações



Destino das exportações



Fonte: Sumário mineral brasileiro, 2024.

A reciclabilidade é um dos principais diferenciais do níquel: o metal pode ser recuperado repetidas vezes sem perda de qualidade, e cerca de 68% do utilizado em aços inoxidáveis e outros produtos metálicos é reaproveitado. A reciclagem de baterias de íons de lítio também se consolida como fonte relevante de níquel secundário, fortalecendo a economia circular e reduzindo a pressão sobre novas lavras.

O posicionamento brasileiro combina capacidade produtiva, saldo comercial positivo e uma base de usos que vai do inox às tecnologias da transição energética. Avançar nas etapas intermediárias da cadeia — especialmente voltadas ao segmento de baterias — e estruturar arranjos produtivos com energia competitiva, logística eficiente e previsibilidade regulatória pode ampliar a captura de valor doméstico e consolidar a reciclagem como pilar do abastecimento.

Oportunidades em níquel

Três frentes integradas podem orientar projetos e parcerias:

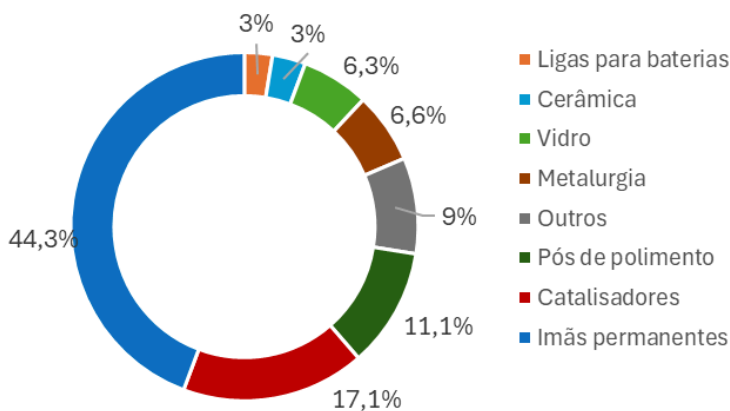
- **Potencial para integração produtiva e agregação de valor:** consolidar o avanço dos diferentes tipos de depósitos de níquel — lateríticos e sulfetados — e ampliar as etapas de transformação no país, passando da produção de ligas básicas (como ferroníquel) para formas mais puras e de maior valor, como o níquel classe I e o sulfato de níquel usado em baterias. A base operacional atual — com minas como Onça-Puma, CODEMIN, Barro Alto e Santa Rita, sendo três delas com custos abaixo da média global — oferece escala e condições favoráveis para fortalecer a produção nacional e garantir um suprimento mais estável ao mercado interno e às cadeias globais de cátodos e baterias (SGB-CPRM, 2025).
- **Inovação tecnológica, circularidade e qualificação:** ampliar rotas hidrometalúrgicas em lateritos (incluindo HPAL onde couber) e otimizar fluxogramas de sulfetos (caso Jaguar, com enriquecimento em millerita e concentrados de alta qualidade), integrando recuperação de cobalto como coproduto e reciclagem de baterias de íon-lítio para reforçar o suprimento secundário. Pilotos e demonstrações, com metrologia e controle de qualidade voltados a especificações de baterias, reduzem risco tecnológico e aceleram a adoção industrial (SGB-CPRM, 2025; USGS, 2023).
- **Cooperação territorial e energia competitiva:** alavancar o acesso a hidroeletricidade de baixo custo e baixa emissão para reduzir pegada de carbono e custo unitário, estruturando clusters próximos às operações e pro-

jetos — Araguaia (PA/TO), Piauí (PI), Jaguar (PA) e o novo Lagoa Grande (BA-PI, ~405 Mt estimados) — com logística integrada e previsibilidade regulatória. Essa configuração favorece a produção de classe I de menor intensidade de carbono e o posicionamento do Brasil nas cadeias globais de baterias e inox (SGB-CPRM, 2025).

6.5. Terras raras (ETR)

Dentre os 17 elementos terras raras (ETR), quatro se destacam pelo papel estratégico na transição energética: neodímio (Nd), praseodímio (Pr), disprósio (Dy) e térbio (Tb). Essenciais na produção de ímãs permanentes de alta performance, eles são fundamentais para o funcionamento de motores de veículos elétricos, geradores de turbinas eólicas e outras tecnologias de baixo carbono (Natural Resources Canada, 2025). Em 2023, o uso de ETRs em ímãs representou 44,3% da demanda global, e os quatro elementos magnéticos destacados estão entre os mais valiosos do grupo - ver tabela 30.

Figura 46. Principais aplicações de ETR



Fonte: CETEM, 2025.

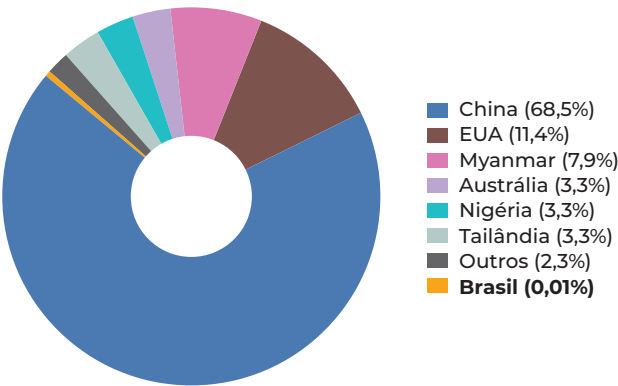
Tabela 30. Média do preço (US\$/Kg) dos diferentes ETR

ETR	Média preço fev2024-jan2025 (US\$/kg)
Ce	1,11
Dy	320,97
Er	42,62
Eu	24,58
La	1,84
Nd	68,12
Pr	71,02
Sm	10,86
Tb	988,99
Y	29,45

Fonte: CETEM, 2025.

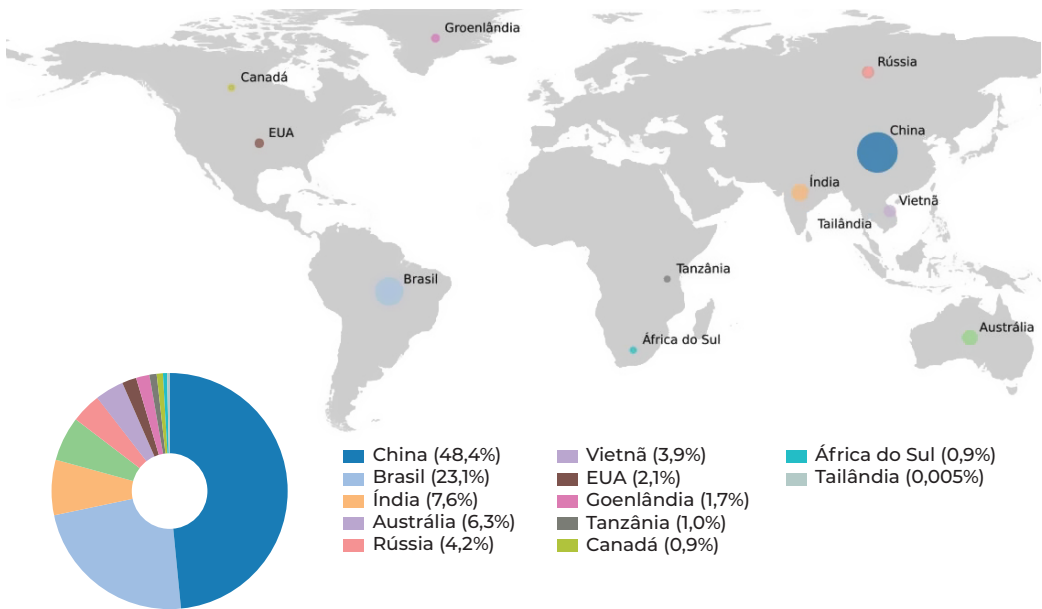
O mercado global de terras raras é altamente concentrado, com a China responsável por aproximadamente 70% da produção e praticamente toda a cadeia de processamento, o que reforça preocupações geopolíticas e pressiona países consumidores a diversificar fornecedores. Nesse contexto, o Brasil ocupa posição estratégica, sendo o segundo maior detentor de reservas, atrás apenas da China (CETEM, 2025). As Figuras 47 e 48 mostram a concentração da produção global e a distribuição dos recursos, evidenciando a necessidade de novos polos produtivos.

Figura 47. Distribuição da produção global de ETR entre os principais países produtores



Fonte: CETEM, 2025.

Figura 48. Distribuição dos recursos globais de ETR



Fonte: CETEM, 2025.

No cenário nacional, a produção ainda é incipiente. A Mineração Serra Verde, única operação de ETR atualmente no país, iniciou suas atividades em 2024 e está em fase de ramp-up para alcançar 5.000 toneladas anuais de óxidos. Dados mais detalhados de produção e balanço comercial a partir dessa operação ainda não estão disponíveis. Mesmo assim, a presença de reservas relevantes e a entrada de produção primária posicionam o Brasil para ampliar sua participação nas cadeias globais de valor, especialmente se avançar em processamento e refino — etapas hoje concentradas fora do país.

A reciclabilidade dos ETR constitui uma oportunidade estratégica adicional. Elementos podem ser recuperados de resíduos eletrônicos, como placas de circuito impresso, ímãs permanentes de NdFeB, lâmpadas fluorescentes exauridas e baterias NiMH, por meio de processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e técnicas mais recentes de extração por solventes. A expansão da reciclagem poderia reduzir a dependência da mineração primária e mitigar a exposição a riscos geopolíticos e à volatilidade de preços.

Oportunidades em terras raras

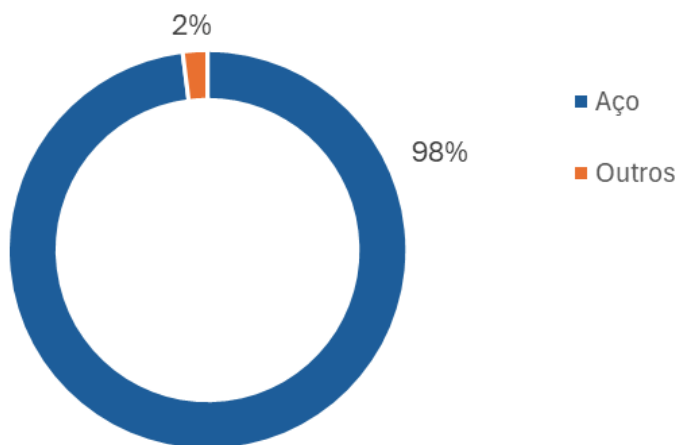
Três frentes integradas podem orientar projetos e parcerias:

- **Potencial para integração produtiva e agregação de valor:** A presença de reservas expressivas — cerca de 21 Mt, a segunda maior do mundo (USGS, 2025) — oferece ao Brasil uma base estratégica para avançar ao longo da cadeia de valor dos ETR, reduzindo sua dependência das etapas iniciais de extração. A operação da Mineração Serra Verde em Minaçu (GO), com produção prevista de 5.000 t/ano de óxidos de terras raras em sua Fase I, representa um marco inicial, mas precisa ser acompanhada pela expansão da capacidade de separação e refino individualizado de elementos, permitindo ao país produzir compostos de maior valor agregado usados em ímãs permanentes de alto desempenho. A verticalização também pode ser potencializada pela recuperação de ETR como coprodutos em operações existentes de nióbio em Araxá e de fosfato em Catalão, Poços de Caldas, Tapira e Pitinga, hoje em fase de estudos de viabilidade.
- **Inovação tecnológica, circularidade e novos materiais:** a consolidação de rotas de reciclagem a partir de resíduos industriais e eletrônicos — como ímãs de NdFeB, placas de circuito e lâmpadas fluorescentes — representa uma oportunidade para ampliar o suprimento secundário e reduzir a vulnerabilidade geopolítica. Processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e de extração por solventes vêm sendo desenvolvidos para esse fim e podem ser fortalecidos por meio de parcerias entre centros de pesquisa e empresas. Ao mesmo tempo, programas de P&D devem explorar alternativas tecnológicas que reduzam a pressão sobre a oferta primária, como o uso de ligas de ferro-nitreto e a tetraenita, capazes de substituir parcialmente os ETR magnéticos em determinadas aplicações. O redesenho de dispositivos e sistemas para diminuir o uso desses elementos sem perda de eficiência técnica também desponta como campo de inovação relevante.
- **Cooperação territorial e posicionamento estratégico:** a distribuição dos depósitos brasileiros — que incluem Araxá, Catalão, Tapira, Poços de Caldas, Seis Lagos e Repartimento — oferece oportunidades para estruturar clusters territoriais integrados à infraestrutura logística e energética competitiva. A articulação com políticas públicas e o apoio financeiro a projetos estratégicos podem acelerar a verticalização da cadeia e fortalecer a posição do Brasil como fornecedor confiável. Em paralelo, a cooperação com outros países produtores da América do Sul e com centros tecnológicos globais permitirá ao Brasil alinhar-se a padrões internacionais de rastreabilidade, sustentabilidade e certificação ambiental, requisitos cada vez mais exigidos para acesso a mercados estratégicos.

6.6. Ferro

O minério de ferro é uma das matérias-primas mais abundantes e economicamente relevantes do planeta, sendo a principal fonte de extração do ferro (Fe), elemento indispensável para a indústria moderna. Suas propriedades — alta resistência mecânica, ductilidade, maleabilidade e condutividade térmica — tornam-no essencial na formação de ligas metálicas, sobretudo com o carbono, resultando no aço. Este material responde por cerca de 98% de todo o uso global do ferro (ver figura 49), desempenhando papel estruturante em setores como construção civil, transporte, bens de capital, embalagens metálicas e produtos duráveis. O ferro também é empregado diretamente na fabricação de componentes industriais, como motores, válvulas e engrenagens. Sua importância estratégica se estende à infraestrutura produtiva e logística, conferindo vantagem competitiva a países com grandes reservas e capacidade de produção, como o Brasil.

Figura 49. Principais aplicações de minério de ferro



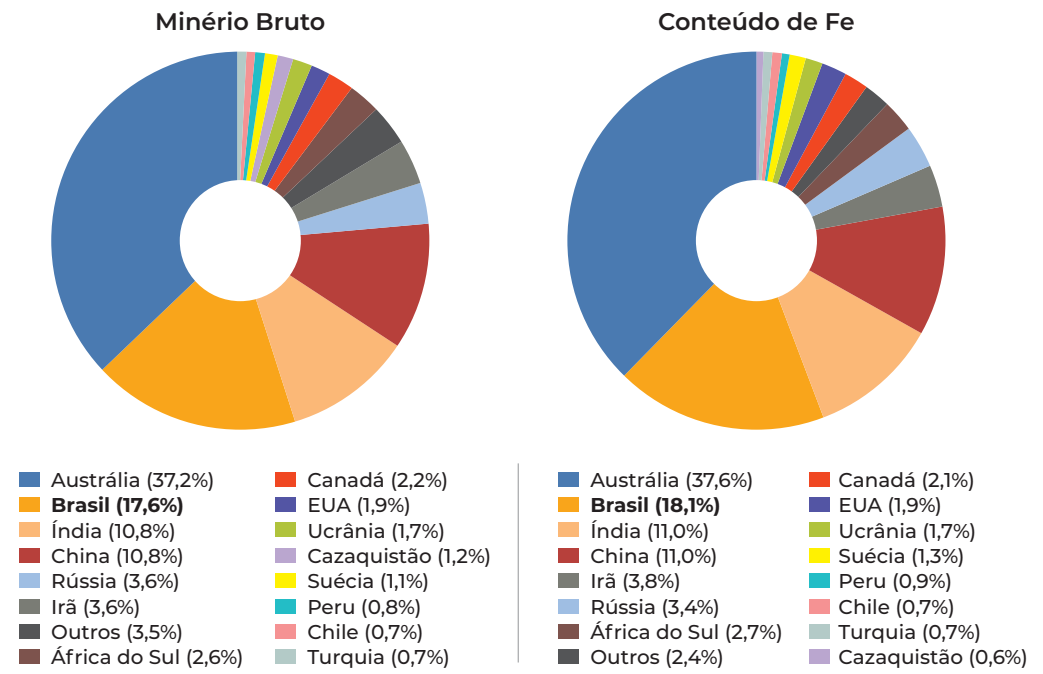
Fonte: CETEM, 2025.

Além de seu peso econômico, o minério de ferro tem papel estratégico na transição energética. Países como Austrália, África do Sul e China já classificam minérios de alta pureza como minerais críticos, dada sua importância para tecnologias de baixo carbono. Ferro e aço são essenciais na fabricação de turbinas eólicas, painéis solares, sistemas ferroviários eletrificados, usinas hidrelétricas e estações de recarga para veículos elétricos. Ao mesmo tempo, a siderurgia responde por cerca de 8% das emissões globais de CO₂, o que torna sua descar-

bonificação crucial para as metas climáticas. Nesse contexto, o uso de minério de alta qualidade é decisivo para métodos mais limpos de produção, como a redução direta (DRI) e os fornos elétricos a arco (EAF), que reduzem significativamente as emissões em comparação aos processos tradicionais.

O mercado global de minério de ferro é concentrado, com a Austrália respondendo por cerca de 37% da produção mundial, seguida pelo Brasil com 17,6%, China com 10,8% e Índia com 10,8% — ver figura 50 (USGS, 2025). A China domina o consumo, absorvendo mais de 70% das importações globais, seguida por Japão (6%) e Coreia do Sul (4,5%) (TradeMap). Embora setores como construção civil, automotivo e manufatureiro tenham registrado desaceleração no último ano, a demanda global foi sustentada por investimentos em infraestrutura pública e projetos voltados à mitigação climática — tendência que deve persistir mesmo com a desaceleração imobiliária e industrial chinesa.

Figura 50. Distribuição da produção global de minério de ferro entre os principais países produtores

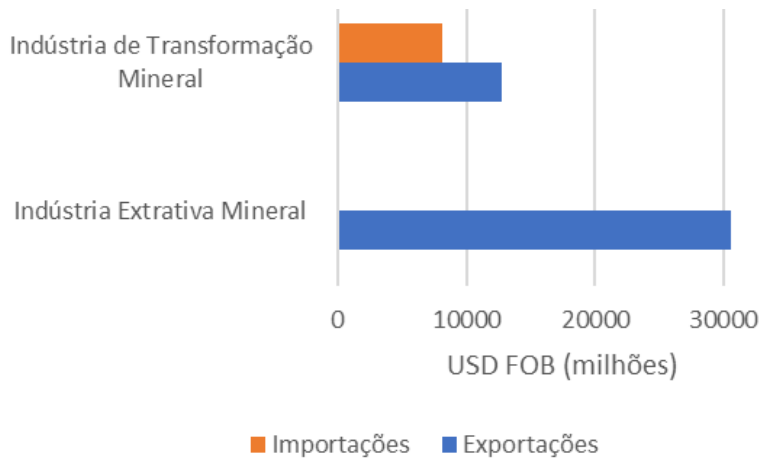


Fonte: CETEM, 2025.

No Brasil, a produção de minério de ferro beneficiado atingiu 436,8 milhões de toneladas em 2023, com teor médio de 62,7% de ferro. A balança comercial

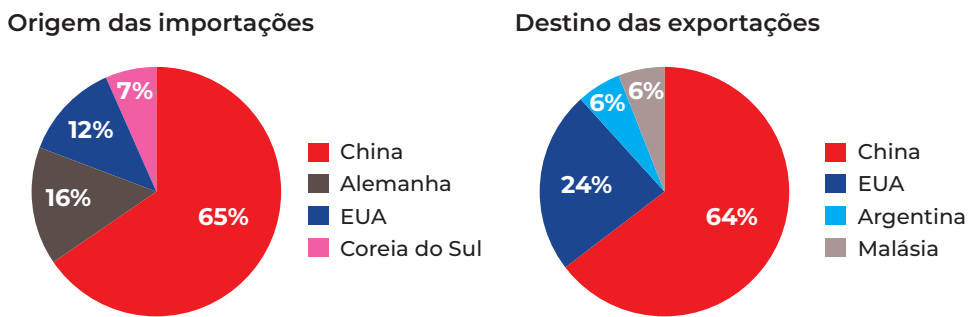
registrou superavit expressivo, com saldo de US\$ 35,1 bilhões no mesmo ano. As figuras a seguir mostram a estrutura do comércio exterior brasileiro e a distribuição geográfica dos principais países parceiros comerciais.

Figura 51. Importações e exportações de minério de ferro em 2023



Fonte: Sumário mineral brasileiro, 2024.

Figura 52. Origem das importações e destinos das exportações brasileiras de minério de ferro: participação por país (%)



Fonte: Sumário mineral brasileiro, 2024.

A reciclabilidade do aço é outro componente estratégico da cadeia, já que o material pode ser reprocessado indefinidamente sem perda de qualidade, reduzindo significativamente o consumo de energia e matérias-primas. A pro-

dução em fornos elétricos a arco, que utilizam exclusivamente sucata metálica, consome muito menos energia do que os métodos tradicionais baseados em minério. Desde 1960, a energia necessária para produzir uma tonelada de aço caiu cerca de 40%, o que demonstra o potencial da reciclagem e da modernização tecnológica na redução da pegada de carbono da siderurgia.

Oportunidades em minério de ferro

Três frentes integradas podem orientar projetos e parcerias:

- **Potencial para integração produtiva e agregação de valor:** a expressiva dotação geológica do Brasil — com cerca de 34 bilhões de toneladas de minério bruto, a terceira maior do mundo, e aproximadamente 15 bilhões de toneladas de ferro contido, o segundo maior volume global — oferece uma base sólida para avançar ao longo da cadeia de valor e reduzir a dependência da exportação de minério bruto. A estrutura produtiva existente, liderada pela Vale S.A., conta com operações de grande escala em Carajás (Serra Norte e S11D) e no Quadrilátero Ferrífero, integradas a sistemas logísticos próprios de transporte e escoamento. Consolidar essa base produtiva e expandir as etapas de transformação, no entanto, depende de uma demanda que viabilize economicamente as etapas de maior valor agregado —da produção de ferro-gusa ao aço de maior valor agregado.
- **Inovação tecnológica, circularidade e descarbonização da siderurgia:** reduzir a pegada de carbono do setor siderúrgico, responsável por cerca de 8% das emissões globais de CO₂, é condição essencial para alinhar a produção de ferro e aço às metas climáticas. A utilização de minério de alta qualidade permite a adoção de rotas produtivas mais limpas, como a redução direta (DRI) e os fornos elétricos a arco (EAF), que emitem significativamente menos que os altos-fornos convencionais. O fortalecimento de redes de P&D aplicadas à metalurgia verde, à otimização do beneficiamento de itabiritos e à recuperação de subprodutos pode acelerar a transição tecnológica. A reciclagem do aço, totalmente reaproveitável sem perda de qualidade, também desponta como vetor estratégico: desde 1960, a energia necessária para produzir uma tonelada caiu cerca de 40%, demonstrando o potencial de rotas circulares na redução de emissões e no aumento da eficiência.
- **Cooperação territorial e infraestrutura competitiva:** a grande escala de produção e o baixo valor por tonelada exigem infraestrutura logística robusta, especialmente em ferrovias e portos, para garantir o escoamento eficiente e reduzir custos operacionais. A formação de clusters industriais

próximos às principais áreas mineradoras — em Minas Gerais, Pará, Bahia e Mato Grosso do Sul — pode gerar sinergias produtivas, impulsionar a industrialização e acelerar a adoção de tecnologias de baixo carbono. Além disso, a articulação com políticas públicas e parcerias internacionais fortalecerá a posição brasileira nas cadeias globais de aço e infraestrutura verde, assegurando acesso a mercados com padrões mais exigentes de sustentabilidade, rastreabilidade e certificação ambiental.



7.

Recomendações de Políticas Públicas

A consolidação do papel do Brasil nas cadeias de minerais críticos e estratégicos (MCE) exige um conjunto coordenado de medidas regulatórias, tecnológicas, financeiras e diplomáticas. O diagnóstico deste relatório evidencia obstáculos estruturais — como a morosidade e a fragmentação do licenciamento, a sobreposição de competências, as lacunas em mapeamento geológico e a insuficiência de instrumentos estáveis de incentivo à agregação de valor, além da baixa integração entre pesquisa, indústria e inovação —, ao mesmo tempo em que aponta amplas oportunidades de adensamento produtivo e de inserção em cadeias globais ligadas à transição energética. As recomendações a seguir se baseiam nos resultados e numa revisão de literatura e priorizam ações de alto impacto e viabilidade nos curto e médio prazos, voltadas a acelerar a pesquisa, a exploração responsável, o processamento e a inovação, com padrões de sustentabilidade e rastreabilidade compatíveis com mercados exigentes.

-
- I. **Evoluir o marco regulatório do setor mineral**, promovendo maior coordenação entre órgãos e agilidade nos processos decisórios. Acelerar a formulação de marcos legais e regulatórios com ampla participação social e segurança jurídica é essencial para consolidar um ambiente moderno, transparente e eficiente. Nesse sentido, a criação de uma legislação específica e integrada para o setor, articulada ao fortalecimento do Conselho Nacional de Política Mineral (CNPM) como instância de definição de prioridades, representa um passo decisivo. Essa modernização deve estar alinhada a políticas nacionais já existentes,

como o PTE, a Nova Indústria Brasil (NIB), o PLANTE e o PlanGeo, assegurando coerência institucional e continuidade entre as agendas mineral, energética e industrial. Por fim, é fundamental coordenar iniciativas entre as três esferas de governo na agenda de mudanças climáticas, compatibilizando políticas setoriais e harmonizando os diferentes marcos regulatórios.

II. Fortalecer mecanismos para atração de financiamento e investimentos, incluindo o desenvolvimento de novos instrumentos financeiros, como títulos verdes, sociais, sustentáveis e outros tipos vinculados à sustentabilidade (ver FINEP–BNDES, iniciativas do Plano de Transformação Ecológica e fundos de investimentos do BNDES⁵³). Dada a sua relevância estratégica, é necessário reforçar uma abordagem integrada que reconheça o papel crítico da mineração na cadeia de suprimento de tecnologias limpas e na construção de uma economia de baixo carbono e, portanto, apta a acessar mecanismos de financiamento climático. Dessa forma, garantindo o acesso do setor a linhas de crédito com condições mais atrativas para projetos de mineração sustentável.

III. Investir em novos modelos de negócios, fomentando a participação de atores regionais. Fomentar inovação, PD&I e modelos que integrem ciência-tecnologia-indústria (plantas-piloto, demonstração e consórcios empresa-universidade-institutos), visando reduzir a dependência de importados em etapas de purificação/refino e elevar a verticalização das cadeias — como exemplo, grafita para ânodos, cobre refinado e reciclagem. Ademais, priorizar polos com base mineral existente e vocação industrial, além de programas de capacitação técnica e institucional voltados à formação com foco em sustentabilidade.

IV. Desenvolver infraestrutura industrial e impulsionar a integração da infraestrutura regional, com investimentos robustos em interconectores estratégicos, como redes elétricas (*grids*), gasodutos, ferrovias, rodovias e portos, além de incentivar a criação de mercados fronteiriços. A modernização do setor mineral também depende de tecnologias que contribuam para redução de emissões, uso eficiente dos recursos, reaproveitamento de resíduos e eletrificação de frotas. Tais avanços exigem financiamento de longo prazo, o que muitas vezes é

53. ver estudo Financiamento Climático e Mineração (IBRAM, 2025b).

inacessível pelas vias tradicionais. Por isso, é essencial a ampliação de mecanismos de apoio à inovação e à capacitação, com foco especial nas pequenas e médias empresas.

-
- V. Construir agenda regional de energia e minerais** com mecanismos de coordenação política capazes de desenvolver respostas comuns a crises e ampliar a cooperação regional. Esses esforços podem fortalecer a estabilidade econômica e política, além de facilitar um planejamento integrado para infraestrutura e regulação. Além disso, firmar alianças com países e blocos econômicos, priorizando acordos de cooperação tecnológica, pode contribuir para impulsionar a inserção do Brasil e da América Latina nas cadeias de valor globais.
-
- VI. Aprimorar e modernizar o mapeamento geológico nacional**, priorizando a redução das assimetrias regionais — sobretudo na Amazônia — e a ampliação das escalas detalhadas (1:100.000 e 1:50.000), é essencial para fortalecer o conhecimento geocientífico básico e orientar investimentos, financiamentos e políticas públicas voltadas ao setor mineral. A consolidação do PlanGeo 2025-2034 como política de Estado pode garantir continuidade orçamentária, integração institucional e incorporação de tecnologias geoespaciais e de sensoriamento remoto, ampliando a precisão dos dados e a atratividade do país para novos empreendimentos em mineração sustentável, planejamento ambiental e ordenamento territorial.
-
- VII. Criar instrumentos de identificação para cadeias estratégicas no país:** Identificar “*roadmaps*” estratégicos e agendas de priorização tecnológica para minerais críticos e estratégicos (MCE), em alinhamento com a Missão 3 da Nova Indústria Brasil, que propõe “incentivar a agregação de valor sobre recursos minerais no país”. Esses instrumentos devem facilitar a identificação das cadeias com maior potencial competitivo e tecnológico, promovendo a articulação entre políticas de PD&I, industrial e de financiamento, além de assegurar a coordenação entre ministérios, governos estaduais e o setor privado.
-
- VIII. Incentivar práticas sustentáveis nas atividades de mineração, aderindo a altos padrões ambientais, sociais e de governança (ESG)** capazes de minimizar os impactos negativos; otimizar as potencialidades e garantir o bem-estar econômico e social da população. Isso porque

os impactos socioambientais da atividade mineradora manifestam-se ao longo de todo o seu ciclo, desde a prospecção até o pós-fechamento, para as comunidades locais. Por outro lado, a distribuição dos benefícios econômicos gerados pela mineração nem sempre é equitativa entre as partes interessadas. Superar essa dicotomia é fundamental para promover uma transição energética justa enquanto busca-se conferir um caráter mais sustentável à atividade mineradora.

IX. Estimular a economia circular na mineração: Promover programas nacionais de reciclagem de minerais críticos, fomentando projetos-piloto em mineração urbana e recuperação de áreas degradadas. Tais iniciativas reduzem a pressão sobre novas fronteiras de exploração, estimulam cadeias de valor locais e reforçam a sustentabilidade socioambiental.

X. Promover alinhamento estratégico entre o potencial geológico nacional e as necessidades industriais emergentes. Alinhar oferta mineral e demanda industrial, construindo mecanismos de planejamento que conectem o potencial geológico nacional às necessidades das cadeias industriais emergentes (baterias, hidrogênio, eletrificação). Antecipar gargalos de suprimento e articular planos setoriais de curto e médio prazo é essencial para garantir coerência entre exploração mineral, política industrial e transição energética — convertendo recursos naturais em capacidades produtivas e tecnológicas.

Referências Bibliográficas

ANDRADE, M. L. A., CUNHA, L. M. da S., GANDRA, G. T., et al. “Níquel - Novos Parâmetros de Desenvolvimento”, Área de Operações Industriais, p. 1–33, 2000. .

ANDREWS-SPEED, P., MEIDAN, M. “Responding to the China challenge: Diversification and de-risking in new energy supply chains”, ... Energy Forum: A Quarterly Journal for ..., n. Query date: 2025-08-09 19:05:05, 2024. Disponível em: <https://www.econstor.eu/handle/10419/322266>.

ANGLO AMERICAN MINÉRIO DE FERRO BRASIL S.A. Ore Reserves and Mineral Resources Report 2024. . [S.l: s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro-2024.pdf>.

ANM. Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. Agência Nacional de Mineração. [S.l: s.n.], 2023.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. “Cobre: ano-base 2018.”, p. 4–6, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/cobre-2019-ano-base-2018.pdf>.

ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Sumário Mineral Brasileiro 2024. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2024>.

ARCELORMITTAL. Integrated Annual Review 2023-2024 ArcelorMittal. Integrated Annual Review 2024. [S.l: s.n.], 2024. Disponível em: <https://corporate.arcelormittal.com/media/3rhdod3o/mt-31-12-2024-annual-report.pdf%0Ahttps://corporate.arcelormittal.com/media/3fwar2wu/2024-sustainability-report.pdf>.

BENTO, J. P. P., PORTO, C. G., TAKEHARA, L., et al. “Mineral potential re-evaluation of the Seis Lagos Carbonatite Complex. Amazon. Brazil”, Brazilian Journal of Geology, v. 52, n. 1, 2022. DOI: 10.1590/2317-4889202120210031. .

BHP. Bringing people and resources together to build a better world. 2024. Disponível em: <https://www.sec.gov/ix?doc=/Archives/edgar/data/811809/000119312524210297/d812514d20f.htm>.

BLOOMBERG NEF. Brazil Transition Factbook 2025: The Numbers Behind the Ambition. 2025. Disponível em: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/brazil-transition-factbook-2025-the-numbers-behind-the-ambition/>.

CADENCE MINERALS. Amapa Pre-feasibility Report Executive Summary. . [S.l: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.cadenceminerals.com/wp-content/uploads/2023/10/PFS-Executive-Summary-KDNCs.pdf>.

CASTRO, F. F. de, PEITER, C. C., GÓES, G. S. MINERAIS ESTRATÉGICOS E CRÍTICOS: UMA VISÃO INTERNACIONAL E DA POLÍTICA MINERAL BRASILEIRA. Manual de Integridade Pública da OCDE. [S.l: s.n.], 2022.

CBMM. Relatório de Sustentabilidade da CBMM – COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO. . [S.l: s.n.], , 2022

CMOC GROUP LIMITED. “2024 Annual results announcement. Hong Kong: Hong Kong Exchanges and Clearing Limited”, 2025. .

CNM. Brasil pode ser protagonista no mercado de minerais estratégicos e terras raras. 2025. Disponível em: <https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/brasil-pode-ser-protagonista-no-mercado-de-minerais-estrategicos-e-terras-raras>.

COMISSÃO BRASILEIRA DE RECURSOS E RESERVA. “Guia CBRR para declaração de informações de exploração, recursos minerais e reservas minerais”, 2022. Disponível em: https://www.cbrr.org.br/docs/guia_declaracao.pdf.

DE ALMEIDA, C. M., OLIVO, G. R., DE CARVALHO, S. G. “THE Ni Cu PGE SULFIDE ORES OF THE KOMATIITE-HOSTED FORTALEZA DE MINAS DEPOSIT, BRAZIL: EVIDENCE OF HYDROTHERMAL REMOBILIZATION”, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/ca91370b-2a8d-45c1-8bd5-19719add257b>.

DEHAINE, Q., TIJSSELING, L. T., GLASS, H. J., et al. “Geometallurgy of cobalt ores: A review”, Minerals Engineering, v. 160, n. June 2020, 2021. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106656. .

EPE. Minerais críticos e estratégicos para a transição energética. . [S.l: s.n.], 2025. Disponível em: www.epe.gov.br/www.epe.gov.br.

ERM. Mission Critical: Building Resilient Mines for a Modern Society. . [S.l: s.n.], 2025.

ERIN MARSH, ERIC ANDERSON, and F. G., “Nickel-Cobalt Laterites-A Deposit Model”. Mineral Deposit Models for Resource Assessment, [S.l: s.n.], 2013. p. 1–38. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/h/pdf/SIR10-5070-H.pdf>.

ETC - ENERGY TRANSITIONS COMMISSION. Financing the Transition: How to make the money flow for a net-zero economy. Report, March. [S.l: s.n.], 2023. Disponível em: https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2023/03/ETC-Financing-the-Transition_MainReport-.pdf.

EUROPEAN PARLIAMENT. “EU Legislation in Progress - Critical Raw Materials Act (CRMA)”, European Parliamentary Research Service, n. September, p. 12, 2024. .

FGV. “Minerais Estratégicos no Brasil: Oportunidades de Produção e Inserção no Mercado Global”, 2025.

FMI. Digging for Opportunity: Harnessing Sub-Saharan Africa’s Wealth in Critical Minerals. 2024.

FRASER INSTITUTE. “Annual Survey of Mining Companies 2023. Vancouver: Fraser Institute”, 2024. Disponível em: <https://www.fraserinstitute.org/categories/mining>

GARCIA, A. A. “Brasil pode usar seu potencial de fornecimento de minerais críticos como moeda de barganha internacional”, 2025. Disponível em: <https://theconversation.com/brasil-pode-usar-seu-potencial-de-fornecimento-de-minerais-criticos-como-moeda-de-barganha-internacional-251236>.

GOVERNMENT OF CANADA. Copper facts. 2025. Disponível em: <https://natural-resources.canada.ca/minerals-mining/mining-data-statistics-analysis/minerals-metals-facts/copper-facts#L6>.

GREIM, P., SOLOMON, A. A., BREYER, C. “Assessment of lithium criticality in the global energy transition and addressing policy gaps in transportation”, *Nature Communications*, v. 11, n. 1, p. 1–11, 2020. DOI: 10.1038/s41467-020-18402-y. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-020-18402-y>.

GRI. “Oportunidades e desafios dos minerais críticos e estratégicos para o protagonismo brasileiro na transição energética”, 2025. .

GUEDES, R., TARGINO, B., “A geopolítica da energia no século XXI: poder, recursos e segurança na América Latina”. XXII FORTE PARA ALÉM DO NÃO RETORNO BEYOND THE TIPPING POINT, [S.l: s.n.], 2025. .

IBRAM. “Contribution of the Mining Industry To the G20 Building a Fair World and a Sustainable Planet”, 2024a. .

IBRAM. “Fundamentos para Políticas Públicas em Minerais Críticos e Estratégicos para o Brasil”, Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, p. 1–9, 2024b. .

IBRAM. “FUNDAMENTOS PARA POLÍTICAS PÚBLICAS EM MINERAIS CRÍTICOS E ESTRATÉGICOS PARA O BRASIL”, *Sustainability (Switzerland)*, v. 11, n. 1, p. 1–14, 2019.

IBRAM. “Minerais Críticos e estratégicos no Brasil: um passaporte para o Futuro”, 2025

IEA. *Global Critical Minerals Outlook 2025 Report*. [S.l: s.n.], 2025a. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024?utm_content=buffer3599f&utm_medium=social&utm_source=linkedin.com&utm_campaign=buffer.

IEA. “The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. International Energy Agency.”, *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*, 2021a. Disponível em: www.iea.org/.

IEA. “World Energy Investment 2025 10th Edition”, International Energy Agency, v. 10, p. 1–183, 2025b. .

IEA. “World Energy Outlook 2021”, IEA Publications, p. 1–386, 2021b. Disponível em: www.iea.org/weo.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Dashboard Metabase Cobre. . [S.l: s.n.]. Disponível em: <https://metabase-ibram.dadosfera.ai/public/dashboard/3f9f0344-66e2-44d3-b08f-e16f058c36aa>. , [S.d.]

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS (ICMM). Annual Report 2023. London: ICMM, 2024. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/publications/annual-reports/annual-report-2023>.

INTERNATIONAL TRADE CENTER. TradeMap. [S.d.]. Disponível em: <https://www.trademap.org/Index.aspx>.

IRENA. Securing critical minerals for the energy transition. [S.l: s.n.], 2021. v. 142.

KPMG. Global Mining Outlook 2024. [S. l.]: KPMG, 2024. Disponível em: <https://kpmg.com/xx/en/home/insights/2024/01/global-mining-outlook.html>.

LIANG, W., YANG, D., BIAN, H. “Mechanical properties of rubber sealing material in lined rock cavern for compressed air energy storage considering thermo-mechanical coupling effect”, Construction and Building Materials, v. 458, n. September 2024, p. 139494, 2025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139494. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139494>.

LÚCIA, M., ANDRADE, A. De, RICARDO, J., et al. A Cadeia Produtiva Do Cobre : Panorama Internacional E Nacional. [S.l: s.n.], [S.d.]. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/js-pui/bitstream/1408/13441/3/BS_06_A_cadeia_produtiva_do_cobre_P_BD.pdf.

LUNDIN MINING. Lundin Mining Announces 2024 Mineral Resource and Mineral Reserve Estimates. 2025. Disponível em: <https://lundinmining.com/news/lundin-mining-announces-2024-mineral-resource-and-123185/>.

MME. “Guide for Foreign Investors in Critical Minerals for the Energy Transition in Brazil”, p. 1–9, 2019.

MME. “Plano Nacional de Mineração 2030: Geologia, mineração e transformação mineral”, 2011.

MME. Resolução no 2, 18 de junho de 2021. 22/06. [S.l: s.n.], 2021.

MOERENHOUT, B. T., JAIN, G., VAZIR, C. “How Policy Can Reduce Barriers to Financing Critical Minerals : Roundtable Summary”, COLUMBIA GLOBAL ENERGY DIALOGUE, n. April, p. 1–20, 2025.

NATURAL RESOURCES CANADA. Copper facts. 2025. Disponível em: <https://natural-resources.canada.ca/minerals-mining/mining-data-statistics-analysis/minerals-metals-facts/copper-facts#L6>. Acesso em: 15 out. 2025.

NORTHEY, S., MOHR, S., MUDD, G. M., et al. “Modelling future copper ore grade decline based on a detailed assessment of copper resources and mining”, Resources, Conservation and Recycling, v. 83, p. 190–201, 2014. DOI: 10.1016/j.resconrec.2013.10.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.005>.

PIGNATARI, L. E. "UPDATED RESOURCES AND RESERVES ASSESSMENT AND PRE-FEASIBILITY STUDY:SANTA CRUZ GRAPHITE PROJECT BAHIA BRAZIL", 2020.

REDAÇÃO REVISTA AMAZÔNIA. Pouca Verticalização da Produção: Um Modelo que Exporta Riqueza e Deixa Mazelas. 2024. Disponível em: <https://revistaamazonia.com.br/verticalizacao-mineracao-desenvolvimento/>.

SAMARCO MINERAÇÃO S.A. Relatório da Administração da Samarco mineração S.A. . [S.l: s.n.], 2023.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Projeto Avaliação do Potencial de Terras Raras no Brasil: área Morro dos Seis Lagos, Noroeste do Amazonas. [S.l: s.n.], 2019. v. 4.

SGB. "An overview of Critical Minerals Potential of Brazil", p. 1-23, 2023. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/pdac/media/critical_minerals_potential.pdf.

SGB. "CADERNO I - CONHECIMENTO GEOLÓGICO - Estudos preparatórios para o Plano Nacional de Mineração 2050", 2021.

SGB. "Panorama do Potencial Do Brasil Para Minerais Críticos e Estratégicos", p. 1-36, 2024.

S&P GLOBAL. From 6 years to 18 years: The increasing trend of mine lead times. 2025. Disponível em: <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/research/from-6years-to-18years-the-increasing-trend-of-mine-lead-times>.

SILVA, G. F., CUNHA, I. A., COSTA, I. S. L. An overview of Critical and Strategic Minerals Potential of Brazil. [S.l: s.n.], 2025. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/pdac/media/critical_minerals_potential.pdf.

ST GEORGE MINING LTD. "High-grade niobium and REE JORC resource for Araxá", n. April, 2025.

SZLAFSZTEIN, C. F. "Desafios e demandas em geologia de engenharia e ambiental na Amazônia brasileira (Brasil)", Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA), v. 8, 2018. .

TARGINO, B., SOUZA, P. G. "Uma análise sobre a influência geopolítica da transição energética na cadeia de valor global de materiais críticos", Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe, v. 4, n. 1, p. 9-15, 2024. .

TRAVERSO, CARLOS CESAR PEITER; LUCIA HELENA XAVIER; MARZIA CASTRO, E. R. L. M. A. A. A., CASTRO, F. F. "Study of critical materials' production chains: opportunities and threats of the circular economy", v. 298, n. 0704, p. 2023, 2020.

UNITED STATES SECURITIES AND EXCHANGE COMMISSION. ANNUAL REPORT PURSUANT TO SECTION 13 OR 15(d) OF THE SECURITIES EXCHANGE ACT OF 1934. 2025. Disponível em: https://www.sec.gov/ix?doc=/Archives/edgar/data/917851/000129281425001137/valeform20f_2024.htm.

USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries 2025. Mineral Commodity Summaries 2021. [S.l.: s.n.], 2025. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025.pdf>.

VALE. Relatório de Produção e Vendas 2024. 2025. Disponível em: <https://vale.com/pt/w/relatorio-de-producao-e-vendas-2024>.

VALE S.A. Caraíba Operations. 2024. Disponível em: <https://erocopper.com/operations/caraiba-operations/>.

WOOD MACKENZIE. Iron ore energy transition outlook 2025. 2025. Disponível em: <https://www.woodmac.com/reports/metals-iron-ore-energy-transition-outlook-2025-150374609/>.

<https://www.thomsonreuters.com/en-us/posts/international-trade-and-supply-chain/global-trading-risk-china-belt-road-initiative/>.

Anexo A

Metodologia

Para avaliar a oferta potencial de MCE, o presente estudo utilizou como principal referência uma base de dados gerida pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB), que consolida informações referentes a depósitos e ocorrências minerais de diversas *commodities* em âmbito nacional. Os dados foram coletados por meio de múltiplas fontes, incluindo levantamentos de campo, relatórios internos, pesquisas em portais de empresas do setor mineral, além de documentos oficiais, como relatórios e publicações de órgãos reguladores e de fomento, tais como a Agência Nacional de Mineração (ANM), o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) e o Ministério de Minas e Energia (MME). Adicionalmente, foram incorporados dados extraídos da literatura acadêmica, abrangendo teses, dissertações e artigos científicos, bem como informações históricas e registros obtidos por meio de comunicação direta com especialistas da área.

A estimativa do potencial de oferta mineral teve como objetivo calcular a quantidade máxima de mineral que poderia ser obtida a partir de um dado minério, considerando sua composição química e o teor do elemento de interesse. Para tanto, foram utilizados fatores de conversão derivados de relações estequiométricas, baseadas nas massas molares dos compostos envolvidos. Os teores dos elementos (expressos em porcentagem do óxido ou do elemento presente no minério) foram convertidos em massa de mineral contido por meio de equações específicas, que relacionam o teor percentual à massa total disponível.

De forma a estimar o limite superior do potencial de oferta, adotou-se uma abordagem teórica de recuperação total, sem considerar perdas operacionais durante as etapas de lavra, beneficiamento ou transformação. Essa suposição visa representar o potencial máximo do recurso, independentemente de restrições tecnológicas, econômicas ou logísticas atualmente existentes.

É importante ressaltar que as estimativas de recurso e reserva mineral não constituem cálculos exatos, mas projeções baseadas em dados disponíveis e em parâmetros físico-químicos padronizados. Na prática, perdas ocorrem em

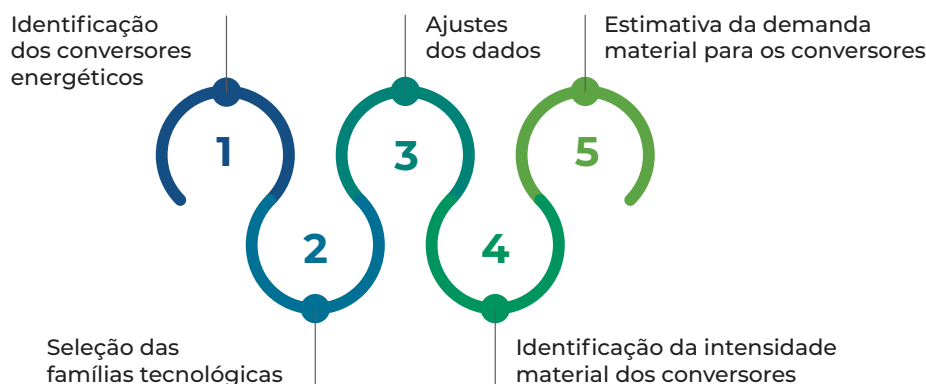
diferentes estágios do processo produtivo, variando conforme a qualidade do minério, a eficiência dos equipamentos e as práticas operacionais. Assim, o cálculo apresentado neste relatório deve ser interpretado como uma referência teórica, útil para fins comparativos e de planejamento estratégico de longo prazo, e não como uma medida definitiva de volume recuperável.

Para avaliar a demanda por minerais críticos e estratégicos, a primeira etapa deste estudo concentrou-se na identificação dos grupos de conversores energéticos relevantes para o período entre 2025 e 2050, baseando-se nos resultados da modelagem do BLUES — referente ao cenário Transição Brasil. Posteriormente, foi realizada a seleção das famílias tecnológicas mais promissoras para cada um dos conversores identificados. Para tanto, realizou-se uma revisão da literatura técnico-científica orientada por diversos critérios fundamentados nas perspectivas técnica, econômica e ambiental. A seleção dessas famílias é preponderante para a sequência da investigação, que tem como objetivo principal obter a demanda por materiais associados aos conversores chaves da transição energética.

Em seguida, é realizado o processo de estimativa da demanda de materiais. Para essa estimativa, são detalhados os principais equipamentos associados à transição energética, organizados em subcategorias: baterias para armazenamento estacionário, baterias veiculares, contemplando ônibus, caminhões elétricos à bateria, veículos leves e veículos comerciais leves, pilhas à combustível, motores elétricos, geradores de turbinas eólicas e painéis fotovoltaicos.

Assim, delimitam-se os componentes considerados para a análise, bem como sua motivação. A caracterização das tecnologias culminou na quantificação de seus materiais diretamente incorporados, isto é, os insumos presentes nos conversores energéticos após sua manufatura. Isso significa que eventuais perdas do processo de produção não estão contempladas na análise. Pode-se assumir que a demanda material calculada designa a demanda líquida utilizada em cada um dos conversores avaliados, contemplando ainda o recorte dos aspectos que foram incorporados na análise de cada um deles.

A Figura 53 ilustra uma representação esquemática das etapas deste trabalho, indicando o fluxo metodológico utilizado a partir do modelo BLUES para estimar a demanda material para os conversores identificados.

Figura 53. Etapas metodológicas

Fonte: Elaboração própria.

Diante disso, o Cenário Transição Brasil (TB), que foi utilizado como referência para o modelo BLUES estimar a demanda por materiais nos conversores energéticos, deriva dos resultados do Programa de Transição Energética (PTE). A Fase 2 do Programa articula três cenários, que funcionam como narrativas quantitativas para informar o planejamento estratégico da transição energética brasileira. Cada cenário incorpora diferentes níveis de ambição climática, restrições econômicas, tecnológicas e políticas, fornecendo uma base analítica para o debate nacional sobre caminhos possíveis à neutralidade climática ou a cenários de emissão. O Cenário Transição Brasil (TB) é o cenário central do estudo, por representar a rota de menor custo para o cumprimento integral da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil, tendo sido o cenário utilizado como insumo para subsidiar o desenvolvimento do presente estudo. O cenário TB, parte da premissa de que o Brasil buscará cumprir suas metas da NDC.

A trajetória considerada nesse cenário contempla uma redução de aproximadamente 50% das emissões líquidas de GEE até 2030 em comparação aos níveis de 2005, além da obtenção de emissões líquidas zero até 2050. O cenário também pressupõe o cumprimento dos compromissos de uso da terra, em especial o desmatamento ilegal zero até 2030, e a recuperação florestal de 12 milhões de hectares até o mesmo ano, em consonância com o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (PLANAVEG).

A construção dos cenários do PTE utiliza uma abordagem quantitativa baseada no modelo de análise integrada, usando o modelo BLUES (Brazilian Land-Use and Energy Systems), desenvolvido pelo Laboratório Cenergia da Coppe/

UFRJ. Este modelo permite explorar, de forma acoplada, as interações entre sistemas energéticos, uso da terra e emissões de gases de efeito estufa (GEE), constituindo uma ferramenta capaz de avaliar rotas de descarbonização que conciliem viabilidade técnica, custo-efetividade e metas climáticas. O BLUES também se integra ao modelo global COFFEE, que permite examinar a coerência dos cenários nacionais com restrições globais de emissões. O papel do BLUES no PTE é central, tanto na geração de trajetórias setoriais como na avaliação de seus desdobramentos em termos de investimentos, infraestrutura e políticas públicas.

Anexo B

Intensidade e materiais selecionados para análise

Além da expansão de capacidade, a estimativa inclui o estoque de substituição, isto é, os materiais necessários para repor equipamentos ao fim de sua vida útil, considerando taxas médias de durabilidade específicas por tecnologia. Com base nos conversores energéticos selecionados, a demanda total de um material i ao longo do período foi calculada pelo somatório das demandas adicionais associadas a cada rota tecnológica j e tecnologia específica k , conforme a Equação 1:

$$DM_i = \sum_t \sum_j \sum_k (CI_{jt} \cdot PT_{jk} \cdot IM_{ik})$$

Essa demanda é estimada com base na capacidade instalada adicional de cada rota tecnológica j (CI_{jt}), ponderada pela evolução temporal da penetração de cada família tecnológica ou tecnologia específica k (PT_{kt}) e pela respectiva intensidade material do elemento i (IM_{ik}).

Nos setores de mobilidade elétrica, os resultados do modelo BLUES foram originalmente fornecidos em passageiro-quilômetro (pkm) e tonelada-quilômetro (tkm). Para integrar esses dados ao cálculo de demanda material, foi necessário convertê-los em estoque veicular, considerando quilometragem média por veículo, ocupação típica e reposição ao longo do tempo.

Com a conversão, a equação foi adaptada para representar o estoque adicional de veículos e incorporar parâmetros técnicos específicos — como capacidade média de baterias, potência de motores elétricos e pilhas a combustível —, resultando na Equação 2:

$$DM_i = \sum_t \sum_j \sum_k (CI_{jt} \cdot F_k \cdot PT_{jkt} \cdot IM_{ik})$$

onde Fk representa os parâmetros técnicos adequados para a tecnologia específica k.

Para o cálculo das demandas materiais dos conversores, utilizou-se dados coletados com base na revisão da literatura. Os parâmetros apresentados nas Tabelas 31 e 32 refletem as hipóteses e recortes materiais adotados na análise.

Tabela 31. Intensidade material para baterias NMC e LFP (kg/kWh)

	Lítio	Níquel	Cobalto	Manganês	Cobre	Grafita	Chumbo
LLP	0,10	-	-	-	0,45	1	-
NMC - 622	0,12	0,52	0,17	0,18	0,31	0,90	-
NMC - 811	0,10	0,65	0,08	0,08	0,27	0,90	-
NNIC - 955	0,09	0,82	0,04	0,04	-	0,90	-
Média NMC (alto Níquel)	0,10	0,66	0,10	0,10	0,29	0,90	-
Na-íon	-	0,50	-	0,60	-	-	-
Chumbo-ácido	-	-	-	-	-	-	18,40

Fonte: Elaboração própria com base em Barlock et al. (2024); Li, Bieker, Sen (2024); IEA (2024); IRENA (2024); Maisel et al. (2024); Walter et al. (2024); Hossain et al. (2020); Nadeem et al. (2019); Spanos, Turney e Fthenakis (2015).

Tabela 32. Intensidade material de Pilhas à Combustível de Membrana Protônica

Materiais (kg/kW)		
Platina	Carbon black	PFSA total
6,01E-04	7,19E-04	1,76E-02

Fonte: Elaboração própria com base em Simons e Bauer (2015); Notter et al. (2015); Evangelisti et al. (2017); Miotti, Hofer e Bauer (2017); Usai et al. (2021); Riemer, Duval-Dachary, Bachmann (2023); Mori et al. (2023); Krishnan et al. (2024); Spreafico e Thonemann (2025); Paladin et al. (2025); Stropnik et al. (2019).

Tabela 33. Intensidade material de ímãs Permanentes (NdFeb)

Material	Intensidade material (kg/kg)
Alumínio	0,53%
Boro	0,89%
Cobalto	2,04%
Cobre	0,17%
Disprósio	3,33%
Gadolínio	0,19%
Gálio	0,38%
Ferro	63,12%
Manganês	0,23%
Neodímio	22,79%
Níquel	2,03%
Praseodímio	2,76%
Silício	0,76%

Com base nesses dados, os resultados de demanda dos materiais selecionados no recorte de análise deste trabalho se limitam aos elementos reportados no quadro abaixo.

Materiais Estratégicos			
Neodímio	Cobre	Telúrio	Cobalto
Praseodímio	Lítio	Selênio	Níquel
Prata	Grafita	Gálio	Disprósio
Sílica	Chumbo	Índio	Boro
Cádmio	Manganês	Platina	-



CEBRI

**Centro Brasileiro de
Relações Internacionais**

Rua Marquês de São Vicente, 389
Gávea - Rio de Janeiro - RJ - Brasil
22451-044

Tel: +55 (21) 2206-4400

cebri@cebri.org.br

www.cebri.org

REALIZAÇÃO:

CEBRI

IBRAM
MINERAÇÃO DO BRASIL

cenergia

COPPE
UFRJ

SGB
SERVIÇO GEOLÓGICO
DO BRASIL

CETEM
CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO

GOVERNO DO
BRASIL
DO LADO DO POVO BRASILEIRO

PARCERIA:

epe
Empresa de Pesquisa Energética

iCS10
INSTITUTO
CLIMA-SOCIEDADE
ANOS

BHP

VALE

BMA
ADVOGADOS

PATROCÍNIO:

APOIO:

ISBN: 978-85-89534-13-0

CD



9 788589 534130