



TERRAS RARAS NO BRASIL

Estado da arte, cenários e um mapa
do caminho estratégico para 2026–2040

Terras Raras no Brasil

Estado da arte, cenários e um mapa do caminho estratégico para 2026–2040



cg ee

Brasília, DF
2026

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

Organização social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)
Instituição interveniente: Ministério da Educação (MEC)

Diretor-presidente

Anderson Stevens Leonidas Gomes

Diretor de projetos estratégicos e relações internacionais

Caetano Christophe Rosado Penna

Diretora de projetos estratégicos e relações institucionais

Concepta McManus

Diretor de administração e finanças

Geraldo Nunes Sobrinho

Catálogo na fonte:

C389t

TERRAS RARAS NO BRASIL - Estado da arte, cenários e um mapa do caminho estratégico para 2026–2040. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2026.

392 p.: il.

ISBN - 978-65-5775-109-1

1. Cenário global. 2. Economia. 3. Mineração. 4. Imãs. 5. Catalisadores. 6. Ligas metálicas. 7. Fósforos. I. CGEE. II. Título.

CDU 553.493

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
SCS Qd 9, Bl. C, 4º andar, Ed. Parque Cidade Corporate
70308-200, Brasília, DF
Telefone: (61) 3424.9600



Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos nesta publicação poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que seja citada a fonte.

Referência bibliográfica:

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **Terras raras no Brasil**: Estado da arte, cenários e um mapa do caminho estratégico para 2026–2040. Brasília, DF: CGEE, 2026. 392 p.

Este estudo é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do 3º Contrato de Gestão CGEE – 18º Termo Aditivo. Linha de Ação: Apoio Técnico à Formulação e Avaliação de Políticas Estratégicas de CT&I –Centro de custos: 1.10.01.05.09.01.

Terras Raras no Brasil

Estado da arte, cenários e um mapa do caminho estratégico para 2026–2040

Supervisão

Anderson Stevens Leonidas Gomes

Líder do projeto

César Augusto Costa

Assessora Técnica

Kilma Gonçalves Cezar

Consultores

Fatima Ludovico (PUC - Rio)

Fernando Landgraf (USP)

Fernando Lins (CETEM)

Jéssica Raspini (UFSC)

Juliano Baron Engeroff (UFSC)

Marcelo Dourado (CETEM)

Mariele Bonfante (UFSC)

Paulo Wendhausen (UFSC)

Wagner Macedo (UFSC)

Ysrael Vera (CETEM)

Apoio administrativo

Larissa Rocha

Revisão

Jarbas Caiado Neto (IFSC/USP)

Edição/Diagramação

TDS Company

Sobre os autores

Maria Fátima Ludovico da Gama e Souza

PUC-Rio



Doutora em Engenharia de Produção pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), mestre pela University of Manchester (Reino Unido) e DEA pela Université d'Aix-Marseille III (França). Graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), atuou na Secretaria de Tecnologia Industrial e na Fundação de Tecnologia Industrial antes de ingressar na Petrobras, onde trabalhou como consultora técnica entre 1987 e 2006. Desde 2007, é professora adjunta do Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Sua trajetória acadêmica e profissional concentra-se nas áreas de gestão da inovação, prospecção estratégica e sustentabilidade, reunindo ampla experiência em ambientes empresariais, governamentais e acadêmicos.

Fernando A. Freitas Lins

CETEM/MCTI



Engenheiro metalurgista pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), mestre e doutor em Engenharia de Materiais e Metalurgia pela COPPE/UFRJ. É pesquisador titular do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCTI), instituição que dirigiu nos períodos de 1998 a 2002 e de 2012 a 2020. Iniciou sua carreira na CPRM e posteriormente atuou como chefe da Divisão de Processo e Qualidade da Samarco Mineração. Foi Diretor de Tecnologia e Transformação Mineral da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM/MME) entre 2006 e 2012, período em que coordenou executivamente a elaboração do Plano Nacional de Mineração 2030. Também integrou conselhos técnico-científicos do CBPF e do Observatório Nacional, além do Conselho de Administração do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). Atualmente é membro do Conselho Consultivo da Revista Brasil Mineral.

Ysrael Marrero Vera

CETEM/MCTI



Pesquisador titular do Centro de Tecnologia Mineral do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (CETEM/MCTI) desde 2013. É doutor e mestre em Ciências dos Materiais e Engenharia Metalúrgica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), engenheiro químico pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e bacharel em Química pela Universidade de Havana. Sua trajetória acadêmica e profissional concentra-se nas áreas de hidrometalurgia, processamento químico, separação e purificação de elementos terras raras. Atua no desenvolvimento de rotas hidrometalúrgicas para terras raras, com ênfase em extração por solventes, precipitação seletiva e troca iônica. É inventor de processo patenteado para separação contínua de terras raras leves, envolvendo a separação de lantânio e didímio, e autor de publicações científicas, capítulos de livros e trabalhos apresentados em eventos nacionais e internacionais. Participa atualmente de iniciativas estratégicas como o INCT-MATERIA, REGINA e MagBras.

Marcelo De Luccas Dourado

CETEM/MCTI



Engenheiro químico pela Universidade Federal Fluminense (UFF), mestre em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e doutorando em Engenharia de Materiais e Metalúrgica pela COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Atua como pesquisador no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), unidade de pesquisa vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), no Serviço de Metalurgia Extrativa da Coordenação de Processos Metalúrgicos e Ambientais (SEMEX/COPMA). Sua trajetória acadêmica e profissional concentra-se na área de hidrometalurgia, com ênfase em processos de lixiviação, purificação e separação de elementos de terras raras. Possui experiência em modelagem e simulação de processos de adsorção, biotecnologia e desenvolvimento de hidrogéis para aplicações em biodiesel.

Fernando J. G. Landgraf

USP



Engenheiro metalúrgico e doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), tendo realizado parte de sua formação no Pulvermetallurgisches Laboratorium do Max Planck Institute, em Stuttgart, Alemanha. Sua pesquisa de doutorado investigou a relação entre a microestrutura de ímãs de neodímio-ferro-boro e suas propriedades magnéticas. Atuou no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) entre 1976 e 2005 e presidiu a instituição de 2012 a 2018. Desde 2006 é docente do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da USP. Coordenou o INCT PATRIA – Processamento e Aplicações de Ímãs de Terras Raras para Indústria de Alta Tecnologia entre 2018 e 2025 e tem atuado de forma destacada na divulgação dos desafios e oportunidades relacionados às terras raras no Brasil.

Paulo Antônio Pereira Wendhausen

UFSC



Professor titular do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PGMAT/UFSC) e coordenador do Laboratório de Materiais Magnéticos (MAGMA/UFSC). Engenheiro mecânico pela UFSC, obteve o título de doutor em Engenharia pela Universidade Técnica de Dresden, Alemanha, em 1995. Ao longo de mais de três décadas de atuação acadêmica e científica, dedica-se ao desenvolvimento e à caracterização de materiais magnéticos avançados, com destaque para ímãs permanentes à base de terras raras. Coordena o projeto internacional REGINA e integra o comitê diretor do congresso REPM. Também participou da criação e coordenação de iniciativas estratégicas como o INCT-PATRIA, o INCT MATERIA e o MAGBRAS.

Juliano Assis Baron Engeroff

UFSC



Pesquisador do Laboratório de Materiais Magnéticos (MAGMA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Engenheiro de materiais, mestre e doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFSC, atua no desenvolvimento de materiais magnéticos avançados, com ênfase em ímãs permanentes de terras raras, sustentabilidade e materiais críticos para a transição energética e a indústria de alta tecnologia. Sua trajetória combina experiência acadêmica, industrial e em gestão de projetos, com participação em iniciativas estratégicas voltadas ao fortalecimento da cadeia brasileira de terras raras. Há mais de uma década integra projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação como REGINA II, MAGBRAS e INCT MATERIA.

Mariele Canal Bonfante

UFSC



Pesquisadora do Laboratório de Materiais Magnéticos (MAGMA) e do Laboratório de Gestão e Avaliação Ambiental (LGAA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Engenheira mecânica pela Universidade de Passo Fundo (UPF) e doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela UFSC, desenvolve pesquisas nas áreas de sustentabilidade, economia circular e avaliação ambiental aplicadas à cadeia produtiva de terras raras e materiais críticos. Ao longo de sua trajetória, participou de iniciativas estratégicas para o desenvolvimento da cadeia brasileira de terras raras, incluindo o INCT-PATRIA, REGINA, REGINA II e INCT MATERIA. Sua tese de doutorado esteve entre os primeiros trabalhos desenvolvidos no Brasil a incorporar conceitos de sustentabilidade e ESG à produção de ímãs permanentes de terras raras.

Jéssica Prats Raspini

UFSC



Pesquisadora do Laboratório de Gestão e Avaliação Ambiental (LGAA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e colaboradora do Laboratório de Materiais Magnéticos (MAGMA/UFSC) em iniciativas relacionadas à cadeia de terras raras. Engenheira sanitária e ambiental pela UFSC, mestre em Engenharia de Produção pela mesma instituição, atualmente desenvolve seu doutorado em parceria entre a UFSC e a University of Strathclyde, no Reino Unido. Sua atuação concentra-se em sustentabilidade, economia circular e segurança de suprimento de materiais críticos para a transição energética. Desde 2019, participa de projetos voltados ao desenvolvimento da cadeia brasileira de terras raras e ímãs permanentes.

Wagner Costa Macêdo Junior

UFSC



Pesquisador do Laboratório de Materiais Magnéticos (MAGMA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Licenciado em Física, possui mestrado e doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) e realizou estágio de pós-doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da UFSC. Sua trajetória acadêmica concentra-se na área de Ciência e Engenharia de Materiais, com experiência em materiais cerâmicos nanoestruturados e materiais magnéticos avançados à base de terras raras. Participou de iniciativas estratégicas como INCT-PATRIA, REGINA, MAGBRAS e INCT MATERIA, voltadas ao fortalecimento da cadeia brasileira de terras raras.

Sumário

Apresentação.....	13
Guia de leitura deste documento estratégico.....	15
Onde encontrar os principais temas do estudo.....	15
Introdução	17
BLOCO I — FUNDAMENTOS	21
Capítulo 1 Atores e prioridades nacionais no cenário global de terras raras	23
1.1 Metodologia adotada.....	24
1.2 O rearranjo geopolítico das terras raras: da concentração ao pluralismo emergente	26
1.3 Potências produtoras: estratégias nacionais e prioridades declaradas	33
1.4 Potências consumidoras: a construção de cadeias alternativas de suprimento	40
1.5 Empresas e organismos multilaterais: os atores que moldam a arquitetura da cadeia	44
1.6 Brasil: da segunda maior reserva ao protagonismo estratégico emergente.....	48
Capítulo 2 Cenário global de terras raras e implicações para o Brasil: 2026–2040	63
2.1 Demanda mundial de terras raras: estado atual e projeções até 2040	63
2.2 Aplicações além dos ímãs	63
2.3 Tipologia mineralógica e implicações para o suprimento	64
2.4 Concentração da cadeia e mecanismos de reorganização	64
2.5 Cenários prospectivos para 2026–2040	65
2.6 Posição brasileira: oportunidades concretas	66
2.7 O que vem depois	67
Capítulo 3 Mapa do Caminho Estratégico da cadeia integrada de terras raras no Brasil: 2026–2040.....	69
3.1 Metodologia adotada.....	69
3.2 Cenário de referência e premissas estratégicas	71
3.3 Visão de futuro 2040	72
3.4 Dimensões de análise e objetivos estratégicos	74
3.5 Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de TR no Brasil: 2026–2040	78
3.6 Governança e Coordenação da Estratégia Nacional de Terras Raras	85
3.7 Agenda Nacional para 2026–2030	86
3.8 Condicionantes críticos e riscos de execução	88
3.9 A escolha que o Mapa do Caminho Estratégico articula	95
BLOCO II — DIRECIONADORES	97

Capítulo 4 Direcionadores estratégicos para uma economia circular e sustentável de terras raras	99
4.1 Paradoxo das terras raras e impactos socioambientais	99
4.2 Terras raras, sustentabilidade e Objetivos do Desenvolvimento Sustentável	102
4.3 Vantagens comparativas do Brasil	104
4.4 Estratégias de circularidade	105
4.5 Aspectos radiológicos e gestão de rejeitos TENORM/NORM	113
Capítulo 5 Cadeia produtiva de ímãs de terras raras no Brasil	115
5.1 Importância estratégica da aplicação para o País.....	116
5.2 Principais usos industriais: ciclo de vida de produtos com ímãs de terras raras.....	119
5.3 Cadeia produtiva de ímãs de terras raras	128
5.4 Competência atual associada à cadeia produtiva de ímãs de terras raras.....	138
5.5 Visão de futuro e objetivos estratégicos: horizonte 2040	140
Capítulo 6 Cadeia produtiva de catalisadores à base de terras raras no Brasil	145
6.1 Metodologia adotada.....	145
6.2 Importância estratégica da aplicação para o País.....	146
6.3 Principais usos industriais: Ciclo de vida dos catalisadores à base de TR.....	150
6.4 Cadeia produtiva de catalisadores à base de TR e análise de patentes	156
6.5 Competência atual associada à cadeia produtiva de catalisadores à base de TR	164
6.6 Visão de futuro da cadeia produtiva de catalisadores à base de TR no Brasil – horizonte 2040	174
6.7 Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Catalisadores à base de Terras Raras: 2026-2040.....	177
6.8 Considerações	187
Capítulo 7 Cadeia produtiva de ligas metálicas portadoras de terras raras no Brasil.....	189
7.1 Importância estratégica da aplicação para o País.....	189
7.2 Cadeia produtiva de ligas metálicas portadoras de terras raras	192
7.3 Competência atual associada à cadeia produtiva de ligas metálicas	197
7.4 Visão de futuro e objetivos estratégicos: horizonte 2040	199
Capítulo 8 Cadeia produtiva de fósforos de terras raras no Brasil	205
8.1 Metodologia adotada.....	205
8.2 Importância estratégica da aplicação para o País.....	206
8.3 Principais usos industriais: Ciclo de vida dos fósforos à base de TR.....	209
8.4 Cadeia produtiva de fósforos à base de TR e análise de patentes	213
8.5 Competência atual associada à cadeia produtiva de fósforos de TR no Brasil.....	223
8.6 Visão de futuro da cadeia produtiva de fósforos à base de TR no Brasil – horizonte 2040	232
8.7 Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Fósforos de Terras Raras: 2026-2040	236
8.8 Considerações	248

Capítulo 9 Cadeia produtiva de materiais para aplicações ópticas avançadas no Brasil 251

9.1 Metodologia adotada.....	251
9.2 Importância estratégica da aplicação para o País.....	252
9.3 Principais aplicações ópticas avançadas à base de TR.....	254
9.4 Cadeia produtiva e levantamento de patentes: 2012–2025	260
9.5 Competência atual associada à cadeia produtiva: grupos de pesquisa e capacidade científico-tecnológica brasileira	276
9.6 Visão de futuro e objetivos estratégicos: horizonte 2040	279
9.7 Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Materiais para Aplicações Ópticas Avançadas à base de TR no Brasil: 2026–2040	281
9.8 Considerações	290

BLOCO III — ESTRATÉGIA..... 293**Capítulo 10 Mineração: reservas e produção de terras raras 295**

10.1 Tipos de depósitos e os principais minerais de terras raras	295
10.2 Reservas de terras raras no mundo e no Brasil	297
10.3 Produção de terras raras no mundo e no Brasil	299
10.4 Cadeia de produção de terras raras: upstream, midstream e downstream	302
10.5 Os principais polos de produção de terras raras	306

Capítulo 11 Refino: separação dos óxidos por extração por solvente 311

11.1 Situação Atual	312
11.2 Visão geral do capítulo	312
11.3 Contexto internacional da SX de elementos terras-raras.....	313
11.4 Fundamentos técnicos da separação por extração por solventes	319
11.5 Evolução das patentes dos processos de separação de ETRs por extração por solvente: 1987-2025	323
11.6 O papel do refino na cadeia produtiva de ETR	326
11.7 Produtos-alvo, especificações e integração com as cadeias de aplicação	327
11.8 Configurações de planta de extração por solventes.....	328
11.9 Gargalos tecnológicos, econômicos, regulatórios e ambientais.....	334
11.10 Mapa do Caminho Estratégico 2026 – 2040	336
11.11 Considerações	337

Capítulo 12 Eixos estratégicos, prazos e instrumentos..... 339

12.1 Os oito eixos estratégicos	339
12.2 Sequência por horizonte	340
12.3 Instrumentos de política pública	341
12.4 Fatores críticos de sucesso.....	341

Capítulo 13 Acontecimentos recentes e impactos sobre a estratégia 343

13.1 Aquisição da Mineração Serra Verde (20 de abril de 2026)	343
13.2 Veto às propostas de criação da TerraBras (24 de abril de 2026)	344
13.3 Entrada em vigor do Acordo Mercosul–União Europeia (1º de maio de 2026)	345
13.4 Aprovação do PL 2780/2024 na Câmara dos Deputados (6 de maio de 2026)	345
13.6 Síntese: a janela operacional dos próximos 24 meses	346
Capítulo 14 Síntese estratégica: do diagnóstico à teoria da mudança	347
14.1 Do diagnóstico mineral ao desenho de estratégia nacional.....	347
14.2 Aspirações e capacidades: a definição operacional.....	348
14.3 Tempo, espaço, escala: o contexto não é estático	348
14.4 Conhecidos, probabilísticos e desconhecidos: os níveis de ignorância	349
14.5 Ecossistemas e colisões: terras raras como rede.....	349
14.6 De t1 a t2: a teoria da mudança ausente.....	350
14.7 Dez princípios para a estratégia brasileira de terras raras	350
14.8 A pergunta que organiza a próxima década	352
ANEXO A — PAINEL TRANSVERSAL	353
Anexo A.1 Mapa de competências por elo da cadeia	353
Anexo A.2 Matriz comparativa das cadeias versus refino	355
Anexo A.3 Consolidação das contribuições por capítulo	357
Anexo A.4 Quadro consolidado de projetos nacionais	359
Anexo A.5 Correspondência entre prioridades nacionais, eixos estratégicos e princípios operacionais	361
Posfácio	365
Bibliografia consolidada	367

Apresentação

Em 2012, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) publicou o estudo *Uso e Aplicações de Terras Raras no Brasil: 2012–2030*, por solicitação da Secretaria de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (SETEC) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), que foi uma das primeiras iniciativas nacionais de caráter abrangente voltadas para a compreensão do papel estratégico desses elementos para o desenvolvimento científico, tecnológico e industrial do país. Elaborado em um momento em que as terras raras começavam a emergir como tema de crescente relevância internacional, aquele trabalho reuniu informações sobre reservas, aplicações industriais, competências científicas e perspectivas de mercado, contribuindo para inserir o tema na agenda nacional de ciência, tecnologia e inovação.

Passada mais de uma década, o contexto global transformou-se profundamente. As terras raras deixaram de ser percebidas apenas como insumos especializados para determinados segmentos industriais e passaram a ocupar posição central nas discussões sobre transição energética, transformação digital, segurança econômica, resiliência das cadeias de suprimento, defesa, mobilidade elétrica e tecnologias avançadas. Ao mesmo tempo, intensificaram-se os esforços de diversos países para reduzir vulnerabilidades associadas à elevada concentração geográfica do processamento e da manufatura de produtos de maior valor agregado, inaugurando uma nova fase de competição industrial e tecnológica em torno dos minerais críticos.

É nesse contexto que se insere o presente trabalho, resultado de uma nova demanda do MCTI ao CGEE. Mais do que uma atualização do estudo anterior, publicado em 2012, este documento busca oferecer uma visão integrada da cadeia de valor das terras raras e construir um mapa de caminho estratégico (*roadmap*) para o Brasil no horizonte 2026–2040. O foco desloca-se da simples caracterização dos recursos minerais e das aplicações tecnológicas para a compreensão dos desafios, oportunidades e decisões necessárias para que o país possa ampliar sua participação em segmentos de maior intensidade tecnológica e maior valor agregado.

A elaboração deste documento mobilizou especialistas de diferentes áreas do conhecimento e da indústria, reunindo competências em mineração, processamento mineral, separação e refino, metalurgia, ligas metálicas, ímãs permanentes, materiais avançados, sustentabilidade, economia circular, política industrial, inovação e geopolítica dos minerais críticos. Essa diversidade de perspectivas permitiu construir uma visão sistêmica da cadeia produtiva, integrando aspectos geológicos, tecnológicos, econômicos, regulatórios, ambientais e institucionais.

Este documento consolida, em um único volume, os capítulos técnicos elaborados pelos especialistas que participaram do processo de produção sobre terras raras (TR). Inclui também uma visão estratégica do tema, elaborada com a participação de estrategistas com visão de futuro.

O documento organiza-se em três blocos e um anexo técnico. O Bloco I — Fundamentos apresenta o panorama dos atores globais, o cenário internacional do setor de terras raras no horizonte 2026–2040 e o mapa do caminho estratégico que articula as decisões institucionais necessárias ao Brasil. O Bloco II — Direcionadores consolida os direcionadores estratégicos para as cinco cadeias setoriais priorizadas pelo

estudo — ímãs permanentes, catalisadores, ligas metálicas, fósforos e materiais para aplicações ópticas avançadas — precedidos do capítulo transversal sobre sustentabilidade e economia circular. O Bloco III — Estratégia trata dos dois elos estruturantes da cadeia (mineração e refino), organiza eixos, prazos e instrumentos de política pública, analisa acontecimentos recentes relevantes para o setor e encerra-se com uma síntese conceitual que articula o conjunto à luz da teoria da mudança. O Anexo A — Painel Transversal reúne instrumentos analíticos complementares, incluindo mapa de competências, matrizes comparativas, consolidação temática dos capítulos e panorama dos principais projetos nacionais.

Cada capítulo foi concebido para ser autônomo, permitindo tanto a leitura sequencial da obra quanto a consulta direta aos temas de interesse do leitor. As tabelas-síntese de visão de futuro, os quadros de ações estratégicas e mapa do caminho consolidado oferecem percursos de leitura rápida para formuladores de políticas públicas, gestores governamentais, lideranças empresariais, pesquisadores e demais interessados no desenvolvimento da cadeia de terras raras no Brasil.

Mais do que registrar o estado atual do conhecimento sobre o tema, este documento busca contribuir para a construção de uma visão de longo prazo. Seu objetivo é fornecer subsídios técnicos, estratégicos e institucionais que apoiem a tomada de decisão em um contexto internacional marcado pela crescente relevância dos minerais críticos e pela busca de novas trajetórias de desenvolvimento industrial e tecnológico. Nesse sentido, representa não apenas uma atualização do estudo de 2012–2030, mas um esforço coletivo de reflexão sobre os caminhos possíveis para que o Brasil transforme seu potencial geológico em capacidades produtivas, tecnológicas e inovadoras compatíveis com os desafios e oportunidades das próximas décadas.

Anderson Gomes

Diretor-Presidente, CGEE

Junho 2026.

***Nota:** Após a finalização deste documento em junho de 2026, o CEBRI (Centro Brasileiro de Relações Internacionais) apresentou o Relatório Final do documento de Apoio à preparação da Estratégia Nacional de Terras Raras, por encomenda do Ministério de Minas e Energia.*

Guia de leitura deste documento estratégico

Este documento foi concebido para apoiar a formulação de políticas públicas, estratégias industriais e decisões de investimento relacionadas à cadeia brasileira de terras raras.

Embora o documento apresente análises técnicas detalhadas sobre geologia, mineração, processamento, mercados e aplicações industriais, sua principal contribuição é estratégica: demonstrar como o Brasil pode transformar sua vantagem geológica em capacidade industrial, tecnológica e geopolítica ao longo das próximas décadas.

Para facilitar sua utilização por gestores públicos e tomadores de decisão, esta seção apresenta os principais temas do estudo, as questões estratégicas associadas e os capítulos onde cada assunto é tratado em maior profundidade.

Onde encontrar os principais temas do estudo

Se você deseja entender...	Mensagem principal	Onde consultar
Por que terras raras se tornaram estratégicas para o século XXI	As terras raras são insumos críticos para transição energética, defesa, inteligência artificial e indústria avançada	Capítulos 1 e 2
Por que o Brasil possui uma oportunidade única neste momento	A reorganização das cadeias globais cria uma janela de oportunidade para novos fornecedores estratégicos	Capítulos 2 e 11
Qual é o problema estratégico brasileiro	O país possui recursos minerais abundantes, mas ainda captura pouco valor da cadeia	Capítulo 1
Qual posição o Brasil deve ocupar na cadeia global	O foco deve estar em refino, metais, ligas e ímãs, e não apenas na mineração	Capítulo 3
Qual visão orienta a estratégia nacional	Transformar vantagem geológica em capacidade industrial, tecnológica e geopolítica	Capítulo 4
Quais áreas precisam ser desenvolvidas simultaneamente	Oito eixos estruturam a construção da cadeia nacional	Capítulo 5
O potencial geológico brasileiro e os principais depósitos	O Brasil possui recursos capazes de sustentar uma cadeia produtiva de longo prazo	Capítulo 6

Se você deseja entender...	Mensagem principal	Onde consultar
O papel das argilas de adsorção iônica	Elas podem posicionar o Brasil entre os poucos fornecedores relevantes de terras raras pesadas	Capítulo 6
Como construir uma cadeia sustentável e competitiva	Sustentabilidade, rastreabilidade e economia circular serão fatores centrais de competitividade	Capítulo 7
Por que os ímãs permanentes são tão importantes	Os ímãs concentram grande parte do valor agregado da cadeia e sustentam setores estratégicos	Capítulo 8
Onde está a demanda futura por terras raras	Veículos elétricos, energia eólica, defesa, IA, robótica e infraestrutura digital impulsionarão o mercado	Capítulo 9
Como agregar valor antes de chegar aos ímãs	A produção de metais e ligas representa uma etapa estratégica de industrialização	Capítulo 10
Como a China construiu sua liderança	O domínio está nos elos industriais da cadeia e não apenas na mineração	Capítulos 2 e 11

Introdução

Os chamados elementos de terras raras (ETR) são um grupo de 17 elementos químicos essenciais (veja Figura 1) por suas propriedades magnéticas, ópticas, eletrônicas e catalíticas únicas apresentadas na Tabela 1.



Figura 1. Elementos químicos chamados de Terras Raras. CGEE.

Tabela 1. Elementos Terras Raras: Classificação e Aplicações

Elemento	Símbolo	Grupo	Principais Propriedades	Principais Aplicações
Escândio	Sc	Associado	Leve, alta resistência mecânica	Ligas de alumínio para aeronáutica, setor espacial, bicicletas de alta performance, células a combustível
Ítrio	Y	Associado	Ópticas e luminescentes	LEDs, fósforos para telas, lasers, supercondutores, ligas metálicas
Lantânio	La	Leve	Catalíticas e eletroquímicas	Baterias NiMH, catalisadores de refino, lentes ópticas
Cério	Ce	Leve	Catalíticas e oxidantes	Catalisadores automotivos, polimento de vidros
Praseodímio	Pr	Leve	Magnéticas e ópticas	Ímãs permanentes, ligas metálicas, vidros especiais
Neodímio	Nd	Leve	Magnéticas	Ímãs para veículos elétricos e turbinas eólicas
Promécio	Pm	Leve	Radioativas	Baterias nucleares e aplicações espaciais
Samário	Sm	Médio	Magnéticas e nucleares	Ímãs Sm-Co e aplicações militares
Európio	Eu	Médio	Luminescentes	Fósforos vermelhos para telas e LEDs
Gadolínio	Gd	Médio	Magnéticas e nucleares	Contraste para ressonância magnética

Térbio	Tb	Pesado	Magnéticas e luminescentes	Fósforos verdes e reforço térmico de ímãs
Disprósio	Dy	Pesado	Magnéticas em altas temperaturas	Ímãs resistentes ao calor
Hólmio	Ho	Pesado	Magnéticas e ópticas	Lasers médicos e reatores nucleares
Érbio	Er	Pesado	Ópticas	Amplificadores de fibra óptica
Túlio	Tm	Pesado	Ópticas e radiológicas	Lasers cirúrgicos e raios X portáteis
Itérbio	Yb	Pesado	Ópticas e eletrônicas	Lasers de fibra e relógios atômicos
Lutécio	Lu	Pesado	Catalíticas e radioativas	Detectores PET e catalisadores

A produção de terras raras (TR) constitui um dos processos mais complexos da indústria mineral, em razão das características químicas desses elementos e da dificuldade de separá-los em escala industrial. Embora sejam frequentemente denominados “terras raras”, a maioria desses elementos não é geologicamente escassa. O principal desafio econômico e tecnológico reside no fato de ocorrerem dispersos em baixas concentrações em minerais como a bastnasita, a monazita e a xenotima, exigindo etapas sofisticadas de beneficiamento, separação química e refino.

O processo produtivo pode ser dividido em quatro etapas principais. A primeira corresponde à mineração e ao beneficiamento físico do minério. Após a lavra, realizada em minas a céu aberto ou subterrâneas, o material extraído é submetido à cominuição, envolvendo britagem e moagem até a obtenção de partículas finas. Em seguida, processos de concentração, como a flotação, permitem separar os minerais portadores de terras raras da ganga, elevando o teor do concentrado mineral.

A segunda etapa consiste na abertura química do minério, também conhecida como craqueamento químico. Nessa fase, o concentrado é tratado com reagentes químicos, geralmente ácido sulfúrico concentrado ou soluções alcalinas, em temperaturas elevadas, frequentemente superiores a 200 °C. O objetivo é quebrar a estrutura cristalina dos minerais e solubilizar os elementos de terras raras. Posteriormente, por meio da lixiviação, os elementos são transferidos para uma solução aquosa na forma de sulfatos ou cloretos.

A terceira etapa representa o maior desafio tecnológico da cadeia produtiva: a separação individual dos elementos. Como os elementos terras raras possuem propriedades químicas extremamente semelhantes, sua individualização requer processos industriais altamente sofisticados. O método mais utilizado é a extração por solventes, na qual a solução contendo os elementos dissolvidos passa por longas baterias de misturadores-decantadores. Solventes orgânicos específicos promovem a transferência seletiva dos

elementos entre fases líquidas, permitindo sua separação gradual. Para atingir níveis de pureza superiores a 99,9%, frequentemente exigidos pelas aplicações industriais, podem ser necessários centenas ou até milhares de estágios sucessivos de extração.

A etapa final corresponde à produção de compostos e metais de terras raras. Após a separação, os elementos são precipitados e convertidos em óxidos de alta pureza, que constituem os principais produtos comercializados internacionalmente. Dependendo da aplicação final, esses óxidos podem ser submetidos a processos de redução térmica ou eletrólise para obtenção dos metais puros ou de ligas metálicas utilizadas na fabricação de ímãs permanentes, catalisadores, componentes eletrônicos, materiais ópticos e diversas tecnologias avançadas.

Além da elevada complexidade técnica, a produção de terras raras apresenta importantes desafios ambientais. Muitos dos minerais que hospedam esses elementos, especialmente a monazita, contêm quantidades significativas de tório e urânio, elementos naturalmente radioativos. Como consequência, as etapas de processamento geram rejeitos sólidos, efluentes líquidos ácidos e resíduos contendo radionuclídeos, cuja gestão requer rigorosos sistemas de controle ambiental e armazenamento seguro. O tratamento adequado desses resíduos é considerado um dos principais fatores para garantir a sustentabilidade da cadeia produtiva e minimizar riscos de contaminação de solos, águas superficiais e aquíferos.

Em função dessas características, o domínio das tecnologias de separação, refino e gestão ambiental tornou-se um dos principais fatores de competitividade internacional no setor de terras raras, explicando a concentração global dessas capacidades em poucos países e a crescente importância estratégica desses materiais para a transição energética, a transformação digital, a defesa e a manufatura avançada.

Como consequência, o acesso seguro a esses materiais passou a ser tratado pelas principais economias do mundo como questão de segurança econômica, tecnológica e industrial.

A cadeia produtiva de terras raras (TR) tornou-se, na primeira metade da década de 2020, um dos campos mais estrategicamente disputados da economia global. O que era, até os anos 1990, um setor técnico de nicho transformou-se em objeto de decretos executivos, legislação de emergência, fundos soberanos bilionários, disputas em organismos multilaterais e, mais recentemente, controles de exportação que reorganizam aceleradamente as cadeias industriais ocidentais.

Três processos simultâneos conduziram essa metamorfose: a escalada exponencial da demanda por elementos com propriedades magnéticas como os apresentados pelas terras raras (neodímio, praseodímio, disprosio e térbio), induzida pela eletrificação dos transportes, pela expansão da energia eólica e pela digitalização; a percepção generalizada de que a cadeia desses elementos estava concentrada em grau sem precedentes nas mãos de um único ator estatal; e a inflexão geopolítica entre 2020 e 2025, marcada pela pandemia de Covid-19, pela crise de Mianmar em novembro de 2024 e pelos novos controles chineses de exportação a partir de 2023.

O Brasil ocupa uma posição singular nesse rearranjo. Detém aproximadamente um quarto das reservas mundiais conhecidas, a segunda maior do mundo atrás apenas da China, e abriga depósitos de argilas de adsorção iônica com perfil geológico análogo ao de Mianmar, ricos em terras raras pesadas estratégicas. Ainda assim, a produção brasileira de óxidos em 2024 foi de aproximadamente 0,15% do total mundial. A

distância entre potencial geológico e protagonismo industrial é o problema central que este documento busca enfrentar.

A sequência de capítulos segue a lógica de um diagnóstico que se aprofunda do panorama institucional à execução estratégica. O Bloco I, que inclui os capítulos 1 a 3, caracteriza os atores globais, o cenário de mercado e o mapa do caminho estratégico que organiza as decisões necessárias. O Bloco II, capítulos 4 a 9, aprofunda o diagnóstico setorial para as cinco cadeias priorizadas (Capítulos 5 a 9), precedido do capítulo 4, transversal sobre sustentabilidade. Já o Bloco III, capítulos 10 a 14, articula o desenho estratégico propriamente dito: os dois elos estruturantes, mineração e refino, os eixos, prazos e instrumentos de política pública, os acontecimentos recentes e a síntese conceitual final. O Anexo A oferece um conjunto de instrumentos analíticos transversais que apoiam o uso operacional do documento.

O estudo converge para um diagnóstico essencial: a janela de oportunidade existe, é real e tem prazo. Os países que construíram cadeias de terras raras relevantes fora da China, em particular Austrália e Estados Unidos, combinaram quatro elementos que o Brasil ainda não articulou plenamente: marco legal estável, mecanismos soberanos de proteção a preços, acordos bilaterais com transferência efetiva de tecnologia e uma entidade operacional de Estado com mandato para executá-los. A diferença entre os países que se tornaram fornecedores soberanos de materiais críticos para a transição energética global e os que permanecem exportadores de concentrado bruto não está na dotação geológica, mas na velocidade e na consistência da decisão política. É sobre esse problema e sobre os caminhos disponíveis para enfrentá-lo, que tratam os capítulos seguintes.

BLOCO I — FUNDAMENTOS

Atores globais, cenário de mercado e mapa do caminho estratégico

O Bloco I apresenta o terreno sobre o qual a estratégia brasileira para terras raras precisa se apoiar. Três capítulos compõem o bloco. O primeiro mapeia os atores globais — potências produtoras, potências consumidoras, empresas e iniciativas multilaterais — e identifica as oito prioridades nacionais (Anexo A.5) que operam como pré-condições institucionais para qualquer estratégia setorial. O segundo descreve o cenário global de demanda, oferta, tipologia mineralógica e mecanismos de reorganização da cadeia, projetando cenários prospectivos até 2040 e situando a posição brasileira no quadro comparado. O terceiro consolida essa análise em um Mapa do Caminho Estratégico (*roadmap*) que organiza, em três horizontes temporais, as decisões institucionais e industriais que sustentam a inserção do Brasil na cadeia global.

Os três capítulos se complementam. O primeiro identifica quem atua na cena global e o que o Brasil precisa fazer para se inserir nela. O segundo descreve como o mercado se configura quantitativamente e onde estão as janelas concretas para o País. O terceiro articula o que precisa ser decidido, por quem e em que prazo. Juntos, fornecem o contexto institucional e operacional que torna inteligível a sequência de capítulos setoriais que segue nos Blocos II — Direcionadores e III — Estratégia.

Capítulo 1

Atores e prioridades nacionais no cenário global de terras raras

Três palavras costumam ser usadas como sinônimos no debate sobre terras raras, embora designem realidades distintas. Depósito é a ocorrência mineral fisicamente presente no subsolo, caracterizada por teor e tonelagem. Reserva é a fração desse depósito cuja extração é econômica e tecnicamente viável nas condições vigentes de preço, tecnologia e regulação, uma categoria que, por isso, varia no tempo, ainda que a rocha não mude. Dotação é o conjunto mais amplo do que o país possui em potencial geológico, exista ou não viabilidade de lavra hoje.

O Brasil ilustra a distância entre essas categorias. O país detém aproximadamente um quarto da dotação mundial conhecida (a segunda maior do planeta, atrás apenas da China) e abriga depósitos de argilas de adsorção iônica, ricos em terras raras pesadas estratégicas. A maior parte desta dotação, contudo, ainda não se traduziu em reservas economicamente classificadas, e a produção nacional de óxidos em 2024 não passou de cerca de 0,15% do total mundial. Há, portanto, abundância de recurso geológico e falta capacidade nacional de transformá-lo em produto.

Essa distância só se encurta ao longo da cadeia produtiva. Entre o depósito e o óxido separado de alta pureza e, adiante, entre o óxido e o ímã, a liga ou o catalisador, interpõe-se uma sequência de elos técnicos cuja ausência nenhuma reserva supre: domínio operacional dos circuitos de extração por solvente, infraestrutura analítica e radiológica, financiamento de longo prazo capaz de atravessar a volatilidade de preços e marco regulatório estável que proteja o investimento. É no percurso dessa cadeia, e não na dotação que a antecede, que se decide a participação do país nos segmentos de maior valor. Reserva geológica é condição necessária dessa participação; não é condição suficiente.

São precisamente essas condições (quem as construiu, como o fez e em que prazo) que separam os países que se tornaram fornecedores soberanos de materiais críticos daqueles que permaneceram exportadores de concentrado bruto. Mapeá-las exige examinar os atores que moldam a cadeia global: as potências produtoras e suas políticas de soberania mineral, as potências consumidoras e os mecanismos de diversificação que constroem, as empresas e os organismos multilaterais que estruturam a nova arquitetura internacional, e o próprio Brasil, em sua posição singular nesse rearranjo.

Os principais atores que moldam a cadeia produtiva de terras raras no contexto global são analisados neste capítulo segundo suas estratégias nacionais, prioridades declaradas e posições relativas nos diferentes elos da cadeia de valor. A análise abrange quatro grupos:

- i. as potências produtoras e suas políticas de soberania mineral, com destaque para China, Austrália, Estados Unidos, Índia e Rússia, examinando como cada país busca transformar dotação geológica em poder industrial;

- ii. as potências consumidoras e os mecanismos que constroem para diversificar o suprimento, ou seja, União Europeia, Japão e Coreia do Sul, com ênfase nos instrumentos regulatórios, financeiros e diplomáticos mobilizados;
- iii. as principais empresas mineradoras e de refino que operam fora da China e os organismos multilaterais e iniciativas de governança que estruturam a nova arquitetura internacional de minerais críticos, incluindo TR; e
- iv. o Brasil, examinado em sua posição geológica única, no portfólio de projetos em curso, nos gargalos estruturais que separam o potencial da realidade e nas prioridades nacionais que irão condicionar o desenvolvimento de uma cadeia integrada de TR.

Com base nessa análise comparativa, identificam-se as decisões estruturantes de natureza regulatória, diplomática, tecnológica e financeira que o Brasil precisa adotar para converter sua segunda maior reserva mundial em protagonismo industrial efetivo.

Ao final, apresenta-se um mapa de oito prioridades nacionais, organizadas por urgência e horizonte temporal, que constituem os pré-requisitos institucionais para a execução dos *roadmaps* estratégicos desenvolvidos nos capítulos subsequentes deste estudo.

1.1 Metodologia adotada

A metodologia adotada combinou revisão da literatura e análise documental com uma abordagem comparativa estruturada, organizada em torno de quatro grupos de atores que moldam a cadeia produtiva global de terras raras:

- i. as potências produtoras e suas políticas de soberania mineral;
- ii. as potências consumidoras e os mecanismos que constroem para diversificar o suprimento;
- iii. as principais empresas mineradoras e de refino que operam fora da China, bem como os organismos multilaterais e iniciativas de governança que estruturam a nova arquitetura internacional de minerais críticos; e
- iv. o Brasil, examinado em sua posição geológica, no portfólio de projetos em curso, nos gargalos estruturais e nas prioridades nacionais que condicionam o desenvolvimento de uma cadeia integrada de TR.

Essa estrutura em quatro grupos foi definida a partir de um critério funcional: cada grupo exerce um papel distinto e não intercambiável na cadeia de valor global das TR, seja como detentor de reservas e capacidade produtiva, seja como demandante soberano e formulador de política industrial, seja como operador de capital privado ou como árbitro de regras multilaterais. A análise comparativa entre esses grupos permite identificar, por contraste e por convergência, as decisões estruturantes que o Brasil precisa adotar para converter sua posição geológica em protagonismo industrial efetivo.

A seleção dos países analisados no primeiro grupo obedeceu a dois critérios combinados:

- i. participação significativa nas reservas globais e/ou na produção primária de TR, conforme o *Mineral Commodity Summaries 2026* do USGS (USGS, 2026); e
- ii. existência de estratégia nacional explicitamente orientada à cadeia de TR, expressa em legislação, política industrial ou acordo multilateral com impacto verificável sobre o suprimento global. Essa combinação excluiu países com reservas declaradas, mas sem política ativa, como parte de países africanos analisados apenas de forma sintética na Seção 1.3.6. Inclui países como os Estados Unidos, cuja participação nas reservas globais é relativamente modesta (2,1%), mas cuja política industrial de reindustrialização mineral tem impacto sistêmico sobre toda a arquitetura de suprimento fora da China. O mesmo critério orientou a seleção do segundo grupo, i.e., das potências consumidoras: foram selecionadas as três economias que combinam maior dependência estrutural de TR importadas com maior capacidade de mobilizar instrumentos financeiros, regulatórios e diplomáticos para endereçá-la: União Europeia, Japão e Coreia do Sul.

No que se refere às empresas e iniciativas multilaterais analisadas no terceiro grupo, adotou-se como critério de seleção a relevância operacional para a configuração atual ou projetada da oferta de TR fora da China: foram priorizadas as organizações com projetos em estágio de produção, construção ou financiamento confirmado até a data de corte desta análise (09 de abril de 2026). Empresas em fase de prospecção avançada sem financiamento comprometido foram referenciadas apenas quando relevantes para a discussão estratégica do Brasil.

As fontes primárias privilegiadas ao longo do capítulo são, em ordem de prioridade:

- i. organismos internacionais de referência técnica, notadamente a *International Energy Agency* (IEA) (*Global Critical Minerals Outlook 2025*) e o U.S. *Geological Survey* (*Mineral Commodity Summaries 2026*), cujos dados de produção, reservas e projeções de demanda são adotados como valores de referência, com as ressalvas metodológicas indicadas nas notas das tabelas;
- ii. legislação e documentos oficiais de governos nacionais — incluindo regulamentos do Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação da China (MIIT), o *Critical Raw Materials Act* da União Europeia (Regulamento UE 2024/1252) e o Decreto Executivo 14154 dos Estados Unidos —, tratados como fontes primárias de intenção estratégica declarada;
- iii. relatórios de *think tanks* e centros de pesquisa de referência no setor, como o *Center for Strategic and International Studies* (CSIS), o *Chatham House* e o Centro Brasileiro de Relações Internacionais (CEBRI); e
- iv. comunicados e relatórios corporativos de empresas diretamente mencionadas, utilizados exclusivamente para dados operacionais não cobertos pelas fontes institucionais. Foram deliberadamente evitadas fontes comerciais de precificação e análise de mercado sem metodologia auditável, exceto quando explicitamente sinalizadas em nota.

A análise do Brasil, desenvolvida na Seção 1.6, combina os dados de reservas e produção das fontes primárias acima com o levantamento do portfólio de projetos realizado pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) em parceria com o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), tratado como a referência nacional mais abrangente e tecnicamente validada disponível. As prioridades nacionais apresentadas na Seção

1.6.8 decorrem diretamente da análise comparativa dos atores globais e não constituem prescrições independentes, mas inferências estruturadas a partir dos padrões identificados nos países que construíram cadeias de TR relevantes fora da China.

1.2 O rearranjo geopolítico das terras raras: da concentração ao pluralismo emergente

1.2.1 A dominância chinesa como ponto de partida

A cadeia produtiva de terras raras transformou-se, nas primeiras décadas do século XXI, num dos campos mais estrategicamente disputados da economia global. O que era, até os anos 1990, um setor técnico de nicho tornou-se objeto de decretos executivos, legislação de emergência, fundos soberanos bilionários e disputas na Organização Mundial do Comércio (OMC). Essa metamorfose foi impulsionada por dois processos simultâneos e mutuamente reforçadores: de um lado, a escalada exponencial da demanda por elementos de TR magnéticos: neodímio (Nd), praseodímio (Pr), disprósio (Dy) e térbio (Tb) — induzida pela eletrificação dos transportes, pela expansão da energia eólica e pela digitalização acelerada; de outro, a percepção generalizada de que a cadeia produtiva desses elementos estava concentrada de forma sem precedentes históricos nas mãos de um único ator estatal: a República Popular da China.

A China respondeu, em 2024, por aproximadamente 69% da produção global de TR e por 91% de toda a capacidade de refino instalada no mundo (IEA, 2025). Em termos de produção efetiva, a participação chinesa no refino foi de aproximadamente 80% em 2025, em função de alguma ociosidade no parque instalado.

Essas duas cifras, 91% de capacidade instalada e $\approx 80\%$ de produção efetiva, são complementares, não contraditórias, e referem-se ao refino global agregado. Quando a referência muda para dependência específica de um mercado importador (como os 85% da União Europeia em óxidos separados, discutidos em 1.4.1) ou para uma etapa específica da cadeia (como a estimativa de 90% para etapa de refino isoladamente, em ETRPs ou ímãs), os percentuais variam por construção e refletem recortes analíticos distintos.

Essa concentração não decorre de vantagem geológica isolada. O país detém 52% das reservas globais, mas outros países somam 48%, incluindo o Brasil com 25% do total (USGS, 2026). Trata-se, antes, do resultado de quatro décadas de política industrial deliberada, que combinou subsídios soberanos, controle estatal do setor, atração sistemática de empresas de alta tecnologia para processamento interno e uso estratégico das cotas de exportação como instrumento de pressão geopolítica.

A crise de 2010–2011, quando a China reduziu suas cotas de exportação de TR em 40%, provocando alta de até 2.000% nos preços internacionais de alguns elementos em período de 18 meses, foi o primeiro sinal de alarme global (Mancheri et al., 2019). A reação imediata de EUA, União Europeia e Japão, que levaram o caso à OMC em 2012 e obtiveram decisão favorável em 2014, seguida de eliminação formal das cotas em 2015, demonstrou que a dependência estrutural não era sustentável politicamente. No entanto, a eliminação das cotas não resolveu o problema subjacente: a China manteve sua dominância no refino através de mecanismos mais sofisticados, incluindo controle regulatório interno, preços domésticos muito

inferiores aos internacionais e atração de empresas de alta tecnologia, como a Apple, para processamento em solo chinês. Em 2024, a participação da China no refino global permanecia em 91%, exatamente a mesma que era em 2015 (IEA, 2025).

1.2.2 Os catalisadores da reconfiguração: de 2020 a 2025

Três eventos de ruptura, ocorridos em rápida sucessão entre 2020 e 2025, aceleraram dramaticamente o ritmo de reconfiguração da cadeia global de TR e tornaram a diversificação de suprimentos uma prioridade de segurança nacional para dezenas de países.

O primeiro foi a pandemia de COVID-19 (2020), que expôs as vulnerabilidades de cadeias de suprimento globais hiper especializadas e impulsionou governos ocidentais a incluir minerais críticos em suas agendas de segurança industrial. O *Inflation Reduction Act* dos EUA (2022) e o *Critical Raw Materials Act* da UE (2024) foram, em larga medida, respostas institucionais a essa tomada de consciência (Comissão Europeia, 2024).

O segundo foi a crise de Mianmar (novembro de 2024). Mianmar havia se tornado, ao longo dos anos 2010, o maior fornecedor global de elementos de TR pesados (ETRPs), particularmente disprósio (Dy) e térbio (Tb), respondendo por aproximadamente 45% do suprimento mundial desses elementos críticos em 2024 (IEA, 2025). A extração se dava a partir de depósitos de argilas de adsorção iônica (IAC) explorados sem regulamentação governamental na região de Kachin State, com o minério transportado diretamente para refinarias chinesas na província de Yunnan. Em novembro de 2024, o Exército de Independência Kachin (KIA) tomou o controle definitivo da região mineradora, paralisando a extração e fechando as fronteiras. O impacto nas refinarias chinesas de ETRPs foi imediato e severo: os estoques de *feedstock* de argila iônica despencaram, forçando a China a recorrer a fornecedores alternativos — incluindo, explicitamente, o Brasil (IEA, 2025). Esse episódio demonstrou que mesmo a hegemonia chinesa no refino global tem pontos cegos de suprimento, e que a relevância estratégica das reservas brasileiras é imediata, não apenas potencial.

O terceiro evento foi a escalada de controles de exportação e tarifas em 2025. Em abril de 2025, o governo chinês implementou controles de exportação sobre sete elementos médios e pesados, samário (Sm), gadolínio (Gd), térbio (Tb), disprósio (Dy), lutécio (Lu), escândio (Sc) e ítrio (Y), exigindo licenças individuais do Ministério do Comércio (MOFCOM) para qualquer exportação (IEA, 2025). No mesmo mês, os EUA anunciaram tarifas adicionais sobre produtos chineses que elevaram a carga sobre ímãs permanentes a 145%, posteriormente reduzida a 30% por uma trégua de 90 dias em maio de 2025. A combinação desses dois movimentos, as restrições chinesas de exportação e as barreiras norte-americanas de importação, criou o ambiente de maior urgência já registrado para diversificação de suprimentos de TR fora da China.¹

1.2.3 A cadeia de valor como mapa de poder

Compreender a geopolítica das TR requer, antes de mais nada, entender que o poder nessa cadeia não decorre da posse de reservas, mas do domínio de etapas específicas do processamento. A cadeia de valor das TR se organiza em quatro elos principais, com crescimento exponencial de valor agregado em cada estágio:

- i. mineração e produção de concentrado misto (MREC), que vale entre US\$ 15 e US\$ 30 por quilograma;
- ii. separação química em óxidos individuais de alta pureza, que vale entre US\$ 1,11/kg (cério) e US\$ 988,99/kg (térbio);
- iii. produção de metais e ligas, que vale entre US\$ 150 e US\$ 400/kg; e (iv) fabricação de ímãs NdFeB sinterizados, estágio em que a China detém aproximadamente 90% da capacidade global de produção, exportou 58.000 toneladas de ímãs de TR em 2024 e concentra o maior valor agregado de toda a cadeia (IEA, 2025)¹.

Na Figura 1.1 é apresentada como a cadeia de terras raras agrega valor ao longo das etapas e produtos. Analogamente, a Figura 1.2 acrescenta a participação dos principais players e o posicionamento atual do Brasil.

Os países ocidentais têm procurado, com urgência crescente, construir capacidade nos elos 2 e 3, ou seja, separação e refino, que são os de maior complexidade tecnológica e menor transparência de preços. É nesse contexto que iniciativas como o investimento do Ex-Im Bank no Projeto Caldeira (Brasil) assumem seu significado estratégico: não se trata apenas de minerar mais TR, mas de romper a concentração oligopolística chinesa na separação e no refino, estágios em que a China detém parcela próxima a 90% da capacidade global de separação e refino e nos quais qualquer novo entrante enfrenta barreiras tecnológicas, regulatórias e de escala de alta complexidade (IEA, 2025).

¹ Preços unitários por quilograma de ímãs NdFeB sinterizados acabados não são monitorados em publicações de organismos institucionais como IEA ou USGS, cujos relatórios cobrem preços de óxidos e metais individuais, mas não de produtos manufaturados finais. Os valores de mercado para ímãs acabados são rastreados por serviços comerciais especializados, como Argus Media e Fastmarkets, cujas metodologias não são submetidas a revisão por pares. Para referência neste estudo: o USGS Mineral Commodity Summaries 2025 registra preços médios de 2024 para os principais óxidos utilizados na fabricação de ímãs NdFeB: neodímio (US\$ 56/kg), disprósio (US\$ 260/kg) e térbio (US\$ 810/kg) (USGS, 2025).

CADEIA DE VALOR DAS TERRAS RARAS: SALTO EXPONENCIAL DE VALOR

O poder não está nas reservas, mas no domínio das etapas de processamento



Figura 1.1. Cadeia de valor de terras raras II: salto de valor. CGEE

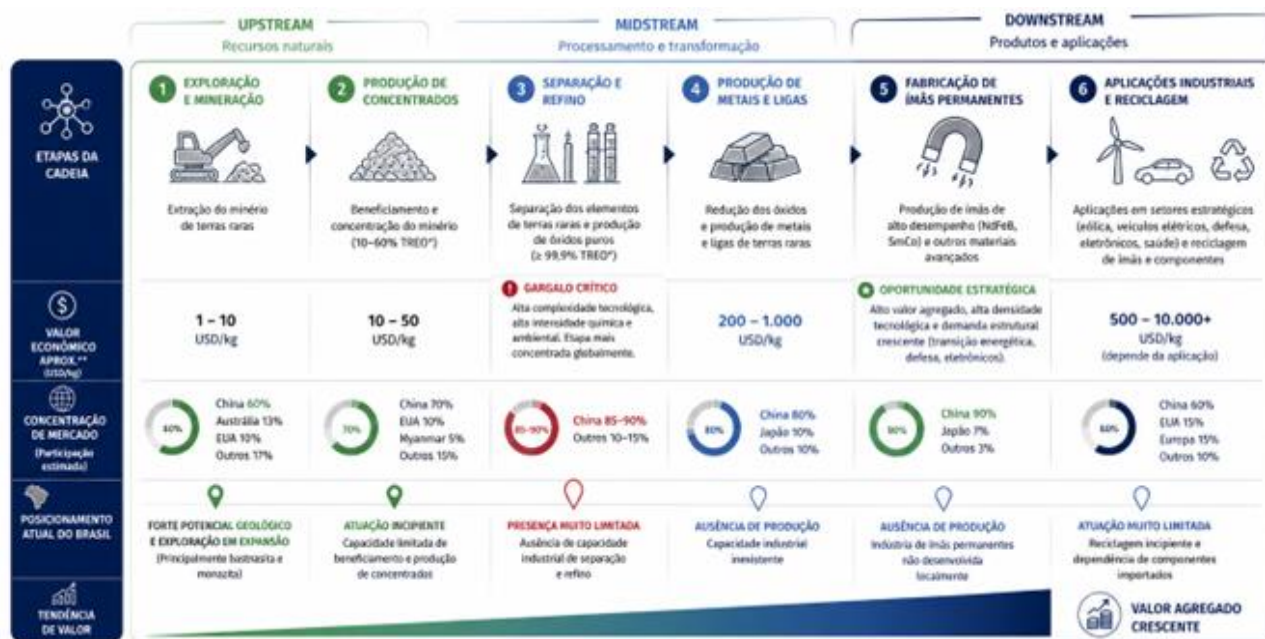


Figura 1.2. Cadeia de valor de terras raras I: downstream, midstream e upstream. CGEE

1.2.4 Panorama quantitativo global

A Tabela 1.1 apresenta o panorama de reservas e produção para os principais atores globais, com base nos dados mais recentes disponíveis. Diversos países passaram a considerar a elevada concentração geográfica do processamento de terras raras como um fator de vulnerabilidade para suas cadeias de suprimento.

Tabela 1.1: Reservas e produção mundial de terras raras (2024–2025)

País/Região	Reservas (Mt REO)	% Reservas globais	Produção 2024 (kt)	% Produção global	Posição na cadeia
China	44,0	52%	270,0 ¹	69%	Monopolista <i>mine-to-magnet</i>
Brasil	21,0	25%	0,56	0,15%	Potência geológica com produção incipiente
Índia	8,52	10,0%	2,9	0,7%	Produtor em reestruturação acelerada
Austrália	6,3	6,8%	29,0	7,6%	Produtor ocidental líder com refino crescente
Rússia	3,8	4,1%	2,5	0,6%	Potencial não convertido. isolamento pós-2022
Vietnã	3,5	3,8%	0,3	0,1%	Produtor incipiente com interesse crescente
EUA	1,9	2,1%	45,5	12,0%	Produtor construindo cadeia <i>mine-to-magnet</i>
Mianmar	< 0,1	< 0,1%	31,0 (2023)	7,9% ¹² (2023)	Fornecedor de ETRPs de argilas de adsorção iônica, porém instável
Demais países	—	5,3%	~25	6,5%	Nigéria, Tailândia, Tanzânia, Groenlândia

Fontes: USGS (2026).; IEA, *Global Critical Minerals Outlook 2025* (jun. 2025). Reservas em Mt REO; produção em kt de REO contido. *Press Information Bureau - India (2026); **Dados de produção de Mianmar referem-se a 2023, antes da interrupção de novembro de 2024.

Nota: A produção chinesa de 270.000 t REO refere-se à cota oficial de mineração fixada pelo Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação da China (MIIT) para 2024, conforme reportado pelo USGS (2025), que adverte explicitamente que o valor não inclui produção não documentada. A literatura especializada documenta de forma consistente que a extração efetiva supera a cota oficial, em particular nos depósitos de argilas de adsorção iônica do sul da China, onde a mineração informal é estrutural. A participação real da China na produção global estimada de 390.000 t REO pode, portanto, ser superior aos 69% indicados na Tabela 1.1. Para fins deste estudo, adota-se o valor oficial por ser o único auditável e comparável entre países.

Na Figura 1.3 é apresentado o ranking das maiores reservas de terras raras globais e a respectiva produção em mina atual (dados da USGS, 2025). Enquanto, a Figura 1.4 representa estes dados como indicadores estratégicos de capacidades, competitividade e aproveitamento, apontando para a posição do Brasil como um possível emergente no setor.

² Nota sobre Mianmar: a participação de 7,9% refere-se à produção total de óxidos de terras raras (OTR). Quando recortada por elementos pesados (ETRP, particularmente Dy e Tb), a participação de Mianmar atinge aproximadamente 45% do suprimento global (ver Seção 1.2.2). A heterogeneidade por elemento explica a relevância estratégica desproporcional ao volume agregado.

Posição	País	RESERVAS (em toneladas)	PRODUÇÃO DE MINA (em toneladas)
1	China	44.000.000	270.000
2	Brasil	21.000.000	20
3	Índia	6.900.000	2.900
4	Austrália	5.700.000	13.000
5	Rússia	3.800.000	2.500
6	Vietnã	3.500.000	300
7	Estados Unidos	1.900.000	45.000
8	Groenlândia	1.500.000	–
9	Tanzânia	890.000	–
10	África do Sul	860.000	–
11	Canadá	830.000	–
12	Tailândia	4.500	–
13	Total mundial (arredondado)	90.000.000	390.000

Figura 1.3. Top 12 reservas e as respectivas produções de terras raras globais. Fonte: Dados da USGS, confecção CGEE

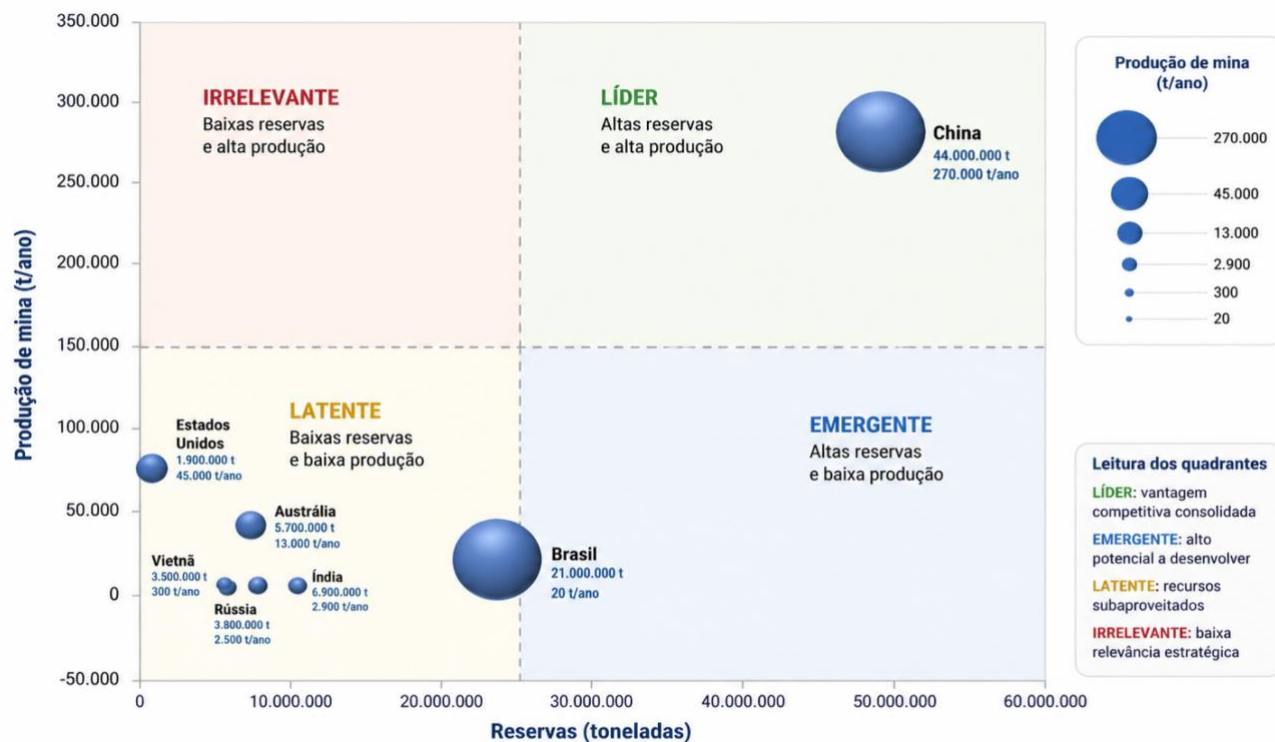


Figura 1.4. Reservas vs. Produção de Terras Raras: Quadrantes estratégicos. CGEE, com dados das USGS.

A Tabela 1.2 apresenta a concentração do refino global, elo de maior valor estratégico da cadeia, e suas projeções para 2030 e 2040.

Tabela 1.2: Concentração do refino global de terras raras: situação atual e projeções

País	% Refino 2024	% Refino 2030 (proj.)	% Refino 2040 (proj.)	Principais instalações
China	91%	~80%	73–75%	Yunnan (ETRPs), Jiangxi (IAC), Baotou (LREE)
Malásia	5%	4%	3%	LAMP — Lynas (Kuantan)
EUA	2%	6%	9%	MP Materials (CA + TX); Energy Fuels (UT)
Estônia	1%	2%	3%	Neo Performance — Silmet + planta NdFeB Narva
Austrália	< 1%	4%	7%	Kalgoorlie — Lynas (ETRPs, mai.2025); Eneabba — Iluka
Brasil	0%	2%	5–8%	Refinaria nacional projetada (2029)
França/outros UE	< 1%	2%	3%	Caremag SAS/Carester (Lacq — refinaria projetada)

Fontes: IEA, Global Critical Minerals Outlook 2025 (jun. 2025). Projeções baseadas no cenário-base (base case) da IEA, que incorpora apenas projetos com planos de desenvolvimento concretos. O cenário de alta produção (high production case) implica na participação chinesa marginalmente inferior em 2040.

A assimetria mais reveladora das Tabela 1.1 e Tabela 1.2 é a que separa o Brasil dos demais países: com 25% das reservas globais, que é a segunda maior participação mundial, o país produziu em 2024 aproximadamente 0,15% da produção mundial e tem participação zero no refino. Esse hiato entre dotação geológica e capacidade produtiva industrial é o problema central que o **Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de Terras Raras no Brasil: 2026–2040** busca endereçar, sendo o fio condutor das implicações discutidas ao longo deste capítulo.

O **Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de Terras Raras no Brasil: 2026–2040**, foco central deste documento, é um *roadmap* estratégico para o desenvolvimento da cadeia produtiva de terras raras no Brasil, especialmente idealizado para as características, necessidades e capacidades do País.

1.3 Potências produtoras: estratégias nacionais e prioridades declaradas

1.3.1 China: dominância integrada e instrumentalização estratégica

A hegemonia chinesa nas TR não foi construída pela geologia, mas pela política. Até os anos 1980, os EUA dominavam a produção global, com a mina Mountain Pass (Califórnia) respondendo por mais de 60% do mercado mundial. A China, então, extraía TR modestamente como coproduto de minérios de ferro em Bayan Obo (Mongólia Interior). A virada estratégica ocorreu na confluência de dois fatores: a identificação das reservas de Bayan Obo como as maiores do mundo e a decisão política de Deng Xiaoping de transformar essa dotação em poder industrial (Klinger, 2017). A política industrial subsequente — subsídios que tornavam a produção chinesa artificialmente barata, inexistência de custos de conformidade ambiental e atração de empresas estrangeiras de TR mediante acesso privilegiado à matéria-prima interna — resultou, ao longo dos anos 1990 e 2000, no fechamento progressivo de operações concorrentes em todo o mundo. Mountain Pass fechou em 2002 (reabrindo em 2012 em nova configuração).

Historicamente, o Brasil deixou de beneficiar e exportar monazita processada nos anos 1990, perdendo capacidade de refino. A Índia, por sua vez, manteve o setor sob o monopólio estatal, o que travou a modernização. Recentemente, o Brasil retomou a exportação do mineral bruto por meio da iniciativa privada, enquanto a Índia busca atrair investimentos para refino.

Em 2010, a China controlava 97% da produção mundial de TR. Quando reduziu as cotas de exportação em 40% naquele ano, demonstrou ao mundo a extensão do poder que havia acumulado — e acelerou, paradoxalmente, o processo de diversificação que viria a ameaçar essa posição nas décadas seguintes. No ano seguinte, o Conselho de Estado chinês criou o China Rare Earth Group (CREG) pela fusão de seis grandes produtores estatais, consolidando sob um único guarda-chuva a maior parte da produção e do refino do país. Com sede em Ganzhou (Jiangxi), centro histórico da produção de TR pesados de argila iônica, o CREG é responsável por mais de 60% da produção nacional e por parcela equivalente do refino (CSIS, 2025a). Sua criação foi explicitamente motivada por três objetivos: eliminar a fragmentação que havia gerado concorrência abusiva entre produtores domésticos, consolidar o poder de formação de preços e instrumentalizar mais eficazmente as TR como ferramenta de política exterior.

Em abril de 2024, o governo chinês emitiu as *Rare Earth Management Regulations* — conjunto de normas que regulamentam todos os aspectos da exploração, gestão e uso de TR na China. De particular relevância é a criação do sistema de rastreabilidade de produtos de terras raras', supervisionado pelo Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação (MIIT), que em fevereiro de 2025 publicou regulamentação complementar para sua implementação (IEA, 2025). Esse sistema, aparentemente técnico, tem implicação estratégica direta: ao rastrear todos os fluxos de TR dentro e fora da China, o governo obtém capacidade de monitorar TR ilegalmente extraídas, de intensificar a eficácia de sanções e de identificar cadeias que procuram contornar restrições de exportação.

Em 4 de abril de 2025, o MOFCOM implementou controles de exportação com efeito imediato sobre sete TR médios e pesados: samário (Sm), gadolínio (Gd), térbio (Tb), disprosio (Dy), lutécio (Lu), escândio (Sc) e ítrio (Y). A medida foi apresentada como resposta às tarifas norte-americanas, mas sua implementação

revelou uma estratégia mais sofisticada: para quatro dos sete elementos (Sm, Gd, Tb, Dy), entre 55% e 95% da demanda em 2024 era direcionada para manufatura de ímãs — o elo de maior valor da cadeia (IEA, 2025). O controle sobre esses elementos afeta diretamente a capacidade de fabricação de ímãs NdFeB na Europa e nos EUA, que dependem de importações chinesas processadas para suas indústrias automotiva e de turbinas eólicas.

O estudo da IEA (2025) destaca que os controles não provocaram, imediatamente, surto de preços, pois os mercados estavam relativamente bem supridos e nenhuma proibição explícita foi implementada. No entanto, o anúncio criou incerteza estrutural: qualquer empresa compradora de TR fora da China passou a saber que o licenciamento de exportação pode ser negado a qualquer momento, por razões políticas não declaradas. Essa incerteza tem custo econômico mensurável na forma de prêmios de risco incorporados nos contratos de longo prazo.

Esse arsenal regulatório se sobrepõe a uma medida anterior de grande relevância: em dezembro de 2023, a China proibiu explicitamente a exportação de tecnologia de fabricação de ímãs NdFeB, fechando o canal mais valioso de transferência tecnológica para fora do país e tornando obrigatório que qualquer cadeia ocidental de ímãs construa essa competência com parceiros não chineses (tipicamente japoneses ou europeus).

A estratégia chinesa em TR para as próximas duas décadas apresenta quatro eixos convergentes, identificados na literatura de análise estratégica (CSIS, 2025a; Chatham House, 2025; RFF, 2025): (i) manutenção da dominância no refino e na manufatura de ímãs de alto desempenho, mesmo que com perda gradual de participação relativa na mineração; (ii) intensificação da verticalização da cadeia a jusante para o território nacional, atraindo cada vez mais indústrias consumidoras de TR, incluindo fabricantes de VEs, turbinas eólicas e robôs industriais; (iii) desenvolvimento e proteção agressiva de propriedade intelectual em processos de separação e refino de TR, por meio das patentes e das novas restrições de exportação de tecnologia de dezembro de 2023 (que proibiu a exportação de tecnologia de fabricação de ímãs NdFeB); e (iv) uso seletivo e calibrado dos controles de exportação. A estratégia chinesa resultou na consolidação de capacidades industriais e tecnológicas que ampliaram sua influência sobre cadeias globais de suprimentos.

1.3.2 Austrália: da geologia à cadeia de valor

A Austrália detém cerca de 5,7 Mt de reservas de terras raras, o que a coloca entre as quatro maiores posições mundiais, conforme o *Mineral Commodity Summaries* 2026 do USGS (USGS, 2026a).

Seu principal depósito, Mount Weld (Western Australia), operado pela Lynas Rare Earths, é amplamente descrito como um dos depósitos de maior teor de TR fora da China, com zonas de minério que atingem 6–8% de óxidos totais de terras raras (TREO) e viabilizam produção competitiva, mesmo sem subsídios soberanos de grande escala (Ozgeology, 2025). Além de Mount Weld, o país abriga o depósito Nolans (Northern Territory, Arafura Rare Earths), rico em NdPr e Eneabba (Western Australia, Iluka Resources), que processa estoques históricos de areia mineral contendo monazita e xenotima, esta última particularmente rica em TR pesadas como Dy e Tb (Iluka, 2023; Global Mining Review, 2023).

A Lynas Rare Earths constitui hoje a iniciativa de diversificação da cadeia de TR mais bem-sucedida fora da China e a principal referência comparativa para o desenvolvimento brasileiro (Lynas, 2020; Rare Earth Exchanges, 2026). A empresa busca alcançar a meta de produzir cerca de 12.000 t/ano de NdPr a partir de Mount Weld e Empreendimentos Associados, consolidando-se como único fornecedor significativo de TR para ímãs permanentes fora da China (Discovery Alert, 2025; Mining Technology, 2022). Em novembro de 2024, inaugurou a Kalgoorlie Rare Earths Processing Facility (Western Australia), primeira planta de processamento de TR no próprio país, projetada para produzir até 68 kt/ano de carbonato misto de TR (MREC), a partir do concentrado de Mount Weld (Small Caps, 2024; AMBC, 2025).

Em maio de 2025, a Lynas alcançou a primeira produção de óxido de disprósio em sua planta na Malásia, tornando-se o único produtor comercial de ETRPs separadas fora da China, marco reconhecido por análises de mercado como ponto de inflexão na geografia da oferta global (Mining Weekly, 2025; Raw Materials, 2025). Paralelamente, a Lynas opera desde 2013 a Lynas Advanced Materials Plant (LAMP) em Kuantan, Malásia, principal refinaria de TR leves fora da China, e está construindo unidades de separação de TR pesadas nos EUA (Hondo e Seadrift, Texas), com apoio de cerca de US\$ 258 milhões do Departamento de Defesa norteamericano (Mining Weekly, 2025; Rare Earth Exchanges, 2026). Essa estrutura geográfica tripartite com mineração na Austrália, refino de leves na Malásia e separação de ETRPs nos EUA, reflete a estratégia deliberada de resiliência, evitando a concentração de elos críticos em uma única jurisdição (Rare Earth Exchanges, 2026).

A Iluka Resources está construindo, em Eneabba, a primeira refinaria australiana de TR capaz de separar individualmente elementos leves e pesados a partir de concentrados de monazita e xenotima (Iluka, 2023; Fluor, 2023). O Projeto Eneabba Refinery conta com apoio de cerca de A\$ 1,65–1,7 bilhão³ em financiamento via Critical Minerals Facility, gerido pela Export Finance Australia, e tem início de operações previsto para 2026, com a meta de fornecer óxidos separados de TR diretamente para mercados ocidentais sem passagem pelo refino chinês (Iluka, 2023; Innovationaus, 2023).

A Arafura Rare Earths, por sua vez, desenvolve o projeto Nolans (Northern Territory), focado em NdPr para ímãs destinados às cadeias de veículos elétricos e à energia eólica, com contratos de *offtake* firmados com Hyundai/Kia e Siemens Gamesa e um pacote de financiamento, que combina garantias de agências de crédito à exportação com apoio do governo australiano, incluindo aporte de A\$ 200 milhões em participação societária pelo National Reconstruction Fund Corporation (NRFC) (Yahoo Finance, 2025; Global Mining Review, 2023).

O governo australiano adotou uma das políticas mais abrangentes de suporte à cadeia de TR fora da China. O National Reconstruction Fund, de A\$ 15 bilhões, reserva A\$ 1 bilhão especificamente para agregação de valor a recursos minerais, enquanto o Critical Minerals Facility, recentemente ampliado para A\$ 4 bilhões, financia refinarias e plantas de processamento de minerais críticos, incluindo terras raras (ASPI, 2023; Innovationaus, 2023).

Em outubro de 2025, Estados Unidos e Austrália firmaram o *US–Australia Critical Minerals Framework*, comprometendo-se com cerca de US\$ 1 bilhão de cada país para acelerar um pipeline estimado em US\$ 8,5 bilhões em projetos de minerais críticos, entre os quais se destacam a própria Iluka em Eneabba e o

³ 1 A\$ = US\$0,716 em 03 de junho 2026

projeto Nolans da Arafura (*Minerals Council Of Australia*, 2025). O acordo inclui cooperação técnica em processamento e separação de TR, tornando-se modelo direto para o tipo de parceria que o Brasil busca com seus pares ocidentais justamente no elo de maior barreira tecnológica e sensibilidade geopolítica da cadeia de valor de TR (*Minerals Council Of Australia*, 2025).

A Austrália também é o principal pilar da estratégia japonesa de diversificação de suprimento de terras raras. A parceria Austrália–Japão, iniciada em 2011 com um investimento da Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC) de aproximadamente US\$ 250 milhões na Lynas Rare Earths, é o exemplo mais longo e operacionalmente validado de cadeia integrada da mineração à separação construída fora da China por economias aliadas (Rare Earth Exchanges, 2026).

Em março de 2026, a Lynas e a sociedade de propósito específico JARE (*joint venture* JOGMEC/Sojitz) renovaram e ampliaram o acordo de fornecimento, estabelecendo compromisso de cerca de 5.000 t/ano de NdPr para o mercado japonês até 2038, com preço mínimo soberano em torno de US\$ 110/kg e mecanismo de partilha da valorização acima de US\$ 150/kg, bem como participação japonesa em parte da produção de TR pesadas (Investing News, 2026; Rare Earth Exchanges, 2026). Esse arranjo é desenhado explicitamente para reduzir a exposição do Japão à referência de preços chinesa e constitui, na prática, o modelo mais avançado de contrato de longo prazo para ímãs permanentes baseado em projetos ocidentais de TR (Investing News, 2026).

1.3.3 Estados Unidos: reindustrialização e soberania mineral

A trajetória dos EUA nas TR é a mais dramática história de desindustrialização e reindustrialização do setor. Mountain Pass (Califórnia), a maior mina de TR fora da China, foi fechada em 2002 sob pressão competitiva dos preços chineses e de passivos ambientais. Durante a década de 2000, os EUA dependiam quase totalmente de importações chinesas para sua indústria de defesa, de VEs e de eletrônica, criando vulnerabilidade estratégica que ficou explícita durante a crise de cotas de 2010 (Mancheri et al., 2019). A reabertura de Mountain Pass pela MP Materials em 2017 foi o primeiro passo da reconstrução, mas a empresa continuou exportando o concentrado bruto para as refinarias chinesas até 2024, quando a pressão política e regulatória acelerou a decisão de processar domesticamente.

A MP Materials é hoje o ator mais relevante da cadeia norte-americana de TR. Opera Mountain Pass (maior mina de TR das Américas), iniciou a separação de NdPr em 2023 na própria planta californiana e está construindo uma planta de ímãs NdFeB sinterizados em Fort Worth (Texas), criando a única cadeia *mine-to-magnet* do continente americano. Em 2025, firmou parceria público-privada com o Departamento de Defesa dos EUA: investimento de US\$ 400 milhões em ações preferenciais, empréstimo de US\$ 150 milhões e, crucialmente, o mecanismo do Departamento de Defesa norte-americano (US DoD) para MP Materials (US\$ 110/kg NdPr garantido) e, um mecanismo de preço mínimo soberano de US\$ 110/kg de NdPr, quando os preços de mercado estavam abaixo de US\$ 60/kg (CSIS, 2025b; IEA, 2025). Esse mecanismo de *floor price* é o instrumento de política mais inovador identificado no setor: ao garantir rentabilidade mínima independentemente das oscilações de mercado, permite que a empresa planeje investimentos de capital de longo prazo sem o risco de deflação chinesa. General Motors e outros OEMs assinaram contratos de *offtake* de longo prazo para ímãs produzidos nos EUA, completando o elo da demanda.

A lógica do preço mínimo merece análise mais cuidadosa, porque é exatamente o mecanismo que o Brasil precisará replicar em seus próprios acordos bilaterais. A China tem capacidade demonstrada de deprimir artificialmente os preços de TR no mercado *spot*, como fez ao longo dos anos 2000, tornando a produção de Mountain Pass inviável até seu fechamento em 2002. Sem um preço mínimo garantido por um comprador soberano, nenhum projeto de TR fora da China resiste a uma campanha deliberada de deflação de preços. O preço mínimo definido pelo Departamento de Defesa americano (USDoD) transforma a equação: mesmo que a China pratique NdPr a US\$ 40/kg no mercado *spot*, a MP Materials recebe US\$ 110/kg do governo norte-americano, tornando a deflação chinesa ineficaz contra esse ativo específico. Para o Brasil, negociar preços mínimos análogos com EUA, Japão ou UE nos acordos bilaterais é não apenas uma conveniência financeira, mas uma necessidade estrutural de sobrevivência econômica dos projetos de separação e refino de TR.

O Decreto Executivo 14154 (janeiro de 2025) do governo norte-americano estabeleceu meta explícita de liderança em minerais não-combustíveis e determinou a mobilização de todos os instrumentos disponíveis (DoD, DFC, Ex-Im Bank) para suporte a projetos domésticos e aliados. Em fevereiro de 2026, os EUA lançaram o *Project Vault*, que mobiliza US\$ 12 bilhões, sendo US\$ 10 bilhões em financiamento do Export-Import Bank e aproximadamente US\$ 2 bilhões em capital privado, para estabelecer a *US Strategic Critical Minerals Reserve*. (Ex-Im Bank, 2026). A reserva abrange todos os 60 minerais da lista de minerais críticos do USGS 2025, com ênfase inicial nas terras raras. A estrutura é orientada pela demanda: os compromissos de compra dos fabricantes determinam o que é estocado e não a previsão centralizada do governo. Entre as ferramentas complementares estão participações acionárias em empresas de mineração, acordos bilaterais de piso de preço e financiamento vinculado a contratos de *offtake* via Ex-Im Bank.

As tarifas sobre importações chinesas de TR, que atingiram 145% sobre ímãs permanentes em abril de 2025 (IEA, 2025), foram posteriormente reduzidas a 30% por uma trégua de 90 dias em maio do mesmo ano, mas sinalizam o comprometimento político de longo prazo com a desvinculação da cadeia norte-americana de TR em relação à China. Para o Brasil, o interesse do Ex-Im Bank nos projetos Caldeira (US\$ 250 milhões de suporte preliminar) e Serra Verde (US\$ 465 milhões) é parte integrante dessa estratégia de diversificação geográfica.

1.3.4 Índia: do monopólio estatal ao despertar estratégico

A Índia é, talvez, o caso mais paradoxal da cadeia global de TR: detém a terceira maior reserva mundial (8,52 Mt REO — Índia, Ministério de Minas/AMD, 2026), distribuída em 7,23 Mt em depósitos de monazita nas areias costeiras de Kerala, Tamil Nadu, Andhra Pradesh e Odisha, e 1,29 Mt em terrenos de rocha dura em Gujarat e Rajastão. Tem tradição em processamento nuclear (a Indian Rare Earths Limited foi criada em 1950) e, apesar de tudo isso, produziu apenas 2.900 toneladas de TR em 2024, representando menos de 1% do total global, sem capacidade de separação de ETRPs e sem qualquer projeto de ímãs NdFeB (IEA, 2025; ORF, 2025).

A razão é histórica e institucional. As TR foram classificadas como material nuclear pelo *Atomic Minerals Act* de 1962, em virtude do teor de tório radioativo presente na monazita, o que restringiu sua exploração ao monopólio estatal por mais de 75 anos. Esse arranjo gerou atraso tecnológico estrutural e inibiu sistematicamente o investimento privado. A ruptura veio com a reforma do *Mines and Minerals*

Development and Regulation (MMDR) Act, em março de 2025, que pela primeira vez na história indiana autorizou a exploração privada de TR, ainda que condicionada a mecanismos de supervisão da IREL. A IREL opera separação de TR desde 1952, a partir de depósitos de areia monazítica, e sua capacidade foi ampliada para 5.000 t/ano em 2012. Em paralelo, o governo anunciou, em novembro de 2025, o Esquema de Promoção de Ímãs Permanentes (72,8 bilhões de rúpias indianas⁴) e, em janeiro de 2025, a *National Critical Minerals Mission* (163 bilhões de rúpias indianas), voltada à cadeia completa de minerais críticos, incluindo as TR (PIB India, 2025; S&P Global, 2026).

A Índia também constituiu a Khanij Bidesh India Ltd. (KABIL), empresa pública criada para aquisição de ativos de minerais críticos no exterior, com interesse declarado em depósitos de TR na Austrália, Canadá e África. Sua participação no *Quad Critical Minerals Working Group* (com EUA, Japão e Austrália) abre acesso a financiamento e tecnologia que o modelo histórico de fechamento estatal não permitia.

Nesse contexto, adquire particular relevância o Memorando de Entendimento sobre Cooperação no Campo de Elementos de Terras Raras e Minerais Críticos, firmado em 21 de fevereiro de 2026, em Nova Délhi, entre o Ministério de Minas do Governo da República da Índia e o Ministério de Minas e Energia do Brasil, por ocasião do encontro entre o presidente Lula e o primeiro-ministro Narendra Modi.

O documento define o memorando como uma estrutura para cooperação em pesquisa, desenvolvimento e inovação na mineração, com foco especial em ETR e minerais críticos, prevendo a facilitação de investimentos no setor mineral para exploração, extração e processamento, a promoção de iniciativas conjuntas para fortalecer a resiliência das cadeias de suprimento e o intercâmbio de cientistas, especialistas e delegações. Para o Brasil, o acordo sinaliza reconhecimento internacional de sua posição geológica estratégica; para a Índia, representa acesso diversificado a uma fonte de TR no Sul Global, fora da órbita chinesa e dos blocos ocidentais.

A experiência indiana oferece ao Brasil uma advertência estrutural de primeira ordem. A Índia detém as terceiras maiores reservas mundiais de TR, estimadas em 8,52 milhões de toneladas de óxidos (Press Information Bureau - India, 2026) e ainda assim contribui com menos de 1% da produção global, gerando apenas cerca de 2.900 toneladas por ano (Defence Horizon Journal, 2026). O diagnóstico não é de escassez geológica, mas de colapso da cadeia de valor: o setor permaneceu sob monopólio estatal da IREL por 75 anos, de 1950 até março de 2025, quando reformas no MMDR Act finalmente permitiram a participação privada na exploração e mineração de ETR (Defence Horizon Journal, 2026).

O resultado acumulado desse modelo é severo. A IREL opera a aproximadamente 5% de sua capacidade teórica instalada e a capacidade de separação de elementos de ETRPs é virtualmente nula (Discoveryalert, 2025). A planta de terras raras de alta pureza da divisão de refino da IREL chegou a reduzir sua produção em 9% no ano fiscal 2023–24, evidenciando a ausência de integração do segmento intermediário da cadeia (Observer Research Foundation, 2025a). Apesar de deter as terceiras maiores reservas mundiais, a Índia importou mais de 53.000 toneladas métricas de ímãs de TR no ano fiscal 2024–25 (Observer Research Foundation, 2025b). A separação de ETRPs é um processo tecnicamente complexo, no qual a China está muito à frente, e a ausência de infraestrutura para a separação e refino de elementos individuais a partir

⁴ 1 IN\$ = 0,01 US\$ em 03 de junho de 2026.

do minério bruto constitui a segunda razão estrutural para o fraco desempenho indiano (Defence Horizon Journal, 2026).

A abertura regulatória de 2025 é bem-vinda e inaugura perspectivas reais de recuperação. A Índia aprovou, em novembro de 2025, um esquema de ₹7.280 crore (perto de 80 milhões de dólares) para promover a fabricação de ímãs permanentes de TR sinterizados, com meta de 6.000 MTPA de capacidade integrada (Chemcopilot, 2025), porém o hiato acumulado em sete décadas levará tempo considerável para ser superado. Para o Brasil, a lição indiana é direta: reservas sem cadeia de separação e sem mecanismos de preço mínimo, que protejam os projetos contra a deflação chinesa, não se convertem em posição estratégica e sim em dependência exportadora de concentrado de baixo valor agregado.

1.3.5 Rússia: ambições declaradas, execução limitada

A Rússia detém reservas estimadas de 3,8 Mt de TR (USGS, 2026), entre as quais se destaca o depósito Tomtor (Yakutia), considerado por alguns geólogos o maior recurso isolado de TR pesados do mundo, com teores excepcionalmente altos de nióbio e escândio além de TR. Em maio de 2025, após determinação de Vladimir Putin no âmbito da agenda de soberania mineral, a Rosneft adquiriu os direitos de exploração de Tomtor, sinalizando que o Kremlin pretende mobilizar esse ativo como parte da resposta ao isolamento pós-2022 (Mining.Com, 2025). A meta declarada pelo governo russo é atingir 12% do mercado global de TR até 2030 (Arctic Today, 2025).

No plano bilateral, o interesse russo nos minerais estratégicos brasileiros materializou-se em março de 2026: a Uranium One Group JSC, subsidiária do grupo TENEX da estatal Rosatom, e a NBEPAr (Núcleo Brasil Energia Participações), *holding* do Grupo Diamante no setor nuclear, assinaram, durante o Nuclear Summit 2026, realizado no Rio de Janeiro em 23 e 24 de março, um acordo para a criação da *joint venture* Nadina Minerals, destinada a desenvolver projetos de prospecção, extração e processamento de matérias-primas estratégicas no Brasil (CNN Brasil, 2026). Segundo o CEO da NBEPAr, as negociações entre as partes se estenderam por mais de dois anos. As primeiras áreas requisitadas junto à ANM situam-se no Paraná, na região de Figueira, e na Bahia, em Caculé (Gazeta Do Povo, 2026).

O acordo reflete uma convergência de interesses táticos entre dois países do Sul Global que preferem não depender exclusivamente dos blocos em disputa: a Rosatom vem reorientando sua estratégia de exportações nucleares crescentemente para a África, a Ásia e a América Latina, à medida que perde mercado nos EUA e na UE em decorrência das sanções ocidentais (Knightsbridge SG, 2024), enquanto o Brasil diversifica seus interlocutores sem comprometer a neutralidade estratégica declarada.

O alcance prático do acordo, contudo, deve ser avaliado com cautela. A Rosatom está profundamente integrada ao complexo militar russo, incluindo a produção de armas nucleares e mantém extensas relações comerciais com diversas empresas de defesa sancionadas, como a Rostec, além de compartilhar tecnologia e recursos com institutos de pesquisa que trabalham na defesa russa (Bruegel, 2025). Países com reatores de tecnologia russa, como a República Tcheca e a Bulgária, já iniciaram processos de transição para combustível nuclear ocidental e a perda gradual dos mercados dos EUA e da UE está levando a Rosatom a consolidar sua presença justamente no Sul Global (CSIS, 2026). Qualquer aprofundamento tecnológico da parceria Brasil-Rosatom no segmento de minerais críticos implicaria, portanto, riscos concretos de acesso a mercados e financiamento do bloco ocidental que o Brasil não pode ignorar, em especial no contexto

dos acordos bilaterais que negocia simultaneamente com os EUA, o Japão e a UE para o desenvolvimento da cadeia de terras raras.

1.3.6 Outros produtores relevantes

Vietnã: O Vietnã detém 3,5 Mt de reservas (USGS, 2026) e encontra-se na sexta posição mundial, porém produziu apenas 300 toneladas em 2024, refletindo a concentração da extração em escala artesanal e a ausência de infraestrutura de processamento. O interesse estratégico de países ocidentais, especialmente do Japão, que financia estudos de viabilidade em parceria com a *Viet Nam Rare Earth JSC* (VTRE), pode acelerar o desenvolvimento, mas os entraves regulatórios e ambientais são expressivos. A VTRE enfrenta disputas judiciais que limitaram sua operação desde 2023 (IEA, 2025).

Nigéria e Tanzânia: A emergência africana em TR é um dos fenômenos mais monitorados pelos analistas do setor. A Nigéria possui depósitos de xenotima, mineral rico em elementos pesados como ítrio (Y), érbio (Er) e itérbio (Yb), com potencial ainda pouco explorado. A Tanzânia, por sua vez, abriga o projeto Ngualla, desenvolvido pela Peak Rare Earths, considerado um dos maiores depósitos de bastnäsite do mundo fora da China. O interesse de capital ocidental nessas regiões cresceu substancialmente após 2022, como parte da estratégia de diversificação geográfica de suprimento, e o Ex-Im Bank dos EUA já sinalizou disposição para financiar projetos de processamento de TR no continente africano (IEA, 2025).

Angola: A empresa britânica Pensana detém a mina de monazita e bastnäsite de Longonjo, em Angola, com meta declarada de produzir 2.400 t/ano de óxido de NdPr contido em seu concentrado. Em dezembro de 2025, a empresa recebeu US\$ 100 milhões de um investidor estratégico, viabilizando o avanço do projeto. Em outubro de 2025, contudo, a Pensana desistiu dos planos de construir uma refinaria de TR de £ 250 milhões no Reino Unido, redirecionando sua estratégia de beneficiamento para os EUA, em razão de incentivos financeiros mais favoráveis. O caso ilustra a competição crescente entre jurisdições para atrair o elo de processamento da cadeia de TR, dinâmica diretamente relevante para as decisões de política industrial do Brasil.

Groenlândia: A Groenlândia possui depósitos expressivos de TR, incluindo o Projeto Kvanefjeld, que além de TR contém urânio. A dimensão geopolítica tornou-se evidente com as declarações do presidente Trump em 2025 sobre interesse norte-americano na ilha e com a resposta da União Europeia, que incluiu a Groenlândia em seu portfólio de parcerias estratégicas para minerais críticos. As restrições locais à mineração de urânio, porém, complicam o desenvolvimento dos projetos de TR associados.

1.4 Potências consumidoras: a construção de cadeias alternativas de suprimento

1.4.1 União Europeia: da dependência estrutural ao ativismo regulatório

A União Europeia importava, em 2024, 98% dos ímãs de TR utilizados em sua indústria diretamente da China e dependia de fontes chinesas para mais de 85% dos óxidos separados de TR (Comissão Europeia, 2024; IEA, 2025). Essa dependência foi percebida como risco existencial para as metas climáticas

européias: sem ímãs de TR, não há motores de veículos elétricos (VEs) nem geradores de turbinas eólicas em escala. O *Critical Raw Materials Act* (CRMA), adotado em maio de 2024 (Regulamento UE 2024/1252), foi a resposta estrutural mais abrangente da UE a esse desafio (União Europeia, 2024).

O CRMA estabelece metas vinculantes de extração doméstica, processamento e reciclagem para 2030, e cria uma lista de matérias-primas críticas e estratégicas com licenciamento acelerado e financiamento dedicado via InvestEU e Horizon Europe. As implicações da regulação europeia para os requisitos de rastreabilidade ambiental e ESG ao longo da cadeia, bem como o paralelismo com o Inflation Reduction Act norte-americano, são discutidas em detalhe no Capítulo 4 (Sustentabilidade). Para os fins deste capítulo, importa registrar que o CRMA configura um sistema de mercado regulado em que o acesso ao consumo europeu deixa de ser função apenas de preço e passa a depender de qualificação institucional dos fornecedores.

No plano industrial, a UE apresenta dois focos de desenvolvimento concreto. O primeiro é a Estônia, que se tornou o polo mais avançado de manufatura de ímãs da Europa. A Neo Performance Materials opera a planta Silmet, em Sillamäe, uma refinaria de TR leves com capacidade de aproximadamente 3.000 t/ano em funcionamento desde os anos 1990. Em 2025, a empresa inaugurou em Narva a primeira planta europeia de ímãs NdFeB sinterizados, criando o único elo integrado refino-ímã do continente. A localização, a poucos quilômetros da fronteira russa, combina vantagem geográfica e acesso à infraestrutura logística báltica com uma vulnerabilidade que o conflito na Ucrânia tornou politicamente sensível.

O segundo foco europeu é a França, com o Projeto Caremag — joint venture franco-japonesa examinada em detalhe na Seção 1.5.3 como modelo de referência para a integração de capital industrial, garantia pública de demanda e contrato de longo prazo (offtake).

A estrutura desse arranjo, com capital e demanda assegurados por um parceiro asiático, implantação industrial em país europeu com forte base regulatória e tecnológica e uso de contratos de *offtake* como instrumento de bancabilidade, oferece um modelo que o Brasil poderia adaptar com parceiros ocidentais e asiáticos alinhados para viabilizar projetos de separação e refino de ETR em seu território. Ao combinar recursos minerais domésticos, *know-how* tecnológico internacional e contratos de longo prazo com grandes consumidores de ímãs e outros componentes estratégicos, seria possível reduzir o risco percebido pelos financiadores e acelerar a formação de uma cadeia nacional de valor em TR, em vez de permanecer apenas como exportador de concentrados minerais.

Nesse sentido, o acordo firmado em outubro de 2025 entre a Brazilian Rare Earths Limited (BRE) e a Carester é o primeiro exemplo concreto desse modelo aplicado a um depósito brasileiro: a BRE assinou um contrato de *offtake* de dez anos para fornecimento de concentrados de ETRPs do Projeto Monte Alto (Bahia) à planta Caremag, além de um acordo de serviços de engenharia pelo qual a Carester apoiará a concepção e construção de uma refinaria de TR da BRE no Complexo Petroquímico de Camaçari (GlobeNewsWire, 2025). Esse arranjo ilustra com precisão o papel que depósitos brasileiros de ETR podem desempenhar no ecossistema de separação ocidental: não como meros exportadores de concentrado bruto, mas como *feedstock* preferencial para as únicas plantas de separação de ETRPs em construção fora da China, tornando a viabilidade dessas plantas e a dos projetos brasileiros mutuamente dependentes (Carester, 2025; GlobeNewsWire, 2025).

O Projeto Caremag não é, contudo, uma iniciativa isolada, mas parte de uma reorientação mais ampla da política industrial europeia para minerais críticos, cujos instrumentos financeiros e diplomáticos estão sendo progressivamente direcionados ao Brasil.

Em 2025, a Comissão Europeia lançou a RESourceEU Initiative, com dotação de aproximadamente EUR 3 bilhões⁵, voltada a financiar projetos de TR ao longo de toda a cadeia de valor — da mineração ao processamento, manufatura e reciclagem de ímãs. Em dezembro de 2025, a Comissão lançou o *RESourceEU Action Plan*, que prevê a criação de um Centro Europeu de Matérias-Primas Críticas inspirado no modelo JOGMEC. A UE assinou *Strategic Partnerships for Critical Raw Materials* com 15 países produtores, entre os quais Argentina, Namíbia, Austrália e Canadá.

O Brasil não integra esse grupo ainda: o *RESourceEU Action Plan* identificou o Brasil como próxima negociação formal de parceria estratégica e a visita de Ursula von der Leyen ao Brasil em janeiro de 2026, com anúncio de cooperação em lítio, níquel e TR, posiciona o país de forma privilegiada nessa fila. Nessas parcerias, a UE oferece financiamento preferencial, acesso ao mercado europeu e apoio regulatório em troca de compromissos de fornecimento prioritário e conformidade com padrões de sustentabilidade e rastreabilidade (Comissão Europeia, 2025). Para o Brasil, a negociação com a UE é especialmente relevante, porque o mercado europeu de veículos elétricos, maior do mundo depois da China, será o destino natural para os ímãs produzidos com os ETRPs dos depósitos brasileiros de argilas de adsorção iônica.

1.4.2 Japão: da vulnerabilidade ao pioneirismo tecnológico

Em 2010, o Japão foi o país mais severamente afetado pela crise de cotas de exportação chinesas de TR. Dependente de TR para sua indústria de eletrônicos (Sony, Panasonic, Hitachi), de veículos híbridos (Toyota) e de ímãs de alto desempenho (TDK, Shin-Etsu, Proterial), o Japão viu seus custos de produção dispararem e algumas cadeias industriais ficarem temporariamente paralisadas. A reação foi imediata e sistêmica: o governo japonês mobilizou a Japan Organization for Metals and Energy Security (JOGMEC) para financiar exploração de TR na Austrália, Cazaquistão, Índia e América Latina; empresas japonesas firmaram contratos de *offtake* de longo prazo com Lynas Rare Earths (Austrália), MP Materials (EUA) e outros produtores fora da China; e o governo lançou programas massivos de PD&I para redução do conteúdo de TR por ímã (Shin-Etsu e TDK desenvolveram tecnologias de difusão por contorno de grão que reduzem o teor de Dy necessário em até 40%), bem como para substituição de TR em determinadas aplicações.

O Japão permanece o segundo maior produtor de ímãs NdFeB sinterizados do mundo (5% da produção global em 2024, contra 94% da China), com empresas como Shin-Etsu Chemical, TDK Corporation, Proterial (ex-Hitachi Metals), detendo as patentes e o *know-how* mais avançados fora da China (IEA, 2025). Essa posição é estrategicamente decisiva porque é o Japão e não a China, que possui a maior concentração de *expertise* em tecnologia de ímãs NdFeB de alto desempenho fora do bloco sino-cêntrico. Para o Brasil, o Japão é, portanto, o parceiro tecnológico mais relevante em potencial para o desenvolvimento de uma cadeia doméstica de ímãs.

⁵ 1 EUR = 1,16 USD em 3 de junho de 2026.

Em julho de 2025, o governo japonês anunciou o início de operações experimentais de mineração de TR em nódulos polimetálicos de grande profundidade nas águas ao redor da Ilha Minamitori, com previsão de início comercial em 2026 (Lowy Institute, 2025). Embora os volumes sejam ainda modestos, a iniciativa sinaliza o grau de comprometimento japonês com a diversificação de fontes.

O Projeto Caremag é também a iniciativa japonesa mais concreta de construção de capacidade de separação e refino de ETRPs fora da Ásia, demonstrando a disposição japonesa de investir capital e tecnologia em países parceiros que possam garantir suprimento de longo prazo.

O aporte japonês foi estruturado por meio de uma *joint venture* denominada Japan France Rare Earth Company, formada pelo JOGMEC e pela Iwatani Corporation, com contribuição do Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) de aproximadamente €100 milhões via JOGMEC. Em contrapartida, o Japão assegurou um contrato de fornecimento de longo prazo equivalente a 20% da produção futura da planta.

A participação japonesa no Projeto Caremag (via JOGMEC e Iwatani) consolida o vínculo Europa–Japão na construção de cadeias alternativas, conforme detalhado em 1.5.3.

1.4.3 Coreia do Sul: exposição industrial e resposta corporativa

A Coreia do Sul é o quinto maior consumidor mundial de TR, impulsionada pela concentração de sua indústria em setores intensivos nesses elementos: Samsung SDI e LG Energy Solution (baterias para VEs), Hyundai Motor e Kia (motores elétricos), Samsung Electronics e SK Hynix (eletrônica de precisão).

Em 2024, a dependência sul-coreana de TR processados da China era de aproximadamente 80% (IEA, 2025), vulnerabilidade amplamente reconhecida pelo governo como risco estratégico de primeira ordem. A resposta coreana tem sido predominantemente corporativa e articulada em três frentes complementares:

- i. a Korea Resources Corporation (KORES), empresa estatal criada em 1967 e incorporada à KOMIR em 2021, financiou exploração de TR no exterior por meio de investimentos diretos e *joint ventures*, entre os quais a aquisição de 10% no Projeto Zandkopsdrift, na África do Sul, com direitos de *offtake* sobre 10% da produção futura (Newswire, 2012). A empresa firmou acordos de cooperação com Austrália e Canadá (Proactive Investors, 2021; Government of British Columbia, 2023) e lançou em 2025 um Fundo de Estabilização de KRW 250 bilhões para minerais críticos (Motie, 2025), embora os resultados acumulados tenham ficado aquém do esperado, com perdas no exterior e dependência chinesa praticamente inalterada (Rare Earth Exchanges, 2026);
 - ii. o Star Group Industrial Co., Ltd. (SGI), único produtor sul-coreano de ímãs de TR, opera fábricas em Daegu e Yeongcheong, na Coreia do Sul, uma planta subsidiária em Shangqiu, China, e uma fábrica de US\$ 80 milhões no Vietnã com capacidade de 4.000 toneladas de ímãs NdFeB por ano, com início de operações em fevereiro de 2025 (JOC LLC, 2024) e negocia com a POSCO International uma fábrica conjunta nos EUA com capacidade inicial de 3.000 toneladas anuais, expansível a 5.000 toneladas, nos estados do Texas, Tennessee ou Arizona (Ked Global, 2023);
- e

- iii. empresas como a Hyundai Motor Company e a Kia Corporation firmaram contrato vinculante de *offtake* com a Arafura Rare Earths (Austrália) para suprimento de 600 t/ano de NdPr a partir de 2025, com volume pleno de 1.500 t/ano previsto para 2027, quando o Projeto Nolans atingir capacidade plena de produção de 4.440 t/ano (Arafura Rare Earths, 2022), US\$ 465 milhões do Banco de Exportação.

O interesse coreano nos projetos brasileiros de TR avança por via multilateral: a Coreia do Sul integrou a *Minerals Security Partnership* (MSP), sucedida em fevereiro de 2026 pelo Forum on Resource Geostategic Engagement (FORGE), que incluiu o Projeto Serra Verde em sua lista global de projetos estratégicos para a transição energética (U.S. Department of State, 2024). Paralelamente, a Viridis Mining mantém tratativas com bancos de desenvolvimento coreanos para o financiamento do Projeto Colossus, em Minas Gerais (MINING.COM, 2025). Essas articulações representam oportunidade concreta de parceria para o elo de manufatura de ímãs que o Brasil ainda precisa desenvolver.

1.5 Empresas e organismos multilaterais: os atores que moldam a arquitetura da cadeia

1.5.1 O mapa das principais empresas mineradoras e de refino

O Quadro 1.3 apresenta as principais empresas da cadeia de TR fora da China, com destaque para capacidade, etapa da cadeia e diferenciais estratégicos.

Quadro 1.3: Principais empresas de TR fora da China: perfil estratégico (2025–2026)

Empresa	País-base	Capacidade (t/ano TREO/sep.)	Elo da cadeia	Estratégia e diferenciais
China Rare Earth Group	China	> 150.000	Mina→metalurgia	SOE criada em 2021; controla 60% da produção e refino chineses; instrumento de política de Estado; sistema de rastreabilidade do Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação (MIIT, 2025).
Lynas Rare Earths	Austrália	~10.500	Mina→separação de óxidos	Maior produtor integrado fora da China; primeira produção comercial de disprósio (Dy) fora da China (maio 2025); apoio do Departamento de Defesa dos EUA (DoD), da planta LAMP (Malásia) e do complexo de Kalgoorlie (Austrália).
MP Materials	EUA	~45.000 (concentrado) ~5.000 (separação)	Mina→ ímãs	Minas Mountain Pass (Califórnia) e planta do Texas; parceria com o Departamento de Defesa dos EUA no valor de US\$ 400 milhões; preço mínimo garantido de US\$ 110/kg de óxido de neodímio-praseodímio (NdPr); planta de fabricação de ímãs em Fort Worth (Texas); contratos com a General Motors e outros fabricantes de equipamentos originais (OEMs).
Serra Verde Mineração	Brasil	1.000 Fase I	Mina→ concentrado misto de TR	Único depósito de argilas de adsorção iônica no hemisfério ocidental com os quatro ETR magnéticos críticos; Parceria de Segurança de Minerais (MSP, na sigla em inglês); carta de interesse preliminar de US\$ 465 milhões do Banco de Exportação e Importação dos EUA (Ex-Im Bank) — ver Seção 1.6.8, Prioridade 1, para a

Empresa	País-base	Capacidade (t/ano TREO/sep.)	Elo da cadeia	Estratégia e diferenciais
				distinção entre carta de interesse e contrato; expansão gradual de produção em curso desde janeiro de 2024.
Iluka Resources	Austrália	Em construção	Mina→ separação completa em óxidos de TR individuais	Primeira refinaria australiana de fluxo completo, da mina aos óxidos individuais (Eneabba, Austrália Ocidental); AUD 1,7 bilhão de apoio do governo australiano; entrada em operação prevista para 2026; suprimento a parceiros ocidentais.
Arafura Rare Earths	Austrália	Em desenvolvimento	Mina→ óxido de neodímio-praseodímio	Projeto Nolans (Território do Norte, Austrália); AUD 200 milhões do Fundo de Financiamento de Recursos Naturais (NRFC) e AUD 840 milhões em empréstimos; contratos de <i>offtake</i> com Hyundai e Siemens; US\$ 258 milhões do Departamento de Defesa dos EUA.
Meteoric Resources NL	Austrália/BR	Planta-piloto	Mina→ concentrado misto de TR	Projeto Caldeira (Minas Gerais, Brasil): maior recurso declarado de óxidos totais de terras raras (TREO) do Brasil, com 2.674 kt; US\$ 250 milhões do Ex-Im Bank dos EUA; depósito de argilas de adsorção iônica de caráter alcalino, rico em ETRPs.
Neo Performance Materials	Canadá/Estônia	~3.000	Refino→ímãs	Planta Silmet (Estônia, refino de TR) e planta de Narva (Estônia, fabricação de ímãs NdFeB, inaugurada em 2025); único elo integrado refino-ímã da Europa; fornecimento a fabricantes europeus de equipamentos originais (OEMs).
Energy Fuels Inc.	EUA	~1.000 (MREC)	Refino de elementos de terras raras leves (ETRLs)	Usina White Mesa Mill (Utah, EUA), única planta de separação de ETRLs em operação nos EUA; concentrado misto de terras raras (MREC) obtido de monazita; parceria com a Lynas para processamento de ETRPs; Tronox como fornecedor de monazita (mineral portador de TR); Tronox como fornecedor de monazita

Fontes: IEA (2025); CEBRI (2025); informações corporativas das empresas; CSIS (2025a; 2025b).

A análise do Quadro 1.3 revela quatro padrões estruturais relevantes para o posicionamento estratégico do Brasil.

Primeiro, todas as principais empresas fora da China estão localizadas em países do bloco ocidental (Austrália, EUA, Canadá, Estônia) ou no Brasil, sinalizando que a diversificação da cadeia está ocorrendo predominantemente dentro de uma arquitetura geopolítica específica.

Segundo, a maioria dessas empresas depende de capital ou garantias soberanas para sua viabilidade financeira, o que implica que o financiamento privado de mercado, sem suporte governamental, não é suficiente para desenvolver novas cadeias de TR.

Terceiro, a Serra Verde (Brasil) é a única operação do mundo a produzir os quatro ETR magnéticos críticos a partir de depósitos de argilas de adsorção iônica fora da Ásia, conferindo ao País uma vantagem competitiva geológica sem equivalente no hemisfério ocidental.

Quarto, a Meteoric Resources (Caldeira, MG) detém o maior recurso de óxidos totais de terras raras (TREO) declarado da lista e seu suporte do Ex-Im Bank sinaliza que o mercado americano percebe o ativo brasileiro como de primeira grandeza global.

1.5.2 Iniciativas multilaterais e mecanismos de governança

O Quadro 1.4 apresenta as principais iniciativas multilaterais e mecanismos de governança relevantes para a cadeia de TR, com descrição de objetivos e funcionamento.

Quadro 1.4: Principais iniciativas multilaterais e mecanismos de governança de terras raras (2024–2026)

Iniciativa / Organismo	Criação	Membros principais	Objetivos e mecanismos relativos a TR
Forum on Resource Geostrategic Engagement (FORGE)	2022 (MSP)	EUA, UE, Japão, Austrália, Canadá, RU, Coreia, França, Alemanha, Finlândia, Suécia, Itália, Índia	Aceleração de cadeias diversificadas via DFC/Ex-Im Bank; suporte ao Projeto Serra Verde (BR), projetos australianos e africanos. O Brasil participou de consultas em 2024, mas não integra formalmente o FORGE.
Critical Raw Materials Act — CRMA (UE)	2024	27 Estados-membros da UE	Metas 2030: 10% extração, 40% processamento, 25% reciclagem dentro da UE; lista de CRMs; Strategic Projects; parcerias com países produtores incluindo Brasil
Quad Critical Minerals Working Group	2021	EUA, Japão, Austrália, Índia	Coordenação de políticas de minerais críticos nas quatro democracias do Indo-Pacífico; compartilhamento de dados; mapeamento de oportunidades de investimento conjunto
US–Australia Critical Minerals Framework	Out. 2025	EUA, Austrália	US\$ 3 bi comprometidos + pipeline de US\$ 53 bi; transferência tecnológica em separação de ETRPs; modelo de referência para acordo análogo Brasil–EUA
IEA — Critical Minerals Initiative	2021	32 membros + 13 assoc. (incl. Brasil)	<i>Global Critical Minerals Outlook</i> (anual); projeções de demanda e oferta; Critical Minerals Data Explorer; recomendações de política pública
Projeto Caremag (FR–JP)	2024	França (Carester/Caremag SAS) + Japão (JOGMEC, Iwatani)	Refinaria de ETRPs em Lacq (França); EUR 110 mi japoneses + contrato de <i>offtake</i> garantido de 50% dos óxidos de Dy e Tb; modelo de referência para acordos bilaterais do Brasil
Comitê Interministerial — Brasil	2024	Brasil — 19 ministérios	19 projetos de minerais estratégicos aprovados (US\$ 12 bi); coordena Nova Indústria Brasil (NIB) - Missão 3, PTE, PLANTE e PlanGeo 2025–2034; base para o <i>Roadmap</i> Estratégico da Cadeia integrada de TR no Brasil: 2026–2040.

Fontes: IEA (2025); ASPI (2025); Comissão Europeia (2024); PIB Índia (2025); informações institucionais das organizações.

O conjunto de iniciativas descrito no Quadro 1.1 representa uma transformação qualitativa na governança global de TR: pela primeira vez desde a consolidação da hegemonia chinesa nos anos 2000, existe uma arquitetura multilateral funcional de diversificação de suprimento, com instrumentos financeiros,

contratos de *offtake*, transferência de tecnologia e mecanismos de licenciamento acelerado que tornam projetos fora da China economicamente viáveis sem depender exclusivamente de subsídios soberanos.

Para o Brasil, essa arquitetura cria um ambiente de oportunidades sem precedentes, mas também um calendário implícito: à medida que a Austrália, EUA e Índia consolidam suas posições, o espaço disponível para novos entrantes se reduz progressivamente.

1.5.3 O Projeto Caremag como modelo de referência

O Projeto Caremag merece análise específica por estruturar o modelo mais replicável para o Brasil. O acordo tem três elementos essenciais que transformam um projeto de alto risco tecnológico e longo *payback* em um investimento viável: capital e tecnologia fornecidos pelo parceiro estrangeiro (Japão — EUR 110 milhões), que detém o *know-how* em separação de ETRPs e assume o risco tecnológico da implantação; localização no país parceiro (França), que garante acesso à mão de obra qualificada, ao mercado europeu de ímãs de alto desempenho e a incentivos regulatórios do *Critical Raw Materials Act* (CRMA); e contrato de *offtake* garantido de 50% dos óxidos de Dy e Tb produzidos para o investidor japonês a preço mínimo acordado, tornando o modelo financeiramente viável e atrativo para ambas as partes (IEA, 2025).

Do ponto de vista do parceiro japonês, esse modelo resolve um problema crítico de segurança de suprimento: o Japão é o segundo maior fabricante de ímãs NdFeB do mundo — com 5% da produção global em 2024, contra 94% da China —, e depende de ETRPs separados para manter competitiva sua indústria de ímãs de alto desempenho (IEA, 2025). A Japan Australia Rare Earths B.V. atua como agente centralizado de compras para os três principais fabricantes japoneses de ímãs (Proterial, Shin-Etsu Chemical e TDK), empresas que detêm as patentes e o *know-how* mais avançados em tecnologia NdFeB fora do bloco sino-cêntrico (SMM, 2026; SFA OXFORD, 2025). Com o Dy e o Tb separados na planta de Lacq e garantidos por contrato de longo prazo até 2038, a indústria japonesa de ímãs ganha independência parcial em relação à China para esse insumo crítico — replicando, no segmento de ETRPs europeu, a mesma lógica de *floor price* e *offtake* soberano que o JOGMEC já opera com a Lynas para ETRLs na Austrália (METI, 2025; METAL TECH NEWS, 2026).

Do ponto de vista francês, o Projeto Caremag cria capacidade industrial de separação e refino de ETRPs no território europeu, cumprindo as metas do CRMA, com capital japonês e tecnologia compartilhada, sem ônus total para o erário francês. É um exemplo raro de acordo em que os dois lados têm incentivos fortes e alinhados para sua execução.

Aplicado ao Brasil, esse modelo implicaria: (i) parceiro aportando tecnologia de separação e refino de Dy e Tb, etapa crítica que o Brasil não domina e que nem a China nem o Ocidente vendem livremente no mercado aberto; (ii) localização da refinaria próxima às fontes de argilas de adsorção iônica; (iii) contrato de *offtake* garantido de 50% dos óxidos de ETR para o parceiro a preço mínimo acordado; e (iv) financiamento da parcela nacional do capital pelo BNDES, com apoio complementar da FINEP para as etapas de desenvolvimento tecnológico e escalonamento de processos.

Para que o modelo do Projeto Caremag funcione no Brasil, a condição prévia indispensável é a existência de uma contraparte operacional brasileira com mandato formal para celebrar e executar o acordo, papel

que a JOGMEC desempenha no arranjo franco-japonês. Em março de 2026, o governo federal sinalizou intenção de criar esse ente sob a forma de empresa estatal dedicada a minerais estratégicos, proposta que encontra resistências no Congresso e cautelas do mercado quanto ao risco de afastamento de investimentos privados (Poder360, 2026; Revista Fórum, 2026; InfoMoney, 2026). O debate sobre a forma jurídica, se empresa pública, subsidiária de empresa existente ou agência executiva, é legítimo e não deve ser subestimado. O que não é negociável é a função: enquanto não existir uma entidade com mandato legal, continuidade acima dos ciclos eleitorais e capacidade de comprometer o Estado em acordos de longo prazo, a negociação de qualquer acordo estruturante do tipo Caremag permanecerá no plano das intenções diplomáticas.

1.6 Brasil: da segunda maior reserva ao protagonismo estratégico emergente

Nota editorial: dois eventos materiais ocorridos após a finalização deste capítulo modificam o quadro aqui descrito: (i) a Mineração Serra Verde foi adquirida por empresa norte-americana em 20 de abril de 2026 (US\$ 2,8 bilhões), com contrato de offtake de 15 anos vinculando a produção da Fase 1 a compradores americanos; (ii) o Presidente da República vetou formalmente as duas propostas de criação da TerraBras em 24 de abril de 2026, fechando a rota legislativa específica da criação de uma empresa estatal. Os impactos estratégicos de ambos os eventos e as rotas institucionais alternativas são analisados no Capítulo 13.

1.6.1 A posição geológica única: o que as reservas escondem e o que revelam

O Brasil detém a segunda maior⁶ reserva mundial de TR, com 21 Mt estimados de óxidos de terras raras (REO, sigla em inglês), correspondendo a 25% do total global. O que verdadeiramente diferencia o Brasil de outros grandes detentores de reservas, como Índia, Rússia e Vietnã, contudo, não é o volume total de TR, mas o tipo geológico dos depósitos e o perfil de elementos que eles contêm.

Os principais depósitos brasileiros são de argilas de adsorção iônica, nos quais os TR não formam minerais próprios, mas estão ionicamente adsorvidos às partículas de argila resultantes do intemperismo de granitos e rochas alcalinas. Esse tipo de depósito é especialmente rico em ETRPs, notadamente disprósio (Dy), térbio (Tb), gadolínio (Gd) e ítrio (Y), os elementos mais caros, mais estratégicos e de suprimento mais restrito fora da China.

Os depósitos brasileiros de argilas de adsorção iônica têm perfil geológico idêntico ao de Mianmar — o que ficou evidente durante a crise de novembro de 2024 (detalhada na Seção 1.2.2), quando a China buscou o Brasil como fornecedor alternativo.

⁶ Os 21 Mt correspondem à estimativa do USGS (2026). A Agência Nacional de Mineração (ANM) trabalha com estimativa revisada que resulta em participação de 23–25% das reservas globais conhecidas; a divergência metodológica entre as duas fontes é discutida no Capítulo 2.

1.6.2 O portfólio de projetos: escala, maturidade e concentração

O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), em parceria com o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), realizou o levantamento mais completo disponível do portfólio de projetos de TR no Brasil. O total de óxidos totais de TR (sigla em inglês, TREO) contido nos recursos declarados pelos projetos com informações suficientes é de 6,3 Mt, volume que posiciona o Brasil entre as maiores dotações de TREO contido do mundo.

Os projetos principais são: Pela Ema/Serra Verde (Minaçu, GO: 1.093 kt TREO, em produção desde janeiro de 2024), Caldeira/Meteorite (Poços de Caldas, MG: 2.674 kt TREO, planta-piloto 2025), Colossus/Viridis (MG: 521 kt TREO), Ema/Brazilian Critical Minerals (675 kt TREO), Rocha da Rocha/Brazilian Rare Earths (772 kt TREO) e Carina/Aclara (433 kt TREO). Todos são do tipo IAC, com exceção de Araxá (complexo alcalino, coproduto do nióbio operado pela CBMM) e Catalão (carbonatito, coproduto do fosfato pela CMOC).

A concentração dos projetos em estágios iniciais constitui o principal gargalo de curto prazo. Dos 6,3 Mt de TREO identificados, apenas a mineradora Serra Verde está em produção comercial. Em 2025, a empresa chegou a exportar cerca de 500 toneladas de concentrado para a China, mas as entregas foram subsequentemente interrompidas. A empresa opera sem qualquer etapa de separação química doméstica. A taxa de recuperação efetiva de TR do minério é estimada entre 50% e 80%, dependendo do processo utilizado (McNulty et al., 2022) e os dados sobre a distribuição de elementos individuais em cada depósito, especificamente as proporções de disprósio, térbio e neodímio, permanecem insuficientes na base pública de dados disponível. Essa lacuna de informação compromete diretamente a capacidade de negociação de acordos de *offtake* com a especificidade técnica que parceiros internacionais exigem.

Nota editorial: dois eventos materiais ocorridos após a finalização deste capítulo modificam o quadro aqui descrito: (i) a Mineração Serra Verde foi adquirida por empresa norte-americana em 20 de abril de 2026 (US\$ 2,8 bilhões), com contrato de offtake de 15 anos vinculando a produção da Fase 1 a compradores americanos; (ii) o Presidente da República vetou formalmente as duas propostas de criação da TerraBras em 24 de abril de 2026, fechando a rota legislativa específica da criação de uma empresa estatal. Os impactos estratégicos de ambos os eventos e as rotas institucionais alternativas são analisados no Capítulo 13.

1.6.3 O marco regulatório em transição

O arcabouço regulatório do setor mineral brasileiro é estruturado pelo Código de Mineração (Decreto-Lei 227/1967, regulamentado pelo Decreto 9.406/2018) e pela Agência Nacional de Mineração (ANM, criada pela Lei 13.575/2017). Esse código, concebido para um contexto de mineração de *commodities* de baixo valor específico, é estruturalmente inadequado para atrair capital de longo prazo em projetos de separação química e manufatura de alto risco tecnológico. Três problemas são especialmente graves:

- i. o processo de licenciamento, que demanda em média 17,2 anos entre descoberta e produção no Brasil (S&P Global, 2025), contra 15,5 anos como média global e 14,0 anos na Austrália;
- ii. a ausência de mecanismos de reinvestimento produtivo da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM); e

- iii. a inexistência de tratamento diferenciado para minerais estratégicos que justifique o risco de capital elevado.

Tramitam no Congresso Nacional dois projetos de reforma com lógicas distintas:

- i. o PL 2780/2024, de orientação pró-setor privado, que busca desburocratizar o licenciamento, mas corre o risco de perpetuar o modelo exportador de concentrado bruto; e
- ii. o PL 4.443/2025, aprovado pela Comissão de Assuntos Econômicos do Senado em dezembro de 2025, que exige 80% de beneficiamento doméstico como condição para a concessão de lavra de minerais estratégicos.

A aprovação de um marco legal específico para TR, que inclua licenciamento integrado com prazo máximo de três anos, metas progressivas de beneficiamento, a criação do Conselho Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (CNMCE) e do Fundo Soberano de Minerais Críticos (FSMC) por lei, e mecanismos de preço mínimo soberano nos acordos bilaterais, é considerada no Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de Terras Raras no Brasil: 2026–2040, como a prioridade institucional mais urgente do período 2026–2028.

No campo tributário, a CFEM, equivalente brasileiro dos *royalties* minerais, regulada pela Lei 13.540/2017 e administrada pela ANM, incide à alíquota de 2% sobre a receita bruta de venda de TR. Sua distribuição atual de 60% aos municípios onde ocorre a produção, 15% aos estados produtores; 15 % aos municípios afetados indiretamente (sem produção) e 10% à União não prevê nenhuma destinação específica para o desenvolvimento da cadeia produtiva mineral. Ao contrário do modelo australiano, onde *royalties* são contratualmente vinculados a reinvestimento em tecnologia e inovação local e do modelo canadense, onde incentivos fiscais regionais compensam parte do ônus pago pelas mineradoras, a CFEM brasileira funciona majoritariamente como fonte de receita corrente para custeio público. Do percentual destinado à União, destaca-se a previsão legal de 1% para o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT) e 1,8% para o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), ambos para fins de pesquisa, desenvolvimento tecnológico e inovação para o setor mineral.

A título de ilustração, uma empresa que extrai TR em Goiás paga CFEM ao município de Minaçu, mas esse recurso não tem nenhuma obrigação de retornar ao desenvolvimento de capacidade de separação de TR⁷. Países como Austrália e Canadá usam seus *royalties* como alavanca de política industrial, mas o Brasil os trata como tributo de custeio. Essa distinção, aparentemente técnica, tem consequências estratégicas de primeira ordem, pois é ela que explica, em parte, porque a Austrália tem hoje uma refinaria industrial de ETRPs em operação e o Brasil não tem nenhuma.

1.6.4 Instrumentos de política industrial existentes

O Brasil possui, em 2026, um conjunto de instrumentos de política industrial já criados que, se articulados com a estratégia de TR, podem acelerar substancialmente o desenvolvimento da cadeia.

⁷ O do município deve ser aplicado em diversificação econômica e melhorias estruturais. Os 2,8% da União (1,0+1,8) devem ser aplicados para desenvolver as cadeias produtivas, mas parte é contingenciado.

A Nova Indústria Brasil (NIB), lançada em 2024, propõe em sua Missão 3 "Incentivar a agregação de valor sobre recursos minerais no país", enunciado que descreve exatamente o objetivo central do Mapa do Caminho Estratégico apresentado no Capítulo 3. O Plano de Transformação Ecológica (PTE) integra financiamento sustentável, adensamento tecnológico e bioeconomia, todas as dimensões da cadeia de TR sustentável. O Plano Nacional de Transição Energética (PLANTE) estimula a criação de demanda doméstica de TR para veículos elétricos e turbinas eólicas, o que pode ancorar acordos de *offtake* locais com produtores nacionais.

O Plano Decenal de Mapeamento Geológico Básico (PlanGeo 2025–2034) prioriza as escalas de referência 1:250.000 e 1:100.000 para o mapeamento sistemático, entendendo-se que a primeira é fundamental nas áreas de menor conhecimento geológico e que a segunda constitui a escala mínima para avaliação de potencial mineral e para subsidiar estudos de favorabilidade. A ampliação da cobertura geológica do país é condição necessária para atrair investimentos em prospecção e pesquisa mineral em TR, uma vez que os levantamentos geológicos, geofísicos e geoquímicos formam uma tríade indispensável para reduzir o risco exploratório e orientar a descoberta de novos depósitos (SGB, 2025).

Nesse contexto, o mapeamento geológico da Amazônia representa a lacuna mais crítica: com apenas 8% do território coberto na escala 1:100.000, a região permanece geologicamente subconhecida, precisamente onde se concentram alguns dos maiores potenciais minerais não explorados do Brasil. As ocorrências de Seis Lagos (AM), com um dos maiores recursos conhecidos de nióbio do mundo e indícios de ETR associados, Pitinga (AM), com depósitos de cassiterita, nióbio, tântalo e terras raras em granitos especializados e Presidente Figueiredo (AM), com potencial em argilas de adsorção iônica ainda pouco caracterizado, ilustram a magnitude do que permanece por descobrir. Acelerar o PlanGeo na Amazônia é, portanto, não apenas uma decisão de política científica, mas uma prioridade estratégica da cadeia de TR.

O Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos (CTAPME), criado pelo Decreto nº 10.657/2021 e coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, constitui o principal instrumento de coordenação institucional para projetos de minerais estratégicos no Brasil. O Comitê já habilitou doze projetos de mineração, com estimativa de R\$ 40 bilhões em investimentos e geração de 20 mil empregos na implantação e mais de 15 mil durante as operações (Brasil, 2021). Essa capacidade de coordenação intergovernamental deve ser expandida e formalizada como ação central do Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de TR no Brasil: 2026-2040.

No plano do financiamento, o BNDES e a FINEP aprovaram 56 planos de negócios em chamada pública para projetos de transformação de minerais estratégicos para a transição energética, com valor total demandado de R\$ 45,8 bilhões, entre os quais se destacam dez projetos voltados especificamente para terras raras (BNDES, 2025). Adicionalmente, o MME publicou portaria regulamentando a Política de Debêntures a Projetos de Transformação de Minerais Estratégicos para a Transição Energética, com investimento total estimado de R\$ 5,2 bilhões por ano, sendo R\$ 3,7 bilhões em transformação mineral e R\$ 1,5 bilhão em lavra e beneficiamento (Brasil/MME, 2025).

O conjunto desses instrumentos cria, pela primeira vez na história brasileira, um ambiente de política pública genuinamente favorável ao desenvolvimento da cadeia integrada de TR. A fragmentação entre programas e a ausência de um órgão coordenador específico, contudo, ainda reduzem a eficácia do conjunto.

1.6.5 O interesse multilateral no Brasil

O interesse multilateral no potencial de TR do Brasil nunca foi tão concreto e financeiramente expressivo quanto no biênio 2025–2026.

O cenário global denominado "Batalha pelos Elementos" (em que se combinam fragmentação geopolítica em blocos e aceleração da transição energética) é precisamente aquele em que esse interesse se intensifica: em um mundo de fragmentação geopolítica e demanda acelerada, as reservas de argilas de adsorção iônica brasileiras tornam-se o ativo mais disputado da cadeia de TR fora da China.

O suporte do Ex-Im Bank dos EUA, com carta de interesse preliminar de US\$ 250 milhões para o Projeto Caldeira (Meteoric Resources) e de US\$ 465 milhões para a mineradora Serra Verde (IEA, 2025; Brasil Mineral, 2025), sinaliza que o governo norte-americano identificou o Brasil como parceiro estratégico prioritário na cadeia de ETRPs, não apenas como fornecedor de concentrado genérico. A inclusão do Projeto Serra Verde na *Minerals Security Partnership* (MSP), liderada pelos EUA, confirma esse posicionamento. Japão, Coreia do Sul e a própria China têm demonstrado interesse crescente em projetos brasileiros, conferindo ao País a posição rara de poder negociar com múltiplos compradores soberanos simultaneamente.

Essa situação de demanda múltipla é o ativo diplomático de maior valor que o Brasil possui na atual conjuntura. No cenário global de referência (C1 – “Batalha pelos Elementos”), a neutralidade relativa do Brasil como fornecedor que não está irrevogavelmente alinhado a nenhum bloco geopolítico é precisamente o que maximiza o poder de negociação neste cenário.

Esse cenário, porém, impõe uma advertência central: nele, a janela de neutralidade se estreita rapidamente à medida que os blocos se consolidam. Isso não invalida a estratégia de neutralidade ativa. Ao contrário, torna-a mais urgente: o Brasil precisa, antes que os blocos se fechem, firmar contratos de *offtake* e transferência de tecnologia com múltiplos parceiros, de modo que sua posição de fornecedor plural esteja contratualizada e não apenas declarada. A capacidade de separação doméstica é, nesse contexto, não apenas um ativo industrial, mas o fundamento material da própria neutralidade.

1.6.6 Gargalos estruturais: o que separa o potencial da realidade

Os estudos do CEBRI (2025) e da S&P Global Market Intelligence (2025) quantificam os principais gargalos estruturais que separam o Brasil de sua posição potencial. O gargalo mais crítico é o tempo de licenciamento. São 17,2 anos entre descoberta e produção mineral no Brasil, contra 15,5 anos como média global e 14,0 anos na Austrália. Projetos que não iniciaram o processo de licenciamento em 2025–2026 não estarão em produção de separação antes de 2033–2035, muito além da janela estratégica mais favorável que a crise de Mianmar e os controles de exportação chineses criaram.

O segundo gargalo é o investimento em exploração geológica. O Brasil aplica menos de 1% de seus recursos minerais em exploração geológica, contra 5–8% na Austrália e no Canadá. O terceiro é a cobertura cartográfica. Apenas 27% do território nacional está mapeado em escala 1:100.000, que é a mínima necessária para investimento mineral, com a Amazônia em apenas 8% (MME, 2022). O quarto é a ausência total de capacidade de refino doméstico. O Brasil não tem plantas industriais de separação química de TR

e exporta 100% de sua produção como concentrado bruto. Esse gargalo é tratado em profundidade no Capítulo 11.

O quinto, menos visível, mas igualmente grave, é a insuficiência de dados sobre a distribuição de elementos individuais nos depósitos. Sem saber exatamente quanto de Dy e Tb está em cada depósito, é impossível negociar acordos de *offtake* com especificidade técnica ou dimensionar plantas de separação adequadamente (CEBRI, 2025).

Quadro 1.5: Principais riscos sistêmicos da cadeia brasileira de terras raras.

Risco	Natureza	Impacto potencial
Domínio limitado de extração por solvente (SX) em escala industrial	Tecnológico	Inviabilização econômica de plantas domésticas de separação; manutenção da exportação de concentrados ou óxidos mistos. Ver discussão técnica no Capítulo 11.
Concentração da capacidade global de refino na China	Geopolítico-comercial	Exposição a controles de exportação, oscilações de preço e restrições à transferência de tecnologia (ver §1.2.1 e §1.2.3).
Marco regulatório fragmentado para minerais críticos e estratégicos	Regulatório-institucional	Insegurança jurídica e atraso de licenciamento; elevação do custo de capital em projetos de ciclo longo (ver §1.6.3).
Dependência de insumos químicos importados (extratantes, ácidos, reagentes)	Industrial-logístico	Vulnerabilidade da operação contínua de plantas de SX; exposição à política comercial de fornecedores externos.
Capacidade analítica nacional limitada para caracterização elementar e radiométrica	Tecnocientífico	Incerteza na valoração de depósitos prioritários; risco de subestimar passivos de tório e urânio (ver §1.6.1 e Capítulo 4).
Custo energético-químico elevado e disponibilidade hídrica desigual	Ambiental-econômico	Pressão sobre o OPEX; restrição à localização de plantas em regiões com infraestrutura adequada.
Ausência de entidade operacional de Estado com mandato executivo para a cadeia	Governança	Coordenação fragmentada entre política mineral, industrial, ambiental e diplomática; perda de janelas de <i>offtake</i> e contratos bilaterais (ver §1.6.4 e §1.6.8).

1.6.7 A crise de Mianmar como espelho

A crise de Mianmar de novembro de 2024, narrada na Seção 1.2.1, oferece o contraste mais instrutivo para a posição brasileira. Maior fornecedor mundial de terras raras pesadas⁸ até a interrupção, Mianmar exportava o minério bruto para refino na China e jamais buscou agregar valor em território próprio. Quando a tomada da região mineradora paralisou a extração, o país nada reteve da cadeia além da renda da exportação primária. É essa trajetória que funciona como espelho: dois países com a mesma geologia singular, diante de escolhas estratégicas diametralmente opostas.

A diferença crítica entre Mianmar e o Brasil não é a geologia, mas sim a escolha estratégica, pois Mianmar nunca quis ser mais do que um extrator de concentrado bruto. Já o Brasil tem a oportunidade, os instrumentos institucionais e o interesse multilateral necessários para ser muito mais.

O que está em questão nos próximos três anos é exatamente essa escolha: o Brasil será o Mianmar da América do Sul, exportador de concentrado de ETRPs para o processamento externo ou construirá, com capital multilateral e transferência tecnológica, a primeira cadeia integrada de ETRPs do Hemisfério Sul? A janela para fazer essa escolha existe, é real e tem prazo e o Cenário de Referência "Batalha pelos Elementos" é aquele em que ela se fecha mais rapidamente.

1.6.8 Por que agir agora?

As terras raras deixaram de ser apenas uma categoria de minerais estratégicos para se tornarem um dos principais vetores de poder econômico, tecnológico e geopolítico do século XXI. A crescente digitalização da economia, a transição energética, a expansão da mobilidade elétrica, o fortalecimento das cadeias de defesa e o avanço das tecnologias de inteligência artificial elevaram esses elementos à condição de insumos críticos para a competitividade e a segurança nacional.

O Brasil encontra-se diante de uma oportunidade histórica. O país possui algumas das maiores reservas e ocorrências conhecidas de terras raras do mundo, ampla experiência mineral, uma matriz energética predominantemente renovável, capacidade científica instalada e crescente interesse internacional em diversificar cadeias de suprimento atualmente concentradas em poucos países. Entretanto, transformar esse potencial geológico em liderança industrial e tecnológica exige ação coordenada e tempestiva.

A disputa tecnológica entre Estados Unidos e China reposicionou as terras raras no centro das estratégias de segurança econômica e industrial das grandes potências. O controle sobre minerais críticos e materiais avançados passou a ser tratado como tema de soberania nacional, influenciando políticas industriais, acordos comerciais, investimentos estratégicos e alianças internacionais.

Nesse contexto, as terras raras deixaram de ser apenas *commodities* minerais para se tornarem ativos geopolíticos. O domínio das etapas de separação, refino, metalurgia e fabricação de ímãs passou a representar uma vantagem estratégica comparável ao controle de recursos energéticos em períodos anteriores da história econômica mundial.

⁸ Disprósio e térbio extraídos, sem regulamentação governamental, de depósitos de argilas de adsorção iônica similares aos que o Brasil possui.

Embora diversos países possuam reservas significativas, a China consolidou, ao longo de décadas, uma posição dominante nos segmentos de maior valor agregado da cadeia produtiva. O país concentra parcela expressiva da capacidade global de separação química, refino, produção de metais, ligas e ímãs permanentes de terras raras.

Nos últimos anos, a adoção de mecanismos de controle de exportação, restrições regulatórias e políticas voltadas à proteção de tecnologias estratégicas reforçou a percepção de vulnerabilidade por parte de governos e empresas em todo o mundo. Como resposta, Estados Unidos, União Europeia, Japão, Austrália, Coreia do Sul e outros parceiros passaram a investir fortemente na diversificação das cadeias de suprimento e na construção de capacidades produtivas alternativas.

Essa reconfiguração abre espaço para novos atores globais. Poucos países reúnem condições tão favoráveis quanto o Brasil para ocupar parte desse espaço.

O Crescimento da Demanda por Magnetos

A principal força motriz da demanda por terras raras é a expansão dos ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (NdFeB), considerados essenciais para tecnologias de alto desempenho.

Esses ímãs estão presentes em veículos elétricos, turbinas eólicas, robótica avançada, sistemas industriais automatizados, equipamentos médicos, eletrônicos de consumo, drones, sistemas aeroespaciais e aplicações militares. O crescimento simultâneo desses setores deverá impulsionar significativamente a demanda por elementos como neodímio, praseodímio, disprosio e térbio nas próximas décadas.

Mais importante do que o crescimento da mineração será o crescimento das etapas industriais associadas aos magnetos, onde se concentra a maior parcela do valor agregado e da captura de riqueza ao longo da cadeia.

Terras Raras e a Transição Energética

A descarbonização da economia global depende diretamente de tecnologias intensivas em terras raras. Turbinas eólicas de alta eficiência, veículos elétricos, sistemas de armazenamento de energia e redes inteligentes utilizam materiais derivados dessas cadeias produtivas.

Assim, as terras raras tornaram-se um componente fundamental da agenda climática internacional. O avanço da transição energética tende a elevar simultaneamente a demanda, a relevância estratégica e o valor econômico desses materiais.

Países capazes de participar não apenas da mineração, mas também das etapas industriais subsequentes, estarão mais bem posicionados para capturar os benefícios econômicos da nova economia de baixo carbono.

Os Riscos da Dependência Tecnológica

A experiência recente demonstrou que possuir reservas minerais não é suficiente para garantir autonomia estratégica. O verdadeiro poder econômico reside no domínio das etapas de processamento, transformação industrial, desenvolvimento tecnológico e inovação.

Sem capacidades nacionais de separação, refino, metalurgia e fabricação de produtos de maior valor agregado, países ricos em recursos naturais permanecem vulneráveis a interrupções de suprimento, volatilidade de preços e dependência tecnológica externa.

Para o Brasil, o desafio não é apenas produzir mais minerais, mas construir uma cadeia produtiva integrada capaz de transformar recursos geológicos em desenvolvimento industrial, inovação tecnológica, geração de empregos qualificados e inserção competitiva nos mercados globais.

A reorganização das cadeias globais de suprimento, o aumento da demanda por magnetos, a busca internacional por fornecedores confiáveis e a crescente importância dos minerais críticos criaram uma janela de oportunidade singular para o Brasil.

Entretanto, essa oportunidade possui horizonte limitado. Outros países avançam rapidamente na construção de capacidades industriais, atração de investimentos e consolidação de ecossistemas tecnológicos.

As decisões tomadas ao longo dos próximos anos determinarão se o Brasil permanecerá como fornecedor de matérias-primas ou se assumirá posição de destaque nas cadeias globais de valor associadas às terras raras.

1.6.9 Prioridades nacionais e agenda de ação

A análise dos atores globais permitiu identificar, por contraste e convergência, as prioridades nacionais mais urgentes para o Brasil na cadeia integrada de TR no horizonte de tempo deste estudo. Não se trata de uma lista exaustiva de ações, pois essa é precisamente a função dos capítulos subsequentes do Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de Terras Raras no Brasil: 2026–2040, organizados em três camadas complementares. A primeira é o *roadmap* estratégico consolidado da cadeia produtiva como um todo, com a visão de futuro e os objetivos estratégicos para 2040 (Capítulo 3). A segunda compreende os *roadmaps* dos elos estruturantes da cadeia integrada: mineração e concentração (Capítulo 10), refino e separação de óxidos (Capítulo 11). A terceira compreende os *roadmaps* das cadeias de aplicações priorizadas: ímãs permanentes de NdFeB (Capítulo 5), catalisadores à base de TR (Capítulo 6), ligas metálicas portadoras de TR (Capítulo 7), fósforos à base de TR (Capítulo 8) e materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR (Capítulo 9). O que se apresenta aqui é, antes, um mapa das decisões estruturantes de natureza regulatória, diplomática, tecnológica e financeira que condicionam todas essas cadeias simultaneamente. Sem as oito prioridades discutidas a seguir, nenhum dos *roadmaps* dos capítulos subsequentes terá as condições institucionais mínimas para ser executado.

Nota editorial: dois eventos materiais ocorridos após a finalização deste capítulo modificam o quadro aqui descrito: (i) a Mineração Serra Verde foi adquirida por empresa norte-americana em 20 de abril de 2026 (US\$ 2,8 bilhões), com contrato de offtake de 15 anos vinculando a produção da Fase 1 a compradores americanos; (ii) o Presidente da República vetou formalmente as duas propostas de criação da TerraBras em 24 de abril de 2026, fechando a rota legislativa específica da criação de uma empresa estatal. Os impactos estratégicos de ambos os eventos e as rotas institucionais alternativas são analisados no Capítulo 13.

Prioridade 1 — Construção gradual do arcabouço regulatório: instrumentos executivos em 2026, marco consolidado em 2027–2028

Em razão do calendário eleitoral de outubro de 2026, a estratégia regulatória deve ser faseada. No curto prazo, priorizam-se medidas executivas e legislativas de menor custo político, como o decreto de criação do Conselho Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (CNMCE) e do Fundo Soberano de Minerais Críticos (FSMC); aprovação do Projeto de Lei 4.443/2025 na Câmara dos Deputados, que exige 80% de beneficiamento doméstico⁹ como condição para a concessão de lavra de minerais estratégicos e tem apelo político amplo por seu viés nacionalista de agregação de valor; e ampliação das linhas de financiamento do BNDES e da FINEP para minerais críticos, incluindo TR.

O marco regulatório consolidado, com licenciamento integrado de prazo máximo, metas progressivas e vinculantes de beneficiamento doméstico e proteção ao investimento de longo prazo, deve ser a prioridade legislativa central do primeiro ano do governo eleito em outubro de 2026.

Essa abordagem faseada encontra respaldo direto na experiência comparada: nem os EUA, nem a Austrália construíram sua cadeia de TR em um único ciclo político. O *Inflation Reduction Act* norte-americano levou três anos de negociação e o arcabouço australiano foi consolidado ao longo de quatro governos diferentes. O que diferenciou esses países do Brasil não foi a velocidade de uma única lei, mas a continuidade do compromisso institucional ao longo de múltiplos ciclos eleitorais, que é precisamente o que o CNMCE com mandatos fixos e o FSMC como instrumento de Estado deverão ser concebidos para garantir.

A urgência, porém, não desaparece com a abordagem faseada. Como discutido na Seção 1.3.3, os US\$ 250 milhões do Ex-Im Bank. Para o Projeto Caldeira e os US\$ 465 milhões para o Projeto Serra Verde são cartas de interesse preliminar, não contratos. A conversão em comprometimento definitivo de capital exige contratos de *offtake* assinados com compradores soberanos e marco legal que ofereça previsibilidade jurídica de 15 a 20 anos, com prazos de licenciamento garantidos, metas de beneficiamento em lei e proteção contratual aos investidores. Boa vontade diplomática não substitui segurança jurídica na decisão de investimento de bancos de desenvolvimento.

Prioridade 2 — Caracterização analítica elementar dos depósitos prioritários (2026–2028)

Este deve ser um programa emergencial coordenado pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) e pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) para determinar a distribuição de neodímio (Nd), praseodímio (Pr), disprósio (Dy) e térbio (Tb) nos Projetos Serra Verde, Caldeira e Colossus, que apresentam a maior probabilidade de entrada em operação antes de 2035. Sem esses dados, torna-se inviável negociar acordos de *offtake* com especificidade técnica ou dimensionar adequadamente uma planta de separação e refino.

⁹ O termo beneficiamento designa as operações que transformam o minério bruto em produtos de maior valor agregado, compreendendo etapas sucessivas: (i) concentração — separação física do mineral portador de TR da ganga estéril, resultando em concentrado com teor elevado de óxidos totais de TR (TREO); (ii) separação — isolamento dos elementos individuais por extração por solvente, etapa de maior complexidade tecnológica; e (iii) refino — conversão dos óxidos separados em metais ou ligas de alta pureza. A concentração é apenas a primeira etapa do beneficiamento. O PL 4.443/2025, ao exigir 80% de beneficiamento doméstico, aponta para etapas que incluem, no mínimo, a separação de elementos individuais.

Prioridade 3 — Acordo bilateral de processamento com contratos de *offtake* soberanos (2027–2028)

Replicar a estrutura do Projeto Caremag (descrita em detalhe na Seção 1.5.3) para o Brasil é a decisão estratégica de maior impacto na cadeia de TR. A tradução do modelo francês para o contexto brasileiro implicaria quatro elementos essenciais: (i) o parceiro estrangeiro aportaria tecnologia de separação de elementos de terras raras — tanto leves (ETRLs) quanto pesados (ETRPs) —, etapa crítica que o Brasil não domina e que nem a China nem o Ocidente transferem livremente no mercado aberto, além de capital para implantação da refinaria; (ii) a unidade seria localizada próxima às fontes de argilas de adsorção iônica (Serra Verde e Caldeira); (iii) o contrato de *offtake* garantiria ao parceiro, a preço mínimo acordado, acesso prioritário aos óxidos de maior valor estratégico, em especial disprósio (Dy) e térbio (Tb); e (iv) o financiamento complementar da parcela nacional do capital seria provido pelo BNDES, com apoio da FINEP para as etapas de desenvolvimento tecnológico e escalonamento de processos.

O contrato de *offtake* é o elemento estruturante dessa parceria, não o acessório. Sem o compromisso de compra de longo prazo do parceiro estrangeiro, não há como financiar a refinaria, pois o risco tecnológico é alto, o retorno do investimento ocorre em 12 a 15 anos e nenhum banco comercial financia esse perfil sem garantia de receita contratada. Esse mecanismo funciona porque alinha os interesses das duas partes, ou seja, o parceiro estrangeiro obtém segurança de suprimento de ETRPs por 15 a 20 anos, independentemente das flutuações de mercado e das restrições de exportação chinesas; o Brasil obtém tecnologia de separação que não adquiriria no mercado aberto, pois a China a protege por patentes e restrições de exportação, incluindo a proibição de exportação de tecnologia de fabricação de ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB) vigente desde dezembro de 2023, enquanto o Ocidente só a transfere mediante acordo estruturado com contrapartidas de fornecimento.

A definição do preço mínimo garantido no contrato de *offtake* é a negociação mais delicada: deve ser suficientemente alto para assegurar a rentabilidade do projeto brasileiro mesmo em contexto de deflação estratégica chinesa e suficientemente baixo para que o parceiro estrangeiro pague menos do que pagaria no mercado à vista em condições normais.

O modelo adotado pelo Departamento de Defesa dos EUA com a MP Materials, descrito em detalhe na Seção 1.3.3, demonstra que governos de países compradores estão dispostos a pagar um prêmio de segurança de suprimento que o mercado privado não pagaria. O Brasil deve negociar mecanismo análogo para disprósio e térbio, os elementos de maior valor e de suprimento mais restrito e buscar que o Fundo Soberano de Minerais Críticos (FSMC) complemente o preço mínimo garantido nos momentos em que o preço de mercado cair abaixo do patamar negociado, funcionando como fundo anticíclico de garantia.

A criação do FSMC está sendo proposta no Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de TR, mas irá depender de lei específica, assim como ocorreu com o Fundo Soberano do Pré-Sal (FSB), criado pela Lei nº 12.276/2010.

Prioridade 4 — Preço mínimo soberano em todos os contratos de *offtake* (a partir de 2026)

O mecanismo MP Materials/US DoD descrito acima na Prioridade 3 é o instrumento que torna projetos de TR rentáveis mesmo em contextos de deflação estratégica chinesa. O Brasil deve negociar mecanismos análogos em todos os seus acordos bilaterais, e o Fundo Soberano de Minerais Críticos pode ser o

instrumento complementar para situações em que o parceiro estrangeiro não aceite o preço mínimo diretamente.

Prioridade 5 — Reforma da destinação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM)

Como diagnosticado na Seção 1.6.3, a CFEM incide a 2% sobre a receita bruta de venda de TR, mas não tem nenhuma destinação vinculada ao desenvolvimento da cadeia produtiva. A proposta no Mapa do Caminho Estratégico será reformar não a alíquota, que é competitiva em comparação internacional, mas redefinir a lógica de destinação de parte do que já é arrecadado. Especificamente, destinar parte da parcela federal da CFEM sobre minerais estratégicos (TR, lítio, nióbio, cobalto, grafita, níquel) para capitalização do Fundo Soberano de Minerais Críticos (FSMC), que assumiria função de instrumento de política industrial, análogo ao *Critical Minerals Facility* australiano (AUD 4 bilhões) ou ao *National Reconstruction Fund* (AUD 15 bilhões).

Esse mecanismo apresenta três vantagens sobre a alternativa de capitalizar o FSMC inteiramente com recursos do Tesouro Nacional. Primeiro, cria uma fonte de receita dedicada e previsível, menos suscetível aos cortes do processo orçamentário anual. Segundo, vincula o crescimento do Fundo ao próprio crescimento da produção mineral: quanto mais TR o Brasil exportar, mais recursos o FSMC terá para financiar a separação doméstica que gradualmente substituirá a exportação de concentrado bruto. Terceiro, não exige elevação de carga tributária, apenas o redirecionamento de uma fração do que já é pago pelas empresas ao poder público.

Essa é a diferença entre a CFEM como tributo, que o Brasil pratica desde 1989, e os *royalties* minerais como instrumento de política industrial, modelo que a Austrália e o Canadá já consolidaram. Reformar essa lógica não requer lei de grande impacto político: um projeto de lei específico de destinação estratégica da CFEM, sem alteração de alíquotas.

Prioridade 6 — Aceleração do mapeamento geológico da Amazônia (PlanGeo 2025–2034)

Com apenas 8% da Amazônia mapeada em 1:100.000, o Brasil está tomando decisões de política mineral com base em dados geológicos do século XX. Seis Lagos (AM), Pitinga (AM) e Presidente Figueiredo (AM) podem conter os maiores depósitos de ETRPs não identificados fora da China. O PlanGeo 2025–2034 deve ser consolidado como política de Estado com orçamento garantido por lei, imune a cortes orçamentários anuais e ter a Amazônia como prioridade máxima.

Prioridade 7 — Diplomacia mineral ativa: gerenciar a neutralidade como ativo estratégico

A posição do Brasil como fornecedor geologicamente único de ETRPs de argilas de adsorção iônica, sem alinhamento irrevogável a nenhum bloco geopolítico, é o ativo estratégico de maior valor na atual conjuntura. No entanto, essa neutralidade precisa ser gerida com ativismo e precisão. Não se trata de uma posição passiva de equidistância, mas uma estratégia deliberada de oferecer, a todos os blocos os únicos

depósitos de argilas de adsorção iônica ricos em Dy e Tb fora da China e de Mianmar, o que nenhum deles tem em escala equivalente.

Na prática, isso significa: (i) com os EUA — converter as cartas de interesse do Ex-Im Bank em contratos de *offtake* definitivos, negociar preço mínimo soberano para ETRPs e avançar em um *framework* bilateral análogo ao EUA-Austrália de outubro de 2025; (ii) com países interessados como Japão ou Coreia do Sul, por exemplo, negociar o modelo Caremag para uma refinaria de ETRPs, com transferência obrigatória de tecnologia de separação de Dy e Tb; (iii) com a União Europeia, negociar a *Strategic Partnership* existente, priorizando a conclusão formal da parceria estratégica identificada no *RESourceEU Action Plan* de dezembro de 2025, buscando incluir ETRPs na lista de projetos prioritários do CRMA. A visita de Ursula von der Leyen ao Brasil em janeiro de 2026 sinaliza posição privilegiada do Brasil nessa fila, mas a conversão do anúncio em compromisso vinculante depende da mesma condição que todas as outras parcerias: marco regulatório estável e contraparte operacional com mandato claro; (iv) com a China, manter relações comerciais normais para TR leves e concentrados, enquanto constrói gradualmente a separação doméstica que reduzirá a dependência do comprador chinês sem ruptura abrupta que crie retaliação; e (v) no G20, BRICS e CELAC, cooperar de forma ativa e protagonizada na construção de uma agenda multilateral de minerais críticos do Sul Global que posicione o Brasil como alternativa soberana à dependência chinesa e à dependência ocidental.

A coordenação entre MRE, MME e a entidade operacional de Estado¹⁰ é o mecanismo estrutural dessa diplomacia mineral. O MRE negocia o arcabouço político dos acordos; o MME define as condições técnicas e de conteúdo local; e a entidade operacional de Estado é a contraparte que assina e executa. Sem essa triangulação institucional, as oportunidades diplomáticas se dissipam na fragmentação burocrática, como já ocorreu com acordos de cooperação em TR que chegaram à mesa de negociação e não avançaram por ausência de uma contraparte operacional com mandato claro.

Nenhuma dessas oito prioridades é tecnicamente nova ou institucionalmente impossível. Todas elas estão sendo executadas, em diferentes graus, por Austrália, EUA e outros países. O que diferencia esses países do Brasil não é a dotação geológica, que é uma vantagem brasileira, nem o interesse multilateral, que existe e é crescente, nem a capacidade técnica e científica, presente no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), no Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) e em diversas instituições de ciência e tecnologia, cujos grupos de pesquisa em TR e suas aplicações foram mapeados neste estudo. O que diferencia é a velocidade e a consistência da decisão política de Estado.

A análise comparativa dos atores globais apresentada neste capítulo revelou um padrão inequívoco: os países que construíram cadeias de TR relevantes fora da China, como Austrália e EUA, fizeram isso com combinação específica de quatro elementos que o Brasil ainda não articulou completamente:

- i. marco legal estável de longo prazo;

¹⁰ A função de entidade operacional de Estado pode ser preenchida por configurações institucionais distintas: expansão do mandato da INB (Indústrias Nucleares do Brasil) para minerais críticos estratégicos, dado o domínio da INB em separação química e acordos de Estado a Estado para tecnologias sensíveis; constituição de subsidiária integral de empresa pública existente, nos moldes da Petrobras Biocombustíveis, sem necessidade de nova lei; ou criação de agência executiva vinculada ao MME, com orientação estratégica do CNMCE e capacidade contratual autônoma, aproximando-se do modelo JOGMEC japonês. O que é insubstituível não é a forma jurídica, mas o mandato.

- ii. mecanismos de preço mínimo soberano que protegem os projetos da deflação predatória chinesa;
- iii. acordos bilaterais com transferência obrigatória de tecnologia de separação; e
- iv. uma entidade operacional de Estado com mandato para executar esses acordos.

O modelo CBMM oferece uma lição mais precisa do que frequentemente se reconhece: o Brasil já demonstrou ser capaz de converter domínio geológico em liderança global de mercado sem empresa estatal plena, desde que haja integração vertical, controle majoritário nacional permanente e alinhamento de interesses com consumidores estratégicos via participação acionária. Em 2011, a CBMM vendeu 15% de seu capital a um consórcio de siderúrgicas asiáticas (CITIC, Baosteel, POSCO e outras), transformando compradores em acionistas cativos de longo prazo e eliminando o risco de mercado sem dependência do Estado. A pergunta relevante para as TR não é se deve haver ou não uma entidade de Estado, mas qual combinação de capital público, capital privado nacional e participação de consumidores estrangeiros estratégicos replica, no contexto específico dos ETR, o que essa arquitetura produziu para o nióbio.

A resposta provavelmente envolve capital misto com âncora estatal — BNDESPAR, Petrobras ou INB, participação minoritária de fabricantes de ímãs e motores elétricos como investidores-clientes e vínculo institucional com o CETEM como núcleo de P&D aplicado. Essa arquitetura não exige nova legislação de empresa estatal, reduz o risco político do debate e é reconhecível pelos parceiros internacionais como estrutura legítima de investimento de longo prazo. Sob qualquer dessas configurações, o que não pode estar ausente é a função, não a forma.

Os capítulos seguintes aprofundam cada cadeia de aplicações: ímãs; catalisadores; ligas metálicas; fósforos e materiais para aplicações ópticas avançadas, com os *roadmaps* específicos de como construir esse elo industrial em cada segmento. Cabe destacar que todos esses *roadmaps* partem do mesmo pressuposto: a cadeia integrada de TR no Brasil só será possível se as oito prioridades discutidas nesta Seção forem executadas com a urgência que a conjuntura internacional de 2026 exige.

A janela estratégica existe, é real e tem prazo e no Cenário de Referência (“Batalha pelos Elementos”), esse prazo é mais curto do que em qualquer outro cenário: a fragmentação geopolítica em blocos, combinada com a aceleração da transição energética, cria uma pressão simultânea de demanda e de fechamento de cadeias que não se repetirá. Os países que agirem neste período de abertura tornar-se-ão fornecedores soberanos de materiais essenciais para a transição energética global. Os que não a aproveitarem permanecerão exportadores de concentrado bruto, capturando menos de 5% do valor que sua geologia torna possível, enquanto o restante dos 95% são capturados por quem domina a separação, o refino de ETR e a manufatura de ímãs de alto desempenho e outras aplicações à base de TR de alto valor agregado.

Prioridade 8 — Sustentabilidade e rastreabilidade ambiental como condição de acesso a mercados ocidentais

O *Critical Raw Materials Act* (CRMA) da União Europeia e o *Inflation Reduction Act* norte-americano introduziram, para além dos requisitos de origem geográfica, exigências progressivas de sustentabilidade

e rastreabilidade ambiental como condição de acesso aos mercados de maior valor. Projetos brasileiros que aspirem ao reconhecimento como *Strategic Projects* pelo CRMA — condição necessária para acessar o financiamento do RESourceEU e contratos de *offtake* com consumidores europeus — precisarão demonstrar pegada de carbono auditável ao longo de toda a cadeia, desde a lavra até o óxido separado, conformidade com padrões de gestão de água e rejeitos na mineração de argilas de adsorção iônica, bem como sistema de rastreabilidade que permita ao comprador identificar a origem geográfica e o perfil ambiental dos elementos TR incorporados ao produto final.

O prazo desta prioridade é mais curto do que parece: os sistemas de certificação exigem de dois a quatro anos para serem implementados, auditados e reconhecidos por organismos internacionais. Projetos que não iniciarem esse processo em 2026-2027 não estarão certificados quando as primeiras refinarias nacionais entrarem em operação em 2029-2031. A Austrália já disponibiliza dados de ciclo de vida certificados conforme as normas da família ISO 14040 (ISO, 2006a; 2006b) para a produção da Lynas Rare Earths, utilizando-os como diferencial de contratação nos acordos com o Japão e os EUA. A ausência de certificação equivalente pelos projetos brasileiros reduz o poder de barganha nos contratos de *offtake* e pode inviabilizar o acesso a determinados mercados independentemente da qualidade geológica do produto.

A resposta estrutural envolve:

- i. desenvolvimento de metodologia nacional de avaliação de ciclo de vida para TR de argilas de adsorção iônica, reconhecível pela Comissão Europeia, sob coordenação do CETEM e do IBICT;
- ii. extensão da infraestrutura de acreditação do INMETRO ao segmento de TR, integrando rastreabilidade de origem mineral, dados das análises de ciclo de vida e conformidade com os requisitos de certificação ambiental exigidos pelos principais mercados compradores;
- iii. inclusão, em todos os acordos bilaterais das Prioridades 3, 4 e 7, de cláusula de apoio técnico do parceiro estrangeiro ao desenvolvimento dessas capacidades; e
- iv. rastreabilidade e certificação ambiental, que não são exigências burocráticas, mas sim o passaporte para os mercados de maior valor agregado e o complemento indispensável de todas as prioridades anteriores.

Definidos os atores e as oito prioridades nacionais que delimitam o espaço de ação brasileiro, o capítulo seguinte aprofunda o diagnóstico de mercado. Ele descreve quantitativamente a demanda mundial por terras raras em 2025–2026, projeta seu crescimento até 2040, caracteriza os principais tipos de minérios e mapeia o portfólio de projetos brasileiros e estrangeiros em desenvolvimento. Esse panorama empírico é o substrato que dá concretude às prioridades enunciadas no capítulo anterior.

Capítulo 2

Cenário global de terras raras e implicações para o Brasil: 2026–2040

2.1 Demanda mundial de terras raras: estado atual e projeções até 2040

Conforme caracterizado no Capítulo 1, a demanda global de ETR superou 390 kt em 2025, com crescimento composto projetado de aproximadamente 6,5% até 2040, concentrado em ímãs permanentes para mobilidade elétrica e energia eólica. O ponto analítico central deste capítulo é a heterogeneidade das estimativas por fonte e suas implicações estratégicas para o Brasil.

A IEA (2025) projeta, no cenário base do *Global Critical Minerals Outlook 2025*, demanda mundial de ETR magnéticos da ordem de 90 mil toneladas anuais em 2030 e 130 mil toneladas em 2040 — um crescimento composto anual de cerca de 6,5% no período. A Figura 2.1 apresenta a previsão de uso por aplicação em ímãs, com destaque para motores de veículos elétricos (35 kt em 2040) e turbinas eólicas (28 kt em 2040). A análise por elemento mostra concentração crítica em quatro: neodímio e praseodímio (responsáveis por cerca de 30% da massa do ímã NdFeB) e disprósio e térbio (necessários como aditivos para estabilidade térmica).

A heterogeneidade das estimativas entre fontes é importante observar. Como mostra a Tabela 2.1, projeções de mercado global de ímãs em 2025 variam entre 250 mil e 385 mil toneladas, com diferenças que refletem tanto critérios metodológicos distintos (escopo de produtos incluídos, base de preços de referência, conversão de capacidade instalada para produção efetiva) quanto a opacidade do mercado interno chinês, que responde por aproximadamente 90% da produção total de ímãs (94% se considerados apenas os NdFeB sinterizados, Seção 1.4.2) e cerca de 72% do consumo. .

A divergência entre fontes não invalida a análise estratégica: independentemente do número de referência adotado, a participação chinesa no elo de fabricação de ímãs supera 85%, a importação ocidental conjunta (EUA e Europa) situa-se entre 50 mil e 70 mil toneladas anuais, e o crescimento composto anual nos próximos cinco anos converge em torno de 7-8%.

2.2 Aplicações além dos ímãs

Embora os ímãs concentrem cerca de 50–70% do valor de mercado das aplicações de TR (a depender da fonte), há outras aplicações relevantes que sustentam mercados estabelecidos: catalisadores para refino de petróleo (cério, lantânio), fósforos para iluminação e *displays* (európio, ítrio, térbio), pós para polimento óptico (cério), ligas metalúrgicas (mistas), baterias de níquel-metal-hidreto (lantânio) e aplicações de defesa.

A distribuição percentual do valor de mercado por aplicação é objeto de divergência entre analistas, refletindo tanto diferenças de escopo (alguns estudos incluem apenas aplicações finais; outros incluem o valor agregado em equipamentos) quanto a forte assimetria de informação entre o mercado chinês e os mercados ocidentais. Para os fins deste estudo, adota-se a estimativa convergente de que ímãs respondem por cerca de 50% do valor, catalisadores 12–15%, polimento 10%, metalurgia 6–10%, fósforos 4–6%, baterias e defesa juntos 6–8% (consolidação a partir de IEA, 2025; Project Blue, 2025; Wood Mackenzie, 2025).

2.3 Tipologia mineralógica e implicações para o suprimento

Os minérios de TR podem ser classificados em duas grandes famílias — cristalinos (monazita, xenotima, bastnasita) e iônicos (argilas de adsorção iônica) —, cuja caracterização técnica detalhada, incluindo teores típicos por elemento, distribuição geográfica das ocorrências e implicações para o processamento, é apresentada no Capítulo 10. Para os fins do panorama de mercado deste capítulo, basta registrar que essa diferença determina rotas tecnológicas distintas de concentração e de refino, com impactos diretos sobre o valor da cesta de TR gerada por cada operação.

A Tabela 2.2 apresenta os teores típicos dos principais elementos na fração de TR de quatro tipos de minérios. A diferença mais relevante para a estratégia brasileira é que as argilas de adsorção iônica são a única classe de minério com teores significativos de disprósio e térbio (3–5% e 0,5–1% da fração de TR, respectivamente) — os elementos de maior valor unitário e maior criticidade na cadeia de ímãs.

A xenotima e as argilas iônicas são as duas fontes economicamente relevantes de terras raras pesadas (ETRPs). Os depósitos brasileiros de argilas iônicas em Goiás e Minas Gerais têm perfil mineralógico análogo aos depósitos de Mianmar e do sul da China, posicionando o Brasil como uma das três regiões geológicas no mundo com potencial relevante para suprimento de ETRPs fora da China.

2.4 Concentração da cadeia e mecanismos de reorganização

A concentração da cadeia chinesa em todos os elos — mineração ($\approx 70\%$), separação ($>90\%$), metalurgia ($>90\%$) e ímãs ($\approx 90\%$) — foi detalhada no Capítulo 1 (Seções 1.2.3 e 1.3.1). O que importa para os objetivos deste capítulo é menos a cifra agregada e mais sua distribuição por elemento e por etapa, mostrada nas tabelas a seguir.

Os mecanismos institucionais articulados pelos países ocidentais e pelo Japão entre 2022 e 2026 — piso de preço do Departamento de Defesa dos EUA com a MP Materials, programa JARE-Lynas no eixo Austrália-Japão, Critical Raw Materials Act da União Europeia, esquemas de incentivo industrial indiano — foram detalhados no Capítulo 1.

2.5 Cenários prospectivos para 2026–2040

A análise estratégica deste estudo adota como instrumento metodológico a construção de cenários pela técnica da Global Business Network (Schwartz, 1991), aplicada às cadeias globais de minerais críticos. A construção de cenários em vez de uma única projeção justifica-se por três razões:

- a) a alta incerteza geopolítica torna projeção determinística pouco útil para horizontes superiores a cinco anos;
- b) a velocidade de mudança nas políticas públicas dos principais atores (EUA, UE, China, Japão) supera a janela típica de revisão de planos industriais; e
- c) a estratégia brasileira precisa ser robusta sob diferentes trajetórias de evolução geopolítica, não otimizada para uma única.

A construção dos cenários parte de duas variáveis-chave de incerteza, identificadas como aquelas com maior impacto e maior amplitude de possibilidades de evolução: o grau de fragmentação geopolítica em blocos (de baixa cooperação multilateral até alta cooperação) e a velocidade da transição energética (de aceleração coordenada a desaceleração com priorização de segurança). O cruzamento dessas duas variáveis gera quatro cenários narrativos.

Cenário 1 — "Batalha pelos Elementos" (cenário de referência)

Alta fragmentação geopolítica em blocos competindo ativamente por acesso a fontes não chinesas + aceleração da transição energética com pressão simultânea de demanda. As economias importadoras e seus parceiros industriais consolidam suas cadeias com Austrália, Canadá, África do Sul e outras fontes; o Brasil precisa firmar acordos comerciais/industriais. A análise indica que acordos antecipados podem ampliar o poder de barganha brasileiro, que tende a ser mais elevado enquanto as alternativas globais permanecerem limitadas. As análises deste cenário sugerem que este poder de barganha terá máximo no biênio 2026-2027.

Cenário 2 — "Corrida Verde" (cenário otimista habilitador)

Baixa fragmentação geopolítica + aceleração da transição energética. Cooperação multilateral robusta, transferência tecnológica facilitada, financiamento abundante via instituições multilaterais. O Brasil é parceiro estratégico de múltiplos blocos simultaneamente, captura valor em vários elos da cadeia, atrai investimento privado de longo prazo. Esse cenário exige preparação interna brasileira (marco regulatório, entidade operacional, capacidade de absorção tecnológica) para ser efetivamente capturado.

Cenário 3 — "Outsourcing 2.0"

Baixa fragmentação geopolítica + desaceleração da transição energética. Mantém-se a dependência ocidental do suprimento chinês de TR como solução de menor custo, sem pressão urgente de diversificação. O Brasil tenderia a manter participação concentrada nas etapas primárias. Cenário menos provável dado o consenso atual sobre transição energética, mas relevante como contraponto.

Cenário 4 — "Reserva Estratégica"

Alta fragmentação geopolítica + desaceleração da transição energética. Estoques estratégicos substituem cadeias produtivas integradas; preferência por contratos de longo prazo com fornecedores politicamente alinhados; fragmentação tecnológica entre blocos. O Brasil ocupa posição de fornecedor preferencial para o bloco com o qual se alinhe primeiro, mas perde flexibilidade diplomática.

A seleção do Cenário 1 — "Batalha pelos Elementos" — como cenário de referência para o roadmap estratégico apresentado no Capítulo 3 não é uma escolha pessimista, mas uma decisão de robustez metodológica: um instrumento de planejamento calibrado para o cenário de maior pressão produz ações que permanecem válidas mesmo se o ambiente externo se mostrar mais favorável. As oportunidades específicas do Cenário 2 são incorporadas como aceleradores condicionais, ativados quando as condições de cooperação internacional se mostrarem mais favoráveis do que o previsto.

Tabela 2.1. Níveis de criticidade das variáveis de acordo com os cenários considerados.

Variáveis críticas	C1 Batalha pelos Elementos	C2 Corrida Verde	C3 Outsourcing 2.0	C4 Reserva estratégica
Demanda por ETR	Muito alta / volátil	Muito alta / estável	Moderada / gradual	Baixa / distorcida
Preços ETR	Altos e voláteis	Moderados a altos	Moderados	Altos por política
Acesso à tecnologia	Restrito / disputado	Aberto via acordos	Aberto / lento	Restrito / custoso
Risco de execução para o Brasil	Alto / gerenciável	Baixo / oportunidade	Médio / inércia	Alto / desorientação
Janela estratégica de ímãs NdFeB	Urgente e estratégica	Favorável e planejada	Existe, sem urgência	Inviável sem subsídio

2.6 Posição brasileira: oportunidades concretas

No quadro prospectivo descrito nas seções anteriores, a posição singular do Brasil — segunda maior reserva mundial, único detentor de argilas iônicas em escala no hemisfério ocidental, neutralidade geopolítica ativa — foi caracterizada em detalhe no Capítulo 1. O que este capítulo acrescenta é a articulação entre essa posição e os três elos da cadeia nos quais as oportunidades concretas se materializam: mineração e concentrado (capturável já em 2027-2030), refino doméstico e fabricação de ímãs.

Os principais projetos brasileiros em desenvolvimento — Mineração Serra Verde e Aclara em Goiás, Meteoric e Viridis em Poços de Caldas, todos focados em argilas iônicas, além de iniciativas adicionais como Energy Fuels (Bahia litorânea), Brazilian Rare Earth (Jequié), Pensana (Angola, com offtake potencial brasileiro) e outras em fase preliminar — são descritos em maior detalhe operacional, incluindo estágio das plantas-piloto e acordos de offtake, no Capítulo 10 (Mineração). Para os fins do panorama de mercado

deste capítulo, basta registrar que o conjunto desses projetos pode posicionar o Brasil como fornecedor relevante de concentrado para refinarias ocidentais já no horizonte 2027-2030, condicionado à superação das barreiras de estruturação industrial discutidas adiante.

A oportunidade de fornecimento de concentrado está, em larga medida, capturada por investidores estrangeiros que detêm controle acionário dos principais projetos. A questão estratégica relevante é se o Brasil se limitará a fornecer concentrado bruto para refino externo (capturando menos de 5% do valor agregado da cadeia) ou se construirá capacidade de separação no território nacional.

A oportunidade de refino doméstico é mais incerta. Uma refinaria de capacidade média (5.000 t/ano de óxidos, dos quais cerca de 1.000 t/ano seriam óxidos de NdPr) demanda investimento na ordem de US\$ 300 milhões, com base em paralelo com a planta da Lynas na Malásia. O risco é o reduzido número de compradores ocidentais qualificados — quatro a cinco refinarias e fabricantes de ímãs —, vários deles com fornecimento próprio de concentrado em construção. A viabilidade de uma refinaria brasileira depende de mecanismos de mitigação de risco de demanda, em particular: contratos de *offtake* soberanos (modelo MP-DoD/JARE-Lynas) e participação acionária de consumidores estratégicos (modelo CBMM-nióbio, discutido no Capítulo 1).

A oportunidade de fabricação de ímãs apresenta lógica de risco diferente. O mercado de ímãs é mais fragmentado em compradores finais (múltiplos fabricantes de motores elétricos, turbinas, drones, equipamentos industriais), reduzindo o risco de demanda comparado ao refino. Por outro lado, a curva de aprendizado tecnológico é íngreme: a transferência de tecnologia da fabricação de ímãs sinterizados de alto desempenho a partir de polos chineses, japoneses ou alemães é mais difícil que a transferência de tecnologia de separação. A iniciativa MAGBRAS, com a planta-piloto do CIT SENAI ITR em Lagoa Santa, é descrita em detalhe no Capítulo 5.

2.7 O que vem depois

Este capítulo foi caracterizado pelo cenário de mercado em que o Brasil precisa se posicionar e identificou as oportunidades concretas em três elos da cadeia (mineração, refino, fabricação de ímãs). A análise por cenários sinalizou que o Cenário "Batalha pelos Elementos" — alta fragmentação geopolítica combinada com aceleração da transição energética — é o mais provável no horizonte 2026-2030 e o que demanda maior preparação institucional do Brasil, neste cenário de referência construído a partir das experiências internacionais analisadas.

Os capítulos seguintes desdobram o diagnóstico institucional em direcionadores setoriais e execução estratégica. O Bloco II aprofunda os direcionadores estratégicos para as cinco cadeias produtivas priorizadas, precedido do capítulo transversal sobre sustentabilidade e economia circular. O Bloco III articula o desenho estratégico em torno dos dois elos estruturantes — mineração e refino —, organizando eixos, prazos, instrumentos de política pública e a leitura analítica dos acontecimentos recentes que estreitam a janela de execução.

Capítulo 3

Mapa do Caminho Estratégico da cadeia integrada de terras raras no Brasil: 2026–2040

O presente capítulo consolida a síntese estratégica produzida nos capítulos precedentes em um instrumento operacional de orientação de política pública e investimento privado para a cadeia integrada de terras raras (TR) no Brasil no horizonte 2026–2040.

O Capítulo 1 mapeou os atores globais, identificou o posicionamento estrutural do Brasil e definiu oito prioridades nacionais organizadas por urgência e horizonte temporal. O Capítulo 2 caracterizou o cenário global de mercado e as oportunidades para o Brasil até 2040. A análise estratégica adota como cenário de referência "Batalha pelos Elementos" — caracterizado por fragmentação geopolítica em blocos competindo por acesso a fontes não chinesas de ETR e aceleração da transição energética — complementado pelo cenário otimista "Corrida Verde", construídos pela equipe técnica deste estudo a partir da metodologia da Global Business Network (GBN). Este capítulo traduz esse diagnóstico em um *roadmap* de ação: define a visão de futuro para 2040, estabelece os objetivos estratégicos organizados em seis dimensões de análise e consolida o conjunto de ações prioritárias, com prazos, atores e indicadores de resultado, estruturado em três horizontes temporais.

A lógica que organiza o Mapa do Caminho Estratégico é a da urgência diferenciada: nem todas as ações têm o mesmo peso estratégico, nem a mesma janela de oportunidade. As fundações institucionais — marco regulatório, Conselho Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (CNMCE), Fundo Soberano de Minerais Críticos (FSMC) e a entidade operacional de Estado — precisam ser estabelecidas no horizonte de curto prazo (2026–2030), porque são pré-condições insubstituíveis para tudo o que vem depois. Sem elas, os acordos bilaterais de processamento permanecem no plano das intenções diplomáticas, o financiamento do Ex-Im Bank não se converte em contratos definitivos e a refinaria de ETR não se materializa.

O Mapa do Caminho não pressupõe que todas as condições externas se materializarão favoravelmente. Ele é construído sobre o cenário de referência "Batalha pelos Elementos", que combina fragmentação geopolítica em blocos com aceleração da transição energética, configurando um ambiente de maior pressão e menor margem de erro para o Brasil. Isso significa que o Mapa do Caminho está calibrado para o pior caso plausível, porém ações derivadas do Cenário 2, "Corrida Verde", são incorporadas como oportunidades a serem capturadas, caso as condições de cooperação internacional se mostrem mais favoráveis do que o esperado no cenário de referência.

3.1 Metodologia adotada

O Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de Terras Raras no Brasil: 2026–2040 foi elaborado com base na metodologia de *roadmapping* aplicada a cadeias industriais de energia e minerais críticos,

amplamente reconhecida como instrumento de planejamento orientado a objetivos de política pública de longo prazo (Kerr, 2023; Phaal et al., 2024). Essa abordagem, estruturada de forma a responder às diretrizes governamentais e à construção de uma visão de futuro, foi adaptada ao contexto específico da cadeia integrada de terras raras no Brasil. A aplicação combina três instrumentos analíticos complementares: planejamento por cenários; análise de objetivos estratégicos por dimensão; e estruturação de ações estratégicas por dimensão e horizonte temporal.

O ponto de partida é o cenário de referência "Batalha pelos Elementos", construído pela metodologia da Global Business Network (Schwartz, 1991). A seleção do Cenário 1 "Batalha pelos Elementos" como âncora do Mapa do Caminho não é uma escolha pessimista, mas uma decisão de robustez: um instrumento de planejamento estratégico calibrado para o cenário de maior pressão e menor margem de erro produz ações que permanecem válidas, mesmo se o ambiente externo se mostrar mais favorável do que o esperado. As oportunidades derivadas do Cenário 2 "Corrida Verde" são incorporadas como aceleradores condicionais, ativados quando as condições de cooperação internacional se mostrarem mais favoráveis do que o previsto no cenário de referência. Essa estrutura dual, ou seja, base no pior caso plausível, com janelas para captura de oportunidades do cenário otimista, é a mesma adotada nos *roadmaps* estratégicos de minerais críticos da Austrália (Department of Industry, Science and Resources, 2023) e do Japão (METI, 2025), permitindo que o documento mantenha validade operacional sob diferentes trajetórias de desdobramento geopolítico.

A estrutura em seis dimensões de análise – ‘governança regulatória e institucional’ (GOV), ‘conhecimento geológico e exploração mineral’ (GEO), ‘tecnologia, PD&I e capacitação de recursos humanos’ (TEC), ‘cadeia produtiva integrada e industrialização’ (IND), ‘diplomacia mineral e inserção internacional’ (DIP) e ‘financiamento e mobilização de capital’ (FIN) – foi derivada diretamente de dois insumos analíticos dos capítulos precedentes. O primeiro são as cinco variáveis de análise da análise das cinco variáveis críticas do Capítulo 2 construída pela equipe deste estudo: demanda por ETR, preços, acesso à tecnologia, risco para o Brasil e janela estratégica de ímãs NdFeB. O segundo são as oito prioridades nacionais identificadas na Seção 1.6.8 do Capítulo 1, que operam como pré-condições institucionais para a execução de qualquer elo da cadeia. A tradução dessas prioridades em seis dimensões obedeceu ao critério de cobertura exaustiva sem sobreposição. Cada objetivo estratégico do *roadmap* deve pertencer inequivocamente a uma única dimensão e nenhum gargalo identificado nos capítulos anteriores deve ficar sem endereçamento em pelo menos um objetivo estratégico.

As relações de precedência entre dimensões foram mapeadas explicitamente na Seção 3.4, porque a sequência de execução importa tanto quanto o conteúdo de cada objetivo estratégico. A dimensão GOV é logicamente anterior a todas as demais; a dimensão GEO precede a IND; a dimensão TEC é paralela à IND, mas a precede nos elos de maior risco tecnológico; e a dimensão FIN é condição habilitadora transversal, não sequencial. Esse mapeamento de precedências é o que diferencia o Mapa do Caminho de uma lista de recomendações justapostas, ou seja, ele define qual decisão desbloqueia qual capacidade e em que prazo, permitindo identificar o caminho crítico da estratégia.

A definição dos três horizontes temporais de curto (2026-2030), médio (2031-2035) e longo prazo (2036-2040) seguiu um critério funcional, não apenas cronológico.

O horizonte de curto prazo corresponde ao período em que as fundações institucionais e os primeiros acordos diplomáticos precisam ser estabelecidos, porque são pré-condições insubstituíveis para tudo o que vem depois. Sua fronteira em 2030 coincide com a janela de revisão do Mapa do Caminho Estratégico, momento em que o Conselho Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos avaliará os indicadores de todas as seis dimensões e ajustará metas e prioridades. O horizonte de médio prazo corresponde ao período de construção da cadeia de valor propriamente dita, com entrada em operação das refinarias e da planta de ímãs. O horizonte de longo prazo corresponde à fase de consolidação industrial e participação relevante em iniciativas multilaterais, cujos resultados só são alcançáveis se os dois horizontes anteriores forem executados com a consistência requerida. A segunda janela de revisão, prevista para 2035, antecipa a transição entre o médio e o longo prazo, permitindo ajuste de curso antes do início da fase de consolidação.

Para cada ação do **Mapa do Caminho Estratégico** (Quadro 3.4), foram definidos atores principais responsáveis pela execução e indicadores de resultado mensuráveis, de modo a permitir o monitoramento anual pelo CNMCE e a prestação de contas públicas sobre o progresso da estratégia. A identificação de condicionantes críticos e indicadores de alerta precoce, sistematizada na Seção 3.6, completa o instrumento metodológico ao introduzir mecanismos de gestão de risco que o **Mapa do Caminho Estratégico** prevê para os casos em que os pressupostos estratégicos se alterem de forma significativa antes das janelas de revisão formais.

3.2 Cenário de referência e premissas estratégicas

O Cenário 1, "Batalha pelos Elementos", constitui o cenário de referência porque combina o maior impacto potencial com a maior necessidade de preparação antecipada. Nesse cenário, a fragmentação geopolítica em blocos competindo ativamente pelo acesso a ETR de fontes não chinesas cria uma janela estratégica para o Brasil — caracterizada como urgente e de prazo definido: os países que não se posicionarem como fornecedores soberanos de ETR processados antes de 2033 correm o risco de permanecer exportadores de concentrado bruto indefinidamente, capturando menos de 5% do valor que sua geologia torna possível.

O Quadro 3.1 sistematiza as premissas estratégicas que ancoram o Mapa do Caminho Estratégico, organizadas por dimensão de análise. Essas premissas não são previsões: são os pressupostos sobre os quais as ações do Mapa do Caminho Estratégico fazem sentido. Se alguma delas se alterar significativamente, como por exemplo, se a substituição tecnológica avançar mais rapidamente do que o esperado ou se a demanda por ETR enfraquecer de forma estrutural, o CNMCE deverá promover a revisão do Mapa do Caminho Estratégico nas janelas previstas para 2030 e 2035.

Quadro 3.1: Premissas do Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de TR no Brasil: 2026–2040

Dimensão	Conteúdo estratégico
Geopolítica	Fragmentação em blocos persiste até 2040. EUA, UE, Japão e Coreia do Sul competem ativamente pelo acesso a ETRPs brasileiros. A China mantém 70–80% do refino global até 2030, com declínio gradual a seguir. O Brasil preserva margem de neutralidade estratégica como ativo de barganha.
Demanda	A demanda global por ímãs NdFeB atinge 200.000–300.000 t/ano até 2035, liderada por veículos elétricos e turbinas eólicas. Dy e Tb permanecem em escassez estrutural, com prêmio de preço de 5 a 8 vezes sobre NdPr.
Oferta global	O Brasil consolida Serra Verde, Caldeira/Meteoric e um terceiro projeto como exportadores relevantes de concentrado misto antes de 2030. Mianmar permanece instável. A Austrália amplia o refino, mas sem ETRPs em escala suficiente para atender a demanda ocidental. Premissa revista: a Mineração Serra Verde foi adquirida por empresa norte-americana em 20/04/2026, com offtake de 15 anos comprometendo a produção da Fase 1. Ver Capítulo 13, Seção 13.1.
Preços	NdPr estabiliza entre USD 55–80/kg. Dy e Tb oscilam entre USD 300–800/kg com episódios de pico. Mecanismos de <i>floor price</i> tornaram-se prática padrão nos acordos bilaterais ocidentais desde 2024 (modelo DoD-MP Materials).
Tecnologia	Substituição tecnológica (FeN, tetraenita, SRM) não atinge viabilidade comercial plena antes de 2035. A eficiência dos motores elétricos com ímãs NdFeB continua superior aos substitutos no horizonte relevante. A reciclagem de TR cresce, mas supre menos de 15% da demanda até 2040.
Regulação	O <i>Critical Raw Materials Act da UE</i> , o IRA norte-americano e os equivalentes japoneses e coreanos criam demanda por fornecedores certificados, com rastreabilidade ESG e conteúdo local progressivo. O Brasil precisa atender esses padrões para acessar os mercados de maior valor.

Fontes: Baseado em USGS (2026); IEA (2025); CEBRI (2025); Comissão Europeia (2025); RESourceEU Action Plan (dez. 2025).

3.3 Visão de futuro 2040

A visão de futuro expressa o estado desejado da cadeia integrada de TR no Brasil ao final do horizonte deste Mapa do Caminho Estratégico. Ela é aspiracional, define onde o Brasil quer estar e não onde provavelmente estará sem ação deliberada, mas também é realizável: todos os elementos que a compõem

têm precedente em outros países que construíram cadeias soberanas de minerais críticos a partir de posições de partida análogas à brasileira.

"Em 2040, o Brasil é reconhecido internacionalmente como produtor soberano e responsável de terras raras pesadas, com capacidade instalada de separação química de elementos críticos e participação consolidada na fabricação de ímãs permanentes NdFeB para as cadeias globais de mobilidade elétrica e energia renovável. A cadeia integrada brasileira opera sob governança institucional estável, captura mais de 40% do valor potencial dos depósitos nacionais por meio do processamento doméstico e posiciona o Brasil como fornecedor soberano preferencial para parceiros estratégicos em múltiplos blocos geopolíticos, preservando margem de autonomia na negociação multilateral. A Amazônia, com sua geologia de argilas de adsorção iônica ainda em grande parte inexplorada, constitui a reserva estratégica que sustentará a posição brasileira para além de 2040."

Essa visão implica quatro transformações estruturais em relação à situação de 2026. A primeira é a superação do gargalo de separação: em 2026, o Brasil não tem nenhuma planta industrial de separação de ETR e exporta quase 100% da produção como concentrado bruto. Em 2040, a visão pressupõe capacidade instalada de ao menos 3.000 t/ano de óxidos de ETR separados domesticamente.

A segunda é a entrada no elo de fabricação de ímãs: em 2026, o Brasil tem uma planta-piloto de 10 t/ano (CIT SENAI ITR, em Lagoa Santa, MG). Em 2040, a visão pressupõe produção de ao menos 500 t/ano com conteúdo nacional crescente.

A terceira é a consolidação de uma governança institucional estável e suprapartidária: em 2026, o CNMCE, o FSMC e a entidade operacional de Estado ainda não existem. Em 2040, eles constituem o tripé institucional que garante a continuidade da política mineral acima dos ciclos eleitorais.

A quarta é a expansão do conhecimento geológico da Amazônia: em 2026, apenas 8% do território amazônico está mapeado na escala necessária para decisões de investimento mineral. Em 2040, essa cobertura atingirá 40%, revelando a próxima geração de depósitos que sustentará a cadeia além deste horizonte.

O Quadro 3.2 traduz a visão em indicadores mensuráveis, permitindo o monitoramento anual do progresso pelo CNMCE e a avaliação nas janelas de revisão de 2030 e 2035.

Quadro 3.2: Visão 2040 por dimensão: situação atual, meta e indicador de referência

Dimensão	Situação 2026	Meta 2040	Indicador de referência
Posição na cadeia de valor	Exportador de concentrado bruto; < 5% do valor potencial capturado	Produtor soberano de óxidos separados e ímãs NdFeB; ≥ 40% do valor potencial capturado	% valor capturado/ valor potencial total
Capacidade de separação	Zero (nenhuma planta industrial de separação)	≥ 3.000 t/ano de óxidos de ETRPs (Dy, Tb, Nd, Pr)	t/ano de óxidos de ETRPs separados domesticamente
Produção de ímãs NdFeB	Planta-piloto de 10 t/ano (CIT SENAI ITR)	≥ 500 t/ano com ≥ 30% de conteúdo nacional	t/ano de ímãs produzidos com insumos nacionais
Capacidade de refino	Nenhuma em escala comercial (escala piloto no CETEM)	≥ 2 refinarias operacionais; parceria bilateral com transferência tecnológica	Número de refinarias operacionais; país parceiro da tecnologia
Cobertura geológica	8% da Amazônia mapeada em 1:100.000	≥ 40% da Amazônia mapeada; novos depósitos identificados e licitados	% do território amazônico em 1:100.000
Inserção diplomática	Cartas de interesse (Ex-Im Bank); negociação com UE em curso	<i>Strategic Partnership</i> com UE firmada; ≥ 3 acordos bilaterais de <i>offtake</i> soberano ativos	Número de acordos de <i>offtake</i> soberano com <i>floor price</i>
Recursos humanos	Déficit severo em separação hidrometalúrgica e ímãs	≥ 500 especialistas formados; rede nacional de pesquisa em TR operacional	Número de doutores e especialistas em TR formados

Fonte: Baseado em USGS (2026); IEA (2025); CEBRI (2025); e nos Capítulos 2 e 3 deste estudo.

3.4 Dimensões de análise e objetivos estratégicos

Os objetivos estratégicos (OEs) do Roadmap organizam-se em seis dimensões de análise complementares, derivadas dos gargalos e desafios identificados na análise das cinco variáveis críticas identificadas no Capítulo 2 — demanda por ETR, preços ETR, acesso à tecnologia, risco de execução para o Brasil e janela estratégica de ímãs NdFeB — e nas oito prioridades nacionais identificadas no Capítulo 1.

As seis dimensões são: (i) Governança regulatória e institucional (GOV); (ii) Conhecimento geológico e exploração mineral (GEO); (iii) Tecnologia, P&D&I e capacitação de recursos humanos (TEC); (iv) Cadeia produtiva integrada e industrialização (IND); (v) Diplomacia mineral e inserção internacional (DIP); e (vi)

Financiamento e mobilização de capital (FIN). Cada dimensão apresenta entre três e cinco objetivos estratégicos com prazo-alvo definido, conforme sistematizado no Quadro 3.3.

As dimensões não são independentes: há relações de precedência crítica entre elas. A dimensão GOV é logicamente anterior a todas as demais, porque sem marco regulatório, CNMCE, FSMC e a entidade operacional de Estado, os objetivos das demais dimensões não têm as condições institucionais mínimas para ser executados.

A dimensão GEO é anterior à dimensão IND, porque sem caracterização elementar detalhada dos depósitos, não é possível negociar contratos de *offtake* com especificidade técnica nem dimensionar adequadamente uma planta de separação.

A dimensão TEC é paralela à dimensão IND, mas a precede nos elos de maior risco tecnológico: a planta-piloto de separação no CETEM (OE 3.1) precisa demonstrar viabilidade técnica antes que o acordo bilateral de processamento (OE 5.3) defina a tecnologia a ser transferida para a refinaria industrial (OE 4.2), garantindo alinhamento técnico entre a capacidade nacional de absorção e os termos de transferência negociados. A dimensão FIN permeia todas as demais e é uma condição habilitadora transversal, não uma dimensão sequencial.

Quadro 3.3: Objetivos estratégicos por dimensão de análise

Dimensão	Código	Objetivo estratégico	Prazo-alvo
Governança regulatória e institucional (GOV)	OE 1.1	Aprovar e implementar o marco regulatório consolidado de minerais estratégicos, com licenciamento de prazo máximo definido em lei, metas vinculantes de beneficiamento doméstico e proteção ao investimento de longo prazo.	2027
	OE 1.2	Instalar e operacionalizar o Conselho Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (CNMCE), com mandatos fixos acima de ciclos eleitorais, como coordenador estratégico permanente da cadeia de TR.	2026
	OE 1.3	Constituir entidade operacional de Estado para minerais críticos — expansão de mandato da INB, subsidiária de empresa pública existente ou agência executiva vinculada ao MME — com capacidade de assinar contratos de <i>offtake</i> soberanos e acordos de transferência tecnológica. <i>Nota: A rota legislativa específica da TerraBras foi vetada em 24/04/2026. O horizonte e as rotas alternativas para cumprimento desta função institucional são discutidos no Capítulo 13, Seção 13.2.</i>	2028
	OE 1.4	Capitalizar e operacionalizar o Fundo Soberano de Minerais Críticos (FSMC) com dotação mínima de R\$ 5 bilhões, viabilizada pela destinação de parte da parcela federal da CFEM sobre minerais estratégicos.	2027
Conhecimento geológico e exploração mineral	OE 2.1	Completar a caracterização analítica elementar (Nd, Pr, Dy, Tb) dos cinco depósitos prioritários — Serra Verde, Caldeira/Meteoric, Colossus, Aclara e Viridis	2028

Dimensão	Código	Objetivo estratégico	Prazo-alvo
(GEO)		— como pré-requisito insubstituível para negociação de contratos de <i>offtake</i> com especificidade técnica.	
	OE 2.2	Elevar de 8% para 40% a cobertura cartográfica da Amazônia em escala 1:100.000, como política de Estado com orçamento garantido em lei plurianual no âmbito do PlanGeo 2025–2034, priorizando as províncias minerais de Seis Lagos (AM), Pitinga (AM) e Presidente Figueiredo (AM).	2034
	OE 2.3	Identificar e licitar pelo menos dois novos blocos de TR de argilas de adsorção iônica na Amazônia, com base nos dados do PlanGeo, para entrada em desenvolvimento na janela 2036–2040.	2034
Tecnologia, PD&I e capacitação (TEC)	OE 3.1	Implantar e operacionalizar planta-piloto nacional de separação hidrometalúrgica de ETRPs no CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), atingindo TRL 6 para separação de Dy e Tb a partir de argilas de adsorção iônica.	2028
	OE 3.2	Formar ao menos 500 especialistas em metalurgia de terras raras e separação hidrometalúrgica e ao menos 50 doutores em processos de ETRPs, por meio de programa emergencial de bolsas CAPES/CNPq em parceria com CETEM, UFOP, USP e institutos internacionais.	2032
	OE 3.3	Implantar laboratório nacional de caracterização, certificação e rastreabilidade de ímãs NdFeB, em parceria com fabricante internacional de ímãs, como requisito de acesso ao mercado europeu (CRMA) e americano (IRA).	2027–2029
	OE 3.4	Desenvolver e implementar programa nacional de reciclagem de TR de ímãs permanentes pós-consumo (veículos elétricos e turbinas de primeira geração), posicionando o Brasil na economia circular de TR antes de 2040.	2037
	OE 3.5	Desenvolver e implementar metodologia nacional de avaliação de ciclo de vida (ACV) para TR de argilas de adsorção iônica, sob coordenação do CETEM e do IBICT, com reconhecimento pela Comissão Europeia; estender a infraestrutura de acreditação do INMETRO ao segmento de TR, integrando rastreabilidade de origem mineral, dados de ciclo de vida e conformidade com o CRMA e o IRA; e incluir, em todos os acordos bilaterais (OEs 5.1, 5.2 e 5.3), cláusula de apoio técnico do parceiro estrangeiro ao desenvolvimento dessas capacidades.	2028
Cadeia produtiva integrada e industrialização (IND)	OE 4.1	Ter ao menos três projetos de mineração de TR de argilas de adsorção iônica em operação comercial plena, com produção total superior a 5.000 t/ano de concentrado misto (MREC) até 2030.	2030
	OE 4.2	Implantar a primeira refinaria de separação de ETRPs com tecnologia transferida por parceiro bilateral (japonês, francês ou coreano), localizada	2029-2031

Dimensão	Código	Objetivo estratégico	Prazo-alvo
		em Goiás ou Minas Gerais, com capacidade inicial de ao menos 1.000 t/ano de óxidos de Dy, Tb, Nd e Pr.	
	OE 4.3	Atingir capacidade instalada total de ao menos 3.000 t/ano de óxidos de ETRPs separados domesticamente, posicionando o Brasil entre os três maiores produtores de ETRPs fora da China.	2033
	OE 4.4	Implantar planta nacional de produção de ligas metálicas e ímãs NdFeB sinterizados com ao menos 30% de conteúdo nacional, com demanda doméstica de defesa (Exército, Marinha, EMBRAER) como âncora de mercado na fase inicial.	2036
	OE 4.5	Capturar ao menos 40% do valor potencial da cadeia nacional de TR por meio do processamento doméstico até 2040, reduzindo a participação da exportação de concentrado bruto para menos de 30% do total exportado.	2040
Diplomacia mineral e inserção internacional (DIP)	OE 5.1	Converter as cartas de interesse do Ex-Im Bank norte-americano (USD 715 milhões para Serra Verde e Caldeira) em contratos definitivos de <i>offtake</i> , com cláusula de <i>floor price</i> para Dy e Tb.	2027
	OE 5.2	Assinar <i>Strategic Partnership</i> com a União Europeia para minerais críticos, com inclusão de ETRPs na lista de projetos estratégicos do CRMA e acesso aos mecanismos de financiamento do RESourceEU Action Plan.	2027
	OE 5.3	Assinar ao menos um acordo bilateral de processamento do tipo Projeto Caremag, com parceiros que transfiram obrigatoriamente a tecnologia de separação de ETR e contrato de <i>offtake</i> de longo prazo com <i>floor price</i> soberano.	2028
	OE 5.4	Negociar mecanismo de <i>floor price</i> para Dy e Tb em todos os contratos de <i>offtake</i> soberanos, com o FSMC como instrumento anticíclico complementar nos períodos de risco de pressão competitiva decorrente da capacidade excedente global (deflação).	2026
	OE 5.5	Liderar proposta multilateral de governança de minerais críticos do Sul Global nos fóruns do G20, BRICS e CELAC, posicionando o Brasil como alternativa soberana à dependência chinesa e ao alinhamento exclusivo com o bloco ocidental.	2027
Financiamento e mobilização de capital (FIN)	OE 6.1	Aprovar lei de destinação de parte da parcela federal da CFEM sobre minerais estratégicos para capitalização do FSMC, criando fonte de receita dedicada, previsível e imune a cortes orçamentários anuais.	2027

Dimensão	Código	Objetivo estratégico	Prazo-alvo
	OE 6.2	Mobilizar ao menos R\$ 15 bilhões em financiamento do BNDES e da FINEP para a cadeia integrada de TR até 2030, incluindo linhas específicas para exploração mineral, construção de refinarias, P&D&I em separação e formação de recursos humanos.	2030
	OE 6.3	Estruturar fundo de capital misto no modelo CBMM — âncora estatal (BNDESPAR, INB ou subsidiária de empresa pública) com participação minoritária de 15 a 25% de fabricantes internacionais de ímãs como acionistas-clientes, eliminando o risco de demanda de longo prazo. [Nota editorial — remissão: a discussão analítica do modelo CBMM como referência de entidade operacional de Estado é apresentada no Capítulo 1 (item Prioridade 5).]	2029
	OE 6.4	Acessar mecanismos de financiamento climático internacional — Global Gateway da UE, DFC dos EUA, JBIC do Japão — para cofinanciamento da refinaria de ETRPs, reduzindo a exposição de capital público brasileiro no risco tecnológico da fase inicial.	2028

Siglas: GOV = Governança; GEO = Geológica; TEC = Tecnologia; IND = Industrial; DIP = Diplomacia; FIN = Financiamento.

3.5 Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de TR no Brasil: 2026–2040

O Mapa do Caminho Estratégico consolida as ações estratégicas para os três horizontes temporais, articulando-as com os objetivos estratégicos das seis dimensões de análise. A estrutura de apresentação segue a lógica da urgência diferenciada descrita na introdução deste capítulo:

- i. o horizonte de curto prazo concentra as fundações institucionais e os primeiros acordos que abrem a janela para a construção da cadeia integrada;
- ii. o horizonte de médio prazo concentra a construção da cadeia de valor propriamente dita — separação e refino de ETR, caracterização, formação de pessoas e estruturação do capital; e
- iii. o horizonte de longo prazo concentra a consolidação industrial e a participação relevante em iniciativas multilaterais que resultam das duas fases anteriores.

3.5.1 Horizonte de curto prazo (2026–2030): H1 – Fundações institucionais e ativação dos primeiros elos da cadeia

O horizonte de curto prazo (2026–2030) é o mais crítico, porque é o período em que as fundações institucionais precisam ser construídas e os primeiros elos da cadeia de valor precisam ser ativados. Suas

ações são interdependentes e, em sua maioria, sequencialmente críticas: o CNMCE precisa existir antes de poder coordenar o PlanGeo; a entidade operacional precisa ter mandato legal antes de poder assinar o acordo bilateral tipo Caremag; o FSMC precisa ter dotação antes de poder funcionar como mecanismo anticíclico nos contratos de *offtake*. Na segunda metade do período (2029–2030), as fundações construídas se convertem nas primeiras capacidades produtivas reais: a refinaria de ETRPs inicia operações, o primeiro contrato de *offtake* de óxidos separados é assinado e a cobertura geológica da Amazônia atinge 20% do território.

O elemento de maior urgência neste horizonte é a aprovação do marco regulatório consolidado de minerais estratégicos. Como analisado no Capítulo 2 (Seção 1.6.8, Prioridade 1), os USD 250 milhões do Ex-Im Bank para o Projeto Caldeira e os USD 465 milhões para o Projeto Serra Verde são cartas de interesse preliminares, e não contratos. A conversão em comprometimento definitivo de capital exige contratos de *offtake* assinados com compradores soberanos e marco legal que ofereça previsibilidade jurídica de 15 a 20 anos. A janela para aprovar esse marco antes do calendário eleitoral de outubro de 2026 é estreita, o que torna as medidas executivas — decreto do CNMCE, operacionalização do FSMC via instrumento infralegal — a estratégia de primeiro movimento mais viável.

A planta-piloto de separação no CETEM (OE 3.1) é o segundo elemento de maior urgência, porque é o pré-requisito técnico, tanto para o acordo bilateral tipo Caremag, quanto para a eventual atração de parceiros tecnológicos estrangeiros. Nenhum país com tecnologia de separação de Dy e Tb vai transferi-la para o Brasil sem ter evidência de que existe capacidade técnica nacional para absorvê-la. A planta-piloto é essa evidência. Os dados brasileiros sobre o CETEM, que possui experiência acumulada em hidrometalurgia de monazita desde os anos 1980, e os grupos de pesquisa em separação de ETRPs na UFOP, USP e UFRGS indicam que o TRL 6 é atingível no prazo de dois a três anos com financiamento adequado da FINEP.

3.5.2 Horizonte de médio prazo (2031–2035): H2 – Escalonamento rumo à consolidação da cadeia

O horizonte de médio prazo (2031–2035) é aquele em que a capacidade produtiva real se consolida e o Brasil avança para o elo de maior valor agregado. O marco simbólico central é a consolidação da primeira refinaria (já iniciada em 2029–2030) e a implantação da segunda refinaria de ETRPs, elevando a capacidade nacional para ao menos 3.000 t/ano. A entrada em operação da planta de ímãs NdFeB sinterizados (OE 4.3) posiciona o Brasil pela primeira vez no elo de maior valor agregado da cadeia. Do ponto de vista geopolítico, este período representa que o Brasil sai do estágio de "Mianmar organizado" — exportador de concentrado sem separação — e entra no estágio de fornecedor de elementos críticos de alta pureza. Do ponto de vista comercial, significa que o preço de referência do produto exportado pelo Brasil salta de USD 15–30/kg (concentrado misto) para USD 300–800/kg (Dy e Tb em óxido separado), com correspondente ampliação da receita de exportação e da capacidade de pagamento do financiamento da cadeia.

O terceiro projeto de mineração (OE 4.1) é a condição de oferta que sustenta a refinaria: sem volume de concentrado suficiente para alimentar a planta de separação, o projeto perde viabilidade econômica. A meta de 5.000 t/ano de concentrado misto (MREC) é o mínimo necessário para justificar uma refinaria de 1.000 t/ano de óxidos — relação de conversão típica de 4:1 a 5:1 para argilas de adsorção iônica brasileiras.

A estruturação do fundo de capital misto no modelo CBMM (OE 6.3) é o mecanismo que resolve o risco de demanda de longo prazo para a refinaria: ao ter fabricantes de ímãs como acionistas-clientes cativos, a planta tem garantia de compra que nenhum banco comercial financiaria sem.

A janela de revisão de 2030 é um elemento estrutural do Mapa do Caminho Estratégico, não uma formalidade. Em 2030, quatro anos após o início do *roadmap*, o CNMCE deverá avaliar sistematicamente os indicadores de todas as seis dimensões e ajustar metas, prazos e prioridades em função do cenário de referência vigente. Se o Cenário 2, "Corrida Verde", tiver se materializado parcialmente, com maior cooperação tecnológica internacional e preços de TR mais estáveis, algumas ações do H2 e H3 podem ser antecipadas. Se o Cenário 1 tiver se aprofundado além do esperado — com restrições chinesas mais severas e competição geopolítica mais intensa —, algumas ações do H2 (2031–2035) precisarão ser aceleradas.

3.5.3 Horizonte de longo prazo (2036–2040): H3 – Consolidação industrial e maior protagonismo internacional

O horizonte de longo prazo (2036–2040) é aquele em que os investimentos dos dois horizontes anteriores produzem retorno sistêmico pleno: a cadeia integrada opera em escala comercial, o Brasil captura ao menos 40% do valor potencial de seus depósitos via processamento doméstico, o programa de reciclagem de ímãs pós-consumo é lançado e o maior protagonismo internacional em governança de minerais críticos se consolida. A meta de captura de 40% do valor potencial (OE 4.5) é o indicador síntese deste horizonte: ela só é atingível se os quatro elos anteriores — mineração, concentração, separação e produção de metais/ímãs — estiverem todos em operação em escala relevante.

O Programa de Reciclagem de TR (OE 3.4) emerge neste horizonte por uma razão estrutural: os primeiros veículos elétricos vendidos no Brasil em escala relevante (a partir de 2027–2029) chegarão ao fim de sua vida útil entre 2037 e 2042, criando um fluxo de retorno de ímãs NdFeB que o Brasil precisará ser capaz de processar domesticamente. Em 2040, a reciclagem não substituirá a mineração primária, pois o volume é ainda pequeno relativamente à demanda, mas estabelecerá a infraestrutura e a regulamentação que se tornarão estrategicamente decisivas na segunda metade do século.

A participação relevante em iniciativas multilaterais (OE 5.5) neste horizonte não é retórica: é o resultado natural de um Brasil que, em 2040, produz Dy e Tb em escala industrial, tem acordos de *offtake* ativos com EUA, UE e Japão simultaneamente, e preservou sua autonomia de não alinhamento exclusivo. Esse perfil transforma o Brasil no árbitro regulatório mais legítimo para a agenda de governança de minerais críticos do Sul Global — o país que comprova, com dados de produção e acordos em vigor, que é possível ser soberano, responsável e multilateral ao mesmo tempo.

3.5.4 Quadro consolidado do Mapa do Caminho Estratégico

O Quadro 3.4 consolida as ações estratégicas dos três horizontes temporais, com indicação dos atores principais responsáveis pela execução e dos indicadores de resultado que permitirão o monitoramento pelo CNMCE. Os horizontes representam uma sequência lógica de maturação tecnológica e industrial e não um cronograma vinculante de execução.

Quadro 3.4: Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de TR no Brasil: 2026–2040 — ações, atores e indicadores por horizonte temporal

Ação estratégica	Horizonte	Atores principais	Indicador de resultado
H1 — Fundações institucionais e ativação dos primeiros elos da cadeia (2026–2030)			
Aprovação do marco regulatório consolidado de minerais estratégicos, com prazo máximo de licenciamento, metas vinculantes de beneficiamento e proteção ao investimento de longo prazo.	2026–2027	Congresso Nacional, MME, Casa Civil.	Lei publicada; prazo máximo de licenciamento definido em lei.
Instalação e operacionalização do CNMCE com mandatos fixos, como órgão coordenador permanente da política de minerais críticos.	2026	Presidência da República, MME	Decreto publicado; CNMCE instalado com membros empossados e secretaria-executiva estruturada.
Constituição da entidade operacional de Estado para minerais críticos, com mandato legal para assinar contratos de <i>offtake</i> soberanos e acordos de transferência tecnológica.	2027–2028	MME, Casa Civil, BNDES, INB	Entidade constituída; mandato legal aprovado; equipe técnica núcleo contratada.
Conversão das cartas de interesse do Ex-Im Bank (USD 715 milhões para Serra Verde e Caldeira) em contratos definitivos de <i>offtake</i> com cláusula de <i>floor price</i> para Dy e Tb.	2026–2027	MRE, MME, entidade operacional, Serra Verde, Caldeira/Meteoric	Contratos assinados; valor comprometido confirmado; datas de primeiro embarque definidas.
Negociação e assinatura de acordo bilateral tipo Projeto Caremag com parceiro japonês, francês ou coreano: tecnologia de separação de Dy e Tb em troca de <i>offtake</i> soberano de longo prazo.	2026–2028	MRE, MME, entidade operacional, JOGMEC/JBIC, Orano/BRGM, KOTRA/KORES	Acordo assinado; local da refinaria definido; termos de transferência tecnológica aprovados
Conclusão da <i>Strategic Partnership</i> UE–Brasil para minerais críticos, com ETRPs incluídos nos projetos	2026–2027	MRE, MME, Comissão Europeia	Partnership assinada; primeiro projeto de ETRS brasileiro reconhecido

Ação estratégica	Horizonte	Atores principais	Indicador de resultado
estratégicos do CRMA e acesso ao <i>RESourceEU Action Plan</i> .			como Strategic Project pela Comissão
Programa emergencial de caracterização analítica elementar (Nd, Pr, Dy, Tb) dos cinco depósitos prioritários: Serra Verde, Caldeira, Colossus, Aclara e Viridis.	2026–2028	CETEM, SGB/CPRM, empresas operadoras, MCTI	Perfis elementares publicados; dados abertos para negociação de acordos de <i>offtake</i> ; metodologia ABNT certificada
Implantação da planta-piloto nacional de separação hidrometalúrgica de ETRPs no CETEM, atingindo TRL 6 para separação de Dy e Tb de argilas de adsorção iônica	2026–2028	CETEM, FINEP, MCTI, UFOP, USP	Planta-piloto operacional; TRL 6 documentado; custo de separação $\leq$ USD 50/kg Dy equivalente.
Aprovação do PlanGeo 2025–2034 com orçamento plurianual garantido em lei e prioridade para mapeamento da Amazônia	2026–2027	Congresso, SGB/CPRM, MME	Dotação plurianual aprovada; primeiro lote de regiões amazônicas mapeadas.
Negociação de mecanismo de <i>floor price</i> para Dy e Tb em todos os contratos de <i>offtake</i> soberanos; habilitação do FSMC como instrumento anticíclico complementar.	2026–2028	MME, entidade operacional, FSMC, parceiros bilaterais	<i>Floor price</i> de Dy e Tb definido em todos os contratos; regulamento do FSMC como instrumento anticíclico publicado.
Programa emergencial de formação de recursos humanos em metalurgia de TR: 50 bolsas de doutorado e 150 de mestrado em parceria com CETEM, UFOP, USP e institutos estrangeiros.	2027–2028	CAPES, CNPq, CETEM, MCTI, universidades parceiras	200 bolsas concedidas; primeiros cursos de especialização em hidrometalurgia de TR iniciados.
Entrada em operação da primeira refinaria nacional de separação de ETRPs, com tecnologia transferida por parceiro bilateral e capacidade	2029–2031	Entidade operacional, parceiro bilateral, BNDES, FINEP	Primeira tonelada de Dy ₂ O ₃ e Tb ₄ O ₇ separadas domesticamente;

Ação estratégica	Horizonte	Atores principais	Indicador de resultado
inicial de 1.000 t/ano de óxidos de Dy, Tb, Nd e Pr.			certificação de pureza emitida.
Primeiro contrato de <i>offtake</i> soberano de ETRPs separados (Dy e Tb em óxido de alta pureza) com comprador estrangeiro; primeiro embarque de produto de alto valor agregado.	2030	Entidade operacional, MRE, compradores soberanos (Japão, Coreia do Sul, EU)	Contrato assinado; primeiro embarque realizado; receita de exportação de óxido separado iniciada.
Terceiro projeto de mineração de TR de argilas de adsorção iônica em operação comercial; capacidade total de mineração superior a 5.000 t/ano de concentrado misto.	2029–2031	MME, entidade operacional, empresas operadoras, BNDES	Terceiro projeto licenciado e em produção; capacidade total de concentrado confirmada
Implantação do laboratório nacional de caracterização, certificação e rastreabilidade de ímãs NdFeB, credenciado internacionalmente para atender ao CRMA europeu e ao IRA norte-americano	2029–2031	CETEM, MCTI, parceiro industrial de ímãs, INMETRO	Laboratório credenciado; primeiros certificados de rastreabilidade emitidos para exportação
Cobertura de 20% do território amazônico mapeado em 1:100.000; identificação de novos depósitos de TR de argila iônica em Seis Lagos, Pitinga e Presidente Figueiredo.	2030	SGB/CPRM, MME	Meta intermediária do PlanGeo atingida; relatórios de potencial publicados; áreas prioritárias para licitação identificadas
Mobilização de R\$ 10 bilhões em financiamento BNDES/FINEP para a cadeia integrada de TR; estruturação de fundo de capital misto no modelo CBMM com participação de fabricantes internacionais de ímãs.	2029–2030	BNDES, FINEP, entidade operacional, fabricantes de ímãs internacionais	R\$ 10 bi comprometidos; fundo de capital misto constituído com parceiros-clientes como acionistas
Revisão e atualização do <i>Roadmap</i> ao cenário de referência vigente em 2030: ajuste de metas, prazos e	2030	CNMCE, MME, MRE, entidade operacional	Relatório de avaliação do <i>Roadmap</i> publicado; ajustes aprovados pelo

Ação estratégica	Horizonte	Atores principais	Indicador de resultado
prioridades pelo CNMCE com base no monitoramento dos indicadores.			CNMCE e comunicados ao Congresso.
Lançamento do Programa Nacional de Certificação Ambiental de TR: desenvolvimento de metodologia ACV para argilas iônicas (CETEM/IBICT), extensão da acreditação do INMETRO ao segmento de TR e inclusão de cláusula de apoio técnico à certificação em todos os acordos bilaterais (OEs 5.1, 5.2 e 5.3).	2026–2028	CETEM, IBICT, INMETRO, MRE, entidade operacional	Metodologia ACV submetida à Comissão Europeia para reconhecimento; cláusula de certificação incluída em todos os acordos bilaterais assinados.
Regulamentação operacional do FSMC como mecanismo anticíclico: publicação do regulamento que define os gatilhos de ativação do Fundo quando o preço de mercado cair abaixo do <i>floor price</i> soberano negociado.	2027–2028	MME, STN, CNMCE, entidade operacional	Regulamento do FSMC publicado; gatilho de ativação anticíclico testado em simulação com cenário de risco de redução significativa dos preços internacionais.

Ação estratégica	Horizonte	Atores principais	Indicador de resultado
H2 — Escalonamento rumo à consolidação industrial (2031–2035)			
Meta de formação de recursos humanos: 500 especialistas em TR e 50 doutores em separação e ímãs formados; rede nacional de pesquisa em TR operacional.	2031–2032	CAPES, CNPq, CETEM, MCTI, universidades	Metas de formação atingidas; rede de pesquisa com ao menos 10 grupos credenciados operacional
Segunda refinaria de ETRPs em operação; capacidade total instalada de ao menos 3.000 t/ano de óxidos de ETRPs; Brasil consolidado entre os três maiores produtores de ETRPs fora da China.	2033–2035	Entidade operacional, parceiros bilaterais, BNDES	Segunda refinaria operacional; 3.000 t/ano de óxidos de ETRS certificados; participação de mercado publicada pelo CNMCE
Implantação e operacionalização de planta nacional de ímãs NdFeB sinterizados com capacidade inicial de ao menos 500 t/ano e ao menos 30% de conteúdo nacional; demanda de defesa como mercado âncora	2033–2036	Entidade operacional, parceiro fabricante de ímãs, Ministério da Defesa, BNDES	Planta operacional; primeiro lote de ímãs 100% nacionais entregue ao Ministério da Defesa

Cobertura de 40% da Amazônia mapeada em 1:100.000; novos blocos de TR de argila iônica licitados com exigência de 60% de beneficiamento doméstico como condição de concessão	2034	SGB/CPRM, MME, CNMCE	Meta do PlanGeo atingida; ao menos dois novos blocos licitados com cláusula de beneficiamento
Publicação do Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de TR no Brasil: 2040–2055, incorporando a segunda geração de depósitos amazônicos e os elos de reciclagem e componentes de alta tecnologia	2035	CNMCE, MME, MCTI, MRE	Roadmap 2040–2055 publicado; processo de consulta pública realizado; validação pelo CNMCE registrada
H3 — Consolidação industrial e maior protagonismo internacional (2036–2040)			
Captura de ao menos 40% do valor potencial da cadeia nacional de TR via processamento doméstico; participação da exportação de concentrado bruto reduzida para menos de 30% do total	2038–2040	Cadeia produtiva integrada, CNMCE, entidade operacional	Índice de valor capturado publicado anualmente pelo CNMCE; meta de 40% confirmada
Implantação do programa nacional de reciclagem de TR de ímãs permanentes pós-consumo, recuperando neodímio, praseodímio, disprosio e térbio de veículos elétricos e turbinas de primeira geração	2035–2040	MCTI, CETEM, indústria automotiva, ANTT, IBAMA	Capacidade de recuperação de ao menos 200 t/ano de TR recicladas instalada; regulamentação de descarte publicada
Liderança do Brasil na agenda multilateral de minerais críticos do Sul Global: proposta de mecanismo de governança no G20, BRICS e CELAC, com o Brasil como árbitro regulatório	2036–2040	MRE, CNMCE, representações multilaterais	Proposta brasileira de governança de minerais críticos formalmente apresentada no G20; documento de política adotado pelo CELAC

Nota: Atores: CNMCE = Conselho Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos; FSMC = Fundo Soberano de Minerais Críticos; CETEM = Centro de Tecnologia Mineral; SGB/CPRM = Serviço Geológico do Brasil; JBIC = Japan Bank for International Cooperation; BRGM = Bureau de Recherches Géologiques et Minières; DFC = U.S. International Development Finance Corporation; KORES = Korea Resources Corporation.

3.6 Governança e Coordenação da Estratégia Nacional de Terras Raras

A implementação bem-sucedida de uma estratégia nacional para terras raras exige coordenação permanente entre órgãos governamentais, instituições científicas, setor produtivo e agentes financeiros. A experiência internacional demonstra que a simples existência de recursos minerais ou competências tecnológicas isoladas não é suficiente para garantir o desenvolvimento de cadeias produtivas estratégicas. O fator determinante é a capacidade de articulação entre os diferentes atores envolvidos.

Considerando a natureza transversal das terras raras — envolvendo mineração, processamento químico, metalurgia, manufatura avançada, defesa, transição energética e inovação tecnológica — recomenda-se a adoção de uma estrutura de governança capaz de integrar planejamento, execução, monitoramento e atualização contínua da estratégia nacional.

A arquitetura institucional proposta está organizada em três níveis complementares:

1. Nível Estratégico: Conselho Nacional de Terras Raras e Minerais Críticos;
2. Nível Executivo: Comitê Executivo Interministerial;
3. Nível Operacional: Grupos Temáticos Permanentes.

Essa estrutura busca garantir alinhamento estratégico, coordenação institucional e execução eficiente das ações previstas no Mapa do Caminho Estratégico 2026–2040.

3.7 Agenda Nacional para 2026–2030

A materialização da visão estratégica apresentada neste *roadmap* exige a tradução dos objetivos de longo prazo em iniciativas concretas de curto e médio prazo. Embora o horizonte 2026–2040 estabeleça a trajetória desejada para o desenvolvimento da cadeia brasileira de terras raras, os próximos cinco anos serão decisivos para criar as condições institucionais, tecnológicas, produtivas e financeiras necessárias à sua implementação.

A experiência internacional demonstra que países que conseguiram avançar da condição de detentores de recursos minerais para protagonistas industriais o fizeram por meio de ações coordenadas, investimentos consistentes e mecanismos permanentes de governança.

Nesse contexto, esta agenda nacional de ações para o período 2026–2030 reúne um conjunto de medidas prioritárias organizadas em torno dos principais eixos estratégicos identificados ao longo deste estudo. As ações propostas buscam fortalecer a governança nacional, ampliar o conhecimento geológico, viabilizar capacidades industriais de separação, refino e metalurgia, estimular a inovação, formar recursos humanos especializados, atrair investimentos e promover a inserção das terras raras nas políticas industriais, tecnológicas, ambientais e de defesa do país.

Em conjunto, essas iniciativas constituem a base operacional para transformar o potencial brasileiro em capacidades produtivas concretas, aumentando a competitividade nacional e reduzindo vulnerabilidades estratégicas em setores críticos para o desenvolvimento econômico e tecnológico.

Os eixos estratégicos, ações prioritárias, bem como o órgão responsável, parceiros estratégicos e prazos correspondentes são mostrados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 Agenda Nacional de Ação 2026–2030.

Eixo Estratégico	Ação Prioritária	Responsável Líder	Parceiros Estratégicos	Prazo
Governança	Instituir o Comitê Nacional de Terras Raras e Minerais Críticos	Casa Civil	MCTI, MME, MDIC, MRE, MMA, MD, BNDES	2026
Governança	Implantar Observatório Nacional de Terras Raras	MCTI	CGEE, CETEM, IBRAM, ABDI	2026–2027

Regulação	Harmonizar procedimentos de licenciamento para projetos estratégicos	MME	MMA, IBAMA, ANM, estados	2026–2028
Conhecimento Geológico	Ampliar o mapeamento geológico de depósitos de terras raras	MME	SGB, CPRM, universidades	2026–2030
Mineração	Apoiar projetos de mineração de terras raras em estágio avançado	MME	BNDES, FINEP, bancos regionais	2026–2030
Separação e Refino	Implantar a primeira planta industrial nacional de separação de terras raras	MME	MCTI, BNDES, setor privado	2026–2030
Separação e Refino	Estruturar capacidade nacional de refino de óxidos individuais de alta pureza	MCTI	CETEM, IPT, empresas	2027–2030
Metalurgia	Desenvolver capacidade nacional de produção de metais de terras raras	MDIC	MCTI, empresas industriais	2027–2030
Metalurgia	Implantar capacidade piloto para produção de ligas magnéticas	MDIC	SENAI, IPT, empresas	2027–2030
Magnetos	Lançar Programa Brasileiro de Magnetos Permanentes	MCTI	MDIC, FINEP, EMBRAPII, universidades	2026–2027
Magnetos	Implantar planta piloto nacional de magnetos NdFeB	MDIC	Empresas, SENAI, EMBRAPII	2028–2030
Inovação	Criar Rede Nacional de Pesquisa em Terras Raras	MCTI	CNPq, CAPES, FAPs, universidades	2026
Inovação	Financiar projetos estratégicos de P&D em separação, metais e ímãs	FINEP	CNPq, EMBRAPII, BNDES	2026–2030
Recursos Humanos	Implantar programa nacional de formação de especialistas	MCTI	MEC, CAPES, SENAI, universidades	2026–2030
Financiamento	Criar linha dedicada para minerais críticos e terras raras	BNDES	FINEP, bancos regionais	2026
Financiamento	Estruturar Fundo de Desenvolvimento da Cadeia de Terras Raras	MCTI	BNDES, FNDCT, setor privado	2027
Cooperação Internacional	Firmar acordos tecnológicos com EUA, Japão, União Europeia e Austrália	MRE	MCTI, MDIC, MME	2026–2030

Cooperação Internacional	Atrair investimentos para processamento e manufatura avançada	MDIC	ApexBrasil, BNDES, Invest Brasil	2026–2030
Defesa	Inserir terras raras e magnetos entre as prioridades da Base Industrial de Defesa	MD	MCTI, MDIC, empresas estratégicas	2026–2028
Economia Circular	Implantar programa nacional de reciclagem de magnetos e resíduos eletrônicos	MMA	MDIC, MCTI, setor privado	2027–2030
Sustentabilidade	Estabelecer padrões ESG e rastreabilidade para a cadeia nacional	MMA	MME, MDIC, setor produtivo	2027–2030
Mercado	Desenvolver mecanismos de compras governamentais para produtos estratégicos contendo terras raras	MDIC	Defesa, Energia, Saúde	2028–2030
Monitoramento	Publicar relatório anual de acompanhamento da Estratégia Nacional de Terras Raras	Comitê Nacional	CGEE, MCTI, MME	Anual

3.8 Condicionantes críticos e riscos de execução

A efetividade de qualquer instrumento de planejamento estratégico de longo prazo está condicionada à materialização de um conjunto de fatores que transcendem o escopo de controle direto dos atores responsáveis por sua execução.

A experiência comparada em políticas de minerais críticos, da Austrália ao Japão, dos EUA à União Europeia, demonstra que a distância entre a formulação e a implementação de *roadmaps* estratégicos é determinada menos pela qualidade técnica do documento e mais pela presença ou ausência de condicionantes estruturais que nenhum instrumento de planejamento pode, por si só, garantir.

O presente **Mapa do Caminho Estratégico** identifica sete condicionantes críticos, aqueles cuja ausência ou deterioração tornaria os objetivos estratégicos inalcançáveis independentemente da qualidade das demais ações, e os submete a análise sistemática. Para cada condicionante, identificam-se: a resposta estrutural prevista no próprio, o indicador de alerta precoce que sinaliza deterioração antes que ela se torne irreversível, e a janela de revisão em que o CNMCE deverá avaliar a necessidade de ajuste de curso.

Continuidade institucional acima dos ciclos eleitorais

Este é o condicionante mais importante e o menos controlável no curto prazo. A experiência comparada é inequívoca: a Austrália construiu sua cadeia de TR ao longo de quatro governos com orientações políticas distintas, sem interrupção de programas estruturantes; os EUA levaram três anos para aprovar o *Inflation Reduction Act*, mas uma vez aprovado, seus mecanismos de *floor price* e financiamento do US DoD operaram de forma continuada, independentemente de ciclos eleitorais. No Brasil, a descontinuidade de

política industrial entre governos tem sido historicamente o principal destruidor de projetos de infraestrutura estratégica — dos reatores nucleares de Angra ao Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB), as descontinuidades custaram décadas e bilhões. O CNMCE com mandatos fixos de membros e o FSMC como fundo patrimonial de Estado — e não como dotação orçamentária anual contingente à Lei de Responsabilidade Fiscal — são os mecanismos institucionais projetados para mitigar esse risco. Sua criação por lei (OE 1.2 e OE 1.4) é, por essa razão, a ação de maior urgência do horizonte de curto prazo: enquanto não existirem em lei, o risco de descontinuidade permanece em seu nível máximo e nenhum parceiro internacional comprometido com acordos de 15 a 20 anos confiará na palavra de um governo que pode ser substituído em 2026. O indicador de alerta é direto: qualquer proposta de extinção, fusão ou esvaziamento orçamentário do CNMCE ou do FSMC deve acionar protocolo de resposta imediata pelo CNMCE junto ao Congresso Nacional.

Redução significativa dos preços internacionais

A China tem demonstrado capacidade e disposição de deprimir temporariamente os preços de TR para inviabilizar projetos concorrentes, impondo pressão competitiva decorrente da sua capacidade excedente. O episódio mais documentado ocorreu entre 2012 e 2016: após perder a disputa na OMC sobre as cotas de exportação, a China abandonou os controles formais e adotou estratégia oposta, inundou o mercado com produção subsidiada, derrubando o preço do NdPr de USD 130/kg para USD 40/kg em menos de quatro anos, eliminando ou atrasando projetos em todo o mundo, incluindo a segunda falência de Mountain Pass em 2017. A crise de Mianmar em 2024 e os controles de exportação de abril de 2025 mostraram que a China não abandonou os instrumentos de pressão, apenas os tornou mais sofisticados. O mecanismo de *floor price* soberano (OE 5.4) e o FSMC como instrumento anticíclico (OE 1.4) são as respostas estruturais a esse risco. O modelo mais avançado em operação é o contrato entre o DoD norte-americano e a MP Materials: USD 110/kg de NdPr garantido mesmo quando o mercado spot estava em USD 50–60/kg, um prêmio de segurança de suprimento que o governo norte-americano considerou justificado. Em março de 2026, a Japan Australia Rare Earths B.V. (JARE), um *joint venture* do JOGMEC com a Sojitz, adotou estrutura análoga com a Lynas, fixando *floor price* de USD 110/kg de NdPr até 2038 (METAL TECH NEWS, 2026; SMM, 2026). Esses dois contratos contemporâneos demonstram que está emergindo um padrão de mercado ocidental para floor prices soberanos, e o Brasil deve negociar mecanismos análogos para Dy e Tb antes que esse padrão se consolide sem ele. O indicador de alerta é o preço spot de NdPr caindo abaixo de USD 60/kg por mais de três meses consecutivos, sinalizando possível campanha de deflação estratégica.

Disponibilidade de parceiro tecnológico com transferência real de *know-how*

O modelo Caremag (Seção 1.5.3) demonstra disposição de parceiros com tecnologia de separação de ETRPs a investir capital e transferir know-how em troca de offtake soberano de longo prazo. Essa disposição, porém, não é incondicional.

Existem três restrições práticas que o *Roadmap* precisa navegar. Primeira: a China proibiu explicitamente, desde dezembro de 2023, a exportação de tecnologia de fabricação de ímãs NdFeB, o que significa que o único parceiro capaz de transferir essa tecnologia é um ator não chinês, tipicamente japonês ou europeu, e que a janela de acesso depende do alinhamento geopolítico do momento. Segunda: parceiros com

tecnologia avançada (Shin-Etsu, TDK, Proterial, Carester) transferem *know-how* de segunda linha, não o estado da arte, como documentado para a *joint venture* japonesa na Índia, em Visakhapatnam, que permanece em escala piloto e não forneceu as técnicas de separação de alto rendimento.

O acordo bilateral tipo Caremag (OE 5.3) precisa incluir cláusula explícita de transferência de tecnologia de estado da arte e benchmarking de desempenho comparado com a planta-mãe, não apenas licenciamento de tecnologia de geração anterior. Terceira: a planta-piloto no CETEM (OE 3.1) é pré-condição para qualquer negociação séria de transferência: nenhum parceiro tecnológico transferirá sua expertise para um país sem equipe técnica demonstravelmente capaz de operacionalizá-la. O indicador de alerta é a ausência de proposta formal de acordo bilateral tipo Caremag até o final de 2027, sinal de que o Brasil não está sendo percebido como parceiro viável pelos detentores de tecnologia.

Substituição tecnológica

Conforme contexto analisado neste estudo, três tecnologias substitutivas estão em desenvolvimento ativo: ligas de ferro-nitreto (FeN), tetraenita (FeNi) e motores de relutância chaveada (SRM). Nenhuma apresenta viabilidade comercial plena no horizonte de 2035 com alta confiança, as ligas FeN ainda enfrentam desafios de estabilidade térmica; a tetraenita requer síntese que ainda não foi escalonada além do laboratório; os motores SRM têm densidade de potência inferior para aplicações de alto desempenho.

No entanto, avanços acima do esperado reduziram estruturalmente a demanda por Dy e Tb, os elementos de maior valor unitário sobre os quais o Roadmap concentra a estratégia de separação. Há também o vetor da eficiência: a tecnologia GBD (Grain Boundary Diffusion), patenteada pela Shin-Etsu, já reduziu o consumo de Dy por ímã em 20–30% com viabilidade comercial estabelecida, e seus sucessores de segunda geração podem aprofundar essa redução no horizonte 2030–2035.

O CNMCE deve monitorar sistematicamente o avanço do TRL dessas tecnologias e incluir análise de sensibilidade nas revisões do Roadmap em 2030 e 2035. Se o TRL 7 de qualquer substituto relevante for atingido antes de 2033, a estratégia de entrada no elo de ímãs NdFeB precisará ser revista, com possível reorientação para aplicações de maior durabilidade de demanda, como defesa e saúde, menos sensíveis à substituição tecnológica de mercado de massa. O indicador de alerta é qualquer anúncio de investimento em capacidade de produção industrial de FeN ou tetraenita superior a 1.000 t/ano por parte de fabricantes de ímãs japoneses ou europeus.

Prazo de licenciamento ambiental

O Brasil tem o maior prazo médio de licenciamento mineral do mundo ocidental: 17,2 anos entre descoberta e produção, contra 15,5 anos como média global e 14,0 anos na Austrália (S&P GLOBAL, 2025; CEBRI, 2025). Projetos que não iniciaram o processo de licenciamento em 2025–2026 não estarão em produção de separação antes de 2033–2035.

O marco regulatório de 2027 (OE 1.1) deve incluir obrigatoriamente:

- i. prazo máximo de 36 meses para o licenciamento de plantas de processamento de minerais estratégicos, análogo ao prazo de 27 meses estabelecido pelo *Critical Raw Materials Act* da UE para projetos estratégicos;

- ii. licença integrada que permita avançar exploração e licenciamento ambiental em paralelo, eliminando a serialização atual; e
- iii. criação de câmara de resolução integrada com participação do MME, IBAMA e Ministério da Defesa, para projetos classificados como estratégicos pelo CNMCE.

A experiência australiana com o modelo de aprovação de projetos estratégicos da Geoscience Australia, que reduziu o prazo médio de 14 para 9 anos nos projetos de minerais críticos, é a referência mais direta. O indicador de alerta é o prazo médio de licenciamento para projetos de TR permanecendo acima de 36 meses após a aprovação do marco regulatório de 2027, sinalizando que a reforma legal não se traduziu em mudança administrativa efetiva. O desafio consiste em conciliar previsibilidade regulatória, segurança jurídica e proteção ambiental.

Capacidade técnica em separação hidrometalúrgica

O Brasil tem capacidade científica consolidada em geologia, metalurgia de base e engenharia de materiais, mas altamente concentrada em segmentos distintos da separação de ETRPs. O CETEM tem experiência relevante em hidrometalurgia de monazita desde os anos 1980, mas não em separação de argilas de adsorção iônica em escala industrial, que exige química de extração por solvente adaptada a minérios de baixo teor e alta variabilidade composicional.

A escassez de especialistas é severa: estimativas do próprio CETEM indicam que menos de 50 pesquisadores no Brasil têm formação específica em separação de ETRPs, insuficientes para operar uma refinaria industrial que tipicamente requer entre 80 e 120 técnicos e engenheiros especializados. O Programa de Formação de Recursos Humanos (OE 3.2) é uma das ações de maior prazo do Mapa do Caminho Estratégico, os primeiros doutores formados no programa iniciado em 2027 estarão disponíveis apenas em 2031–2032, criando um gargalo de capital humano justamente na fase de operação inicial da refinaria (2029–2031). A solução parcial para esse gap é dupla: primeiro, incluir no acordo bilateral tipo Caremag (OE 5.3) obrigação contratual de treinamento de técnicos brasileiros in loco na planta parceira durante os primeiros cinco anos de operação; segundo, estruturar bolsas de sanduíche e estágio técnico em plantas operacionais LAMP da Lynas na Malásia, Caremag na França e MP Materials na Califórnia, para técnicos brasileiros que operarão a refinaria nacional.

O indicador de alerta é o número de especialistas em separação hidrometalúrgica de ETRPs formados ou em formação no Brasil ficar abaixo de 100 até 2030, inviabilizando a operação da refinaria sem dependência integral de equipe estrangeira.

Diversificação de parcerias internacionais e o risco de exclusividade

O Mapa do Caminho Estratégico pressupõe que o Brasil preserve margem de neutralidade estratégica: a capacidade de negociar simultaneamente com EUA, Japão, UE e, seletivamente, com a China. Essa neutralidade é, ao mesmo tempo, o maior ativo de barganha e o maior risco de execução.

Dois vetores ameaçam-na de direções opostas. O primeiro é a pressão ocidental por exclusividade: o interesse do Ex-Im Bank em Serra Verde e Caldeira, os acordos com o JOGMEC e a *Strategic Partnership* com a UE virão acompanhados de condicionalidades implícitas ou explícitas de afastamento da China. O

segundo é a atração russa via Rosatom: o acordo firmado em março de 2026 entre a Uranium One Group (Rosatom) e a NBEPar para a criação da Nadina Minerals, destinada à prospecção de minerais estratégicos no Brasil (CNN Brasil, 2026; Gazeta do Povo, 2026), abre uma linha de cooperação com ator profundamente integrado ao complexo militar russo e sujeito a sanções ocidentais crescentes (Bruegel, 2025; CSIS, 2026).

Qualquer aprofundamento tecnológico dessa parceria no segmento de minerais críticos implicaria riscos concretos de acesso a mercados e financiamento do bloco ocidental que o Brasil não pode ignorar, precisamente os mercados de maior valor para os ETRPs processados.

A geometria ideal para o Brasil é a documentada no Capítulo 1 (Seção 1.6.8, Prioridade 7): manter relações comerciais normais com a China para TR leves e concentrados; assinar acordos estruturantes de *offtake* com EUA, Japão e UE para o elo de separação; e gerir a parceria com atores do Sul Global, inclusive Rússia, no nível comercial de mineração, sem comprometer o acesso ao financiamento e à tecnologia ocidentais.

O indicador de alerta é qualquer cláusula de exclusividade de fornecimento inserida em contratos bilaterais, seja por parceiros ocidentais, seja por parceiros do Sul Global, que restrinja a capacidade do Brasil de negociar simultaneamente com múltiplos compradores soberanos.

O Quadro 3.5 sintetiza os sete condicionantes, as respostas estruturais previstas no Mapa do Caminho e os indicadores de alerta precoce correspondentes.

Quadro 3.5: Condicionantes críticos do Mapa do Caminho Estratégico: respostas estruturais e indicadores de alerta precoce

Condicionante	Resposta estrutural	Indicador de alerta precoce
Continuidade institucional	CNMCE com mandatos fixos; FSMC como fundo patrimonial por lei	Proposta de extinção ou esvaziamento do CNMCE/FSMC
Deflação estratégica chinesa	<i>Floor price</i> soberano (OE 5.4); FSMC anticíclico (OE 1.4)	NdPr spot abaixo de USD 60/kg por mais de 3 meses
Parceiro tecnológico com transferência real	Acordo tipo Caremag (OE 5.3) com cláusula de tecnologia de estado da arte	Ausência de proposta formal até 2027
Substituição tecnológica	Monitoramento de TRL; revisões do <i>Roadmap</i> em 2030 e 2035	TRL 7 de substituto atingido antes de 2033
Prazo de licenciamento	Marco regulatório com prazo máximo (OE 1.1); licença integrada	Prazo médio acima de 36 meses após 2027
Capacidade técnica humana	Bolsas emergenciais (OE 3.2); treinamento in loco no parceiro bilateral	Menos de 100 especialistas em formação até 2030
Geometria geopolítica das parcerias	Diplomacia mineral ativa (OE 5.5); neutralidade estratégica contratualizada	Cláusula de exclusividade em qualquer contrato bilateral

A implementação de uma estratégia nacional para terras raras envolve horizontes temporais longos, elevados investimentos de capital, forte dependência tecnológica e interação entre múltiplos atores públicos e privados. Além disso, o setor está inserido em um contexto internacional marcado por crescente competição geopolítica, rápida evolução tecnológica, volatilidade de mercados e mudanças regulatórias.

Nesse cenário, a construção de capacidades nacionais ao longo da cadeia produtiva exige não apenas uma visão estratégica clara, mas também a identificação antecipada dos fatores que podem comprometer o alcance dos objetivos estabelecidos no Mapa do Caminho Estratégico 2026–2040.

Com o objetivo de fortalecer a governança da estratégia e apoiar o processo de tomada de decisão, o Quadro 3.6 apresenta uma Matriz de Riscos. A matriz identifica os principais riscos associados às dimensões institucional, regulatória, tecnológica, financeira, ambiental, geopolítica e industrial, avaliando seus potenciais impactos e propondo medidas de mitigação. Mais do que um instrumento de controle, a análise de riscos constitui uma ferramenta de gestão estratégica, permitindo antecipar desafios, orientar prioridades de ação e aumentar a resiliência da cadeia nacional frente às incertezas inerentes a um setor de elevada relevância para a competitividade, a inovação e a soberania tecnológica do país.

Quadro 3.6. Matriz de Riscos para a Implementação do Mapa do Caminho Estratégico para Terras Raras (2026–2040)

Categoria	Risco	Probabilidade	Impacto	Consequências Potenciais	Estratégias de Mitigação
Governança	Descontinuidade de políticas públicas entre governos	Alta	Muito Alto	Interrupção de programas, perda de investimentos e redução da confiança dos agentes econômicos	Institucionalização da Estratégia Nacional e criação de Comitê Permanente
Governança	Falta de coordenação entre órgãos federais e estaduais	Média	Alto	Sobreposição de ações, atrasos e ineficiência na implementação	Comitê Interministerial e Observatório Nacional
Regulação	Morosidade no licenciamento ambiental	Alta	Alto	Atrasos em projetos de mineração e processamento	Harmonização regulatória e procedimentos específicos para minerais críticos
Financiamento	Insuficiência de recursos para projetos intensivos em capital	Média	Muito Alto	Não implantação de plantas de separação, refino e metalurgia	Linhas dedicadas do BNDES, FINEP e fundos de desenvolvimento
Mercado	Queda acentuada dos preços internacionais	Média	Alto	Redução da atratividade econômica dos projetos	Diversificação de produtos e contratos de longo prazo
Mercado	Entrada de novos produtores globais	Média	Médio	Redução de competitividade brasileira	Foco em diferenciação tecnológica e sustentabilidade

Categoria	Risco	Probabilidade	Impacto	Consequências Potenciais	Estratégias de Mitigação
Geopolítico	Mudanças nas políticas comerciais internacionais	Média	Alto	Restrição de mercados ou aumento da competição internacional	Diversificação de parceiros e acordos estratégicos
Geopolítico	Intensificação da disputa EUA–China	Alta	Alto	Instabilidade nas cadeias globais e pressão por alinhamentos geopolíticos	Política externa pragmática e diversificação de alianças
Tecnológico	Dependência de tecnologias estrangeiras de separação e refino	Alta	Muito Alto	Vulnerabilidade tecnológica e limitação da agregação de valor	Programas de P&D, transferência tecnológica e capacitação nacional
Tecnológico	Atraso no desenvolvimento da indústria de magnetos	Média	Muito Alto	Permanência na exportação de produtos de baixo valor agregado	Programa Nacional de Magnetos e incentivos à manufatura
Recursos Humanos	Escassez de profissionais especializados	Alta	Alto	Gargalos operacionais e tecnológicos	Programas de formação, bolsas e cooperação universidade-indústria
Ambiental	Ocorrência de passivos ambientais em projetos minerais	Baixa	Alto	Perda de legitimidade social e atrasos regulatórios	Adoção de padrões ESG e monitoramento contínuo
Social	Resistência de comunidades locais a novos empreendimentos	Média	Médio	Judicialização e atrasos em projetos	Participação social e transparência desde a fase de planejamento
Cadeia Produtiva	Não implantação da capacidade nacional de separação	Média	Muito Alto	Manutenção da dependência externa para etapas críticas	Prioridade máxima para a primeira planta nacional
Cadeia Produtiva	Não consolidação da produção de metais e ligas	Média	Muito Alto	Interrupção da integração vertical da cadeia	Incentivos industriais e apoio à escala produtiva
Cadeia Produtiva	Falha na atração de investimentos internacionais	Média	Alto	Perda da janela de oportunidade global	Estratégia ativa de promoção internacional e segurança regulatória
Sustentabilidade	Falha na implementação da economia circular	Média	Médio	Dependência exclusiva da mineração primária	Programas nacionais de reciclagem e recuperação de materiais

Categoria	Risco	Probabilidade	Impacto	Consequências Potenciais	Estratégias de Mitigação
Inovação	Baixa interação entre academia e indústria	Média	Alto	Baixa conversão de conhecimento em produtos e processos	Redes de inovação, EMBRAPA e centros tecnológicos
Defesa	Dependência externa de magnetos para aplicações estratégicas	Alta	Alto	Vulnerabilidade em setores críticos de defesa e segurança	Desenvolvimento de fornecedores nacionais e compras governamentais
Monitoramento	Ausência de indicadores e acompanhamento contínuo	Média	Alto	Dificuldade de correção de rumos e avaliação de resultados	Sistema permanente de monitoramento e relatórios anuais

Embora o horizonte 2026–2040 estabeleça a trajetória desejada para a inserção do Brasil nos segmentos de maior valor agregado da cadeia de terras raras, os próximos cinco anos serão determinantes para definir se o país conseguirá capturar a oportunidade atualmente aberta pela reconfiguração das cadeias globais de suprimento.

Nesse contexto, torna-se fundamental identificar prioridades imediatas, atribuir responsabilidades institucionais e organizar uma agenda de implementação capaz de alinhar governo, setor produtivo, academia e instituições financeiras em torno de objetivos comuns.

3.9 A escolha que o Mapa do Caminho Estratégico articula

O Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de Terras Raras no Brasil 2026–2040 não é uma lista de boas intenções. É um instrumento de escolha: entre exportar concentrado bruto indefinidamente, capturando menos de 5% do valor que os depósitos nacionais tornam possível, e construir com capital multilateral, transferência tecnológica e governança institucional estável a primeira cadeia integrada de ETRPs do Hemisfério Sul.

A concretização dessa escolha estratégica exige, contudo, mais do que visão de longo prazo. Requer a tradução dos objetivos do Mapa do Caminho Estratégico em ações coordenadas, investimentos direcionados e mecanismos permanentes de governança capazes de transformar potencial em capacidade produtiva efetiva.

Essa escolha tem prazo. O Cenário de Referência "Batalha pelos Elementos" é precisamente aquele em que a janela se fecha mais rapidamente: à medida que EUA, UE, Japão e Coreia do Sul consolidam suas cadeias alternativas de suprimento com Austrália, Canadá, África do Sul e outras fontes, a barganha brasileira diminui. O poder de negociação do Brasil é máximo agora, em 2026, quando os blocos ocidentais ainda não têm alternativa ao Dy e Tb de Mianmar e precisam urgentemente de uma nova fonte de argilas de adsorção iônica. Esse poder diminui a cada ano em que o Brasil não coloca em operação a capacidade de separação.

As oito prioridades do Capítulo 1 e os objetivos estratégicos das seis dimensões deste Capítulo convergem para um único ponto: nenhuma delas é tecnicamente nova ou institucionalmente impossível. Todas estão sendo executadas, com maior ou menor sucesso, por Austrália, EUA, Japão e França. O que diferencia esses países do Brasil não é a geologia, que é uma vantagem brasileira, nem a capacidade técnica e científica e nem o interesse multilateral, que é crescente e documentado. O que diferencia é a velocidade e a consistência da decisão política de Estado. A ampliação progressiva da agregação de valor doméstica representa uma das principais alternativas estratégicas identificadas.

Este Capítulo 3 define o que precisa ser decidido, por quem e em que prazo. Os capítulos subsequentes do Mapa do Caminho Estratégico aprofundam cada elo da cadeia: mineração e concentração (Capítulo 4), refino e separação de óxidos (Capítulo 11), ímãs permanentes de NdFeB (Capítulo 5), catalisadores (Capítulo 6), ligas metálicas (Capítulo 7), fósforos (Capítulo 8) e materiais para aplicações ópticas avançadas (Capítulo 9); com os *roadmaps* específicos de como construir cada elo. Todos eles partem do mesmo pressuposto: sem as fundações institucionais do horizonte de curto prazo (2026–2030), nenhum *roadmap* de elo específico terá as condições mínimas para ser executado.

BLOCO II — DIRECIONADORES

Sustentabilidade e as cinco cadeias setoriais

O Bloco II consolida os direcionadores estratégicos para as cinco cadeias produtivas de terras raras priorizadas pelo estudo — ímãs permanentes, catalisadores, ligas metálicas, fósforos e materiais para aplicações ópticas avançadas — precedidos do capítulo transversal sobre economia circular e sustentabilidade. Cada capítulo segue estrutura comparável: importância estratégica para o País, principais usos industriais, análise da cadeia produtiva, competência instalada no Brasil e visão de futuro com horizonte 2040. Os direcionadores aqui apresentados sustentam o desenho estratégico desenvolvido no Bloco III.

Capítulo 4

Direcionadores estratégicos para uma economia circular e sustentável de terras raras

4.1 Paradoxo das terras raras e impactos socioambientais

O paradoxo da cadeia de suprimentos de terras raras manifesta-se em duas dimensões convergentes, socioambiental e geológico-econômica, que desafiam a sustentabilidade estrutural do setor. Materiais essenciais à transição energética (Nd, Pr, Dy, Tb em turbinas eólicas, veículos elétricos, eficiência energética industrial) carregam passivos socioambientais relevantes em sua extração e processamento — uso intensivo de água, geração de rejeitos tóxicos, possível radioatividade — que precisam ser geridos para que os benefícios climáticos se concretizem.

Paralelamente, emerge o chamado “problema do balanço”: como os ETR ocorrem conjuntamente nos depósitos minerais, a oferta é determinada pela geologia, enquanto a demanda concentra-se em alguns poucos elementos de alto valor estratégico. Para atender à procura por neodímio e disprósio, por exemplo, é necessário extrair grandes volumes de elementos mais abundantes, como cério e lantânio, frequentemente sem mercado equivalente, gerando excedentes estruturais, ineficiências econômicas e ampliação dos passivos ambientais. A transição energética não elimina desafios ambientais; ela desloca parte deles para as cadeias de suprimento de minerais críticos.

Nas atividades industriais globais de mineração de ETR em operação destacam-se como os maiores causadores de impactos ambientais o uso intensivo de energia elétrica, a liberação de elementos radioativos e o emprego de produtos químicos ácidos. As atividades de mineração, como corte, perfuração, detonação e processamento, podem liberar poeira contendo partículas minerais com elementos terras raras, elementos radioativos e metais no ar e nos corpos d'água, impactando o solo local, a vida selvagem, a vegetação e a saúde humana.

Ao avaliar os impactos dos diferentes depósitos, Bayan Obo (China), Mount Weld (Austrália) e Mountain Pass (EUA), Marx et al. (2018) e Wulf et al. (2017) concordam que a produção chinesa é a mais prejudicial ao meio ambiente dentre os três depósitos. Além disso, o combate à mineração ilegal — vetor de risco também relevante para o Brasil — é condição para a competitividade sustentável frente à oferta informal chinesa.

Arshi et al. (2018) afirmam que a etapa de extração por solvente é a principal contribuinte para a maioria das categorias de impacto devido ao seu intenso consumo de produtos químicos, com participações de mais de 35% do impacto no Global Warming Potential (GWP), eutrofização e toxicidade humana. Outros estudos também apontam a geração de energia elétrica como maior causadora de impactos ambientais em países fortemente dependentes de energia não renovável.

Os impactos sociais também são de dimensões relevantes, por exemplo, a mina Bayan Obo (China) emprega cerca de 7.000 trabalhadores, dos quais cerca de 3.000 estão expostos à poeira contendo tório transportada pelo ar (Balaram, 2019). Além disso, os ETR podem despertar conflitos geopolíticos e causar problemas de saúde para as comunidades onde são extraídos e processados. A produção de ETR, da forma como é feita atualmente, está associada a riscos sociais devido à insustentabilidade dos processos produtivos, onde direitos trabalhistas, trabalho decente, saúde e segurança, direitos humanos, governança não têm recebido a devida atenção. A seguir são apresentados os principais impactos sociais relacionados à produção atual de terras raras no mundo:

- **Deslocamento e Declínio Populacional:** a mineração de terras raras pode ocasionar mudanças drásticas no estilo de vida de residentes locais. Na vila de Xinguang Sancun, na China, agricultores abandonaram seus campos e a população declinou de 2.000 para 300 habitantes em um período de 10 anos devido à poluição e à expansão industrial (Ali, 2014; Smerigan e Shi, 2026);
- **Conflitos Sociais e Resistência Comunitária:** muitos projetos enfrentam forte oposição social, o que pode levar a atrasos, interrupções ou cancelamentos definitivos. Exemplos notáveis incluem a resistência contra a planta da Lynas Advanced Materials Plant (LAMP), na Malásia e o projeto Norra Kärr na Suécia, onde a licença de mineração foi revogada devido a fortes argumentos sociais e preocupações ambientais (Ali, 2014; Dominique et al., 2025; Barakos e Mischo, 2021).
- **Justiça Ambiental:** existe uma preocupação social significativa sobre a distribuição desigual de encargos ambientais, com alegações de injustiça no envio de concentrados minerais para processamento em países em desenvolvimento, onde as regulamentações podem ser mais fracas (Ali, 2014). Adicionalmente, comunidades desfavorecidas, particularmente no Sul Global, tendem a ser as mais afetadas pela degradação socioecológica (Smerigan e Shi, 2026);
- **Perda de Subsistência e Direitos Indígenas:** a exploração de minerais críticos pode levar à despossessão de terras e perda de meios de vida para comunidades locais e indígenas, resultando em agitação civil e, em casos extremos, conflitos violentos (Smerigan e Shi, 2026);
- **Desconfiança e Falha de Governança:** O histórico de acidentes e a gestão inadequada de resíduos radioativos geraram uma profunda descrença pública em relação aos reguladores e desenvolvedores de projetos (Ali, 2014). A falta de processos de engajamento comunitário transparentes e eficazes é citada como um fator que exacerba esses conflitos (Ali, 2014; Dominique et al., 2025);
- **Impactos Socioeconômicos Positivos:** por outro lado, o desenvolvimento do setor é por vezes defendido como uma contribuição para a "economia verde", podendo gerar benefícios econômicos e empregos se houver um alinhamento com as prioridades de desenvolvimento local e distribuição justa dos ganhos (Ali, 2014, Dominique et al., 2025);

Nos últimos anos, tem-se observado um avanço significativo dos estudos voltados à promoção de uma mineração mais sustentável. Uma das possíveis técnicas é a biolixiviação, ou seja, a utilização de ácidos orgânicos, produzidos por bactérias e fungos, para a separação dos ETR, em detrimento dos métodos tradicionais com ácido sulfúrico. Outra tecnologia potencial é o processo de bioextração, o qual utiliza

fungos, algas, bactérias ou carvão ativado para a recuperação de ETR. Porém, apesar dos resultados promissores, mais estudos são necessários para alcançar aplicações em escala.

A composição e a localização da mina são determinantes nos impactos ambientais gerados ao longo da produção. A característica mineral determina a intensidade de uso de materiais químicos e emissões. Por exemplo, depósitos de Monazita (encontrados na Austrália, na China e no Brasil) e Bastanazita (encontrados na China) podem gerar resíduos radioativos e emissão de gás carbônico. Já os depósitos de argila iônica (encontrados na China e no Brasil) apresentam a vantagem de poderem ser quimicamente menos intensivos.

Apesar dos benefícios, a mineração de terras raras em depósitos de adsorção iônica ainda gera impactos ambientais severos e de longo prazo que afetam o solo, os corpos hídricos, a biodiversidade e a saúde humana, principalmente pelo fato do emprego de técnicas obsoletas, como a “*in situ*”, em que se injeta uma solução química diretamente no solo. Neste processo, a solução permanece no ecossistema. Pesquisadores demonstram que, mesmo após anos de recuperação, as áreas mineradas no sudeste da China sofrem com desequilíbrios severos de nutrientes e acidificação, dificultando a regeneração da vegetação nativa (Chen et al., 2023). Nesta técnica, o principal agente de lixiviação utilizado é o sulfato de amônia ((NH₄)₂SO₄), portanto, seus resíduos juntamente com metais pesados acabam migrando para rios e lençóis freáticos (Liu et al., 2019).

Contudo, a adoção do processo de sistema fechado para a obtenção de Terras Raras a partir de depósitos de argilas iônicas tem potencial de ser uma das rotas mais sustentáveis, uma vez que estes depósitos não exigem processos de detonação, não geram bacias de rejeitos e há a possibilidade de uso de agentes de lixiviação mais ecológicos para substituir os métodos industriais atuais (Long et al., 2025). Para isso, é imprescindível que haja a recirculação da solução lixiviante, o controle do uso de água e a reabilitação do solo manejado. O Brasil apresenta vantagem por deter depósitos com características que permitem o emprego desta técnica.

Além disso, a recuperação de ETR de depósitos não convencionais, tais como efluentes industriais, lagoas de rejeito, escórias metalúrgicas ou reciclagem de produtos em fim de vida também é uma alternativa. Estas estratégias, além de evitar a extração de recursos naturais, fornecem uma solução para resíduos que, de outra forma, poderiam poluir o meio ambiente. Porém, apesar de evitar a lavra de depósitos não explorados, esta fonte de ETR não é livre de impactos. Lima et al. (2017) criaram o inventário de elementos utilizados para a produção de 4kg de óxidos de Terras Raras (OTR) a partir do rejeito do beneficiamento do Nióbio no Brasil e identificaram o consumo de quantidades significativas de H₂SO₄, HCl e NH₄OH, assim como a geração de resíduos associados com concentrações de tório e urânio. Outro ponto limitante são os custos operacionais associados.

A literatura recente sobre sustentabilidade e terras raras aponta uma tendência no desenvolvimento de tecnologias que visam a redução de resíduos nas etapas de mineração, separação e metalização, as quais apresentam maior impacto socioambiental. Outra tendência é a adoção de práticas de economia circular como estratégia para reduzir a dependência por mineração de depósitos virgens.

4.2 Terras raras, sustentabilidade e Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são um conjunto de 17 metas globais estabelecidas pela ONU em 2015, integrando a Agenda 2030, que visa erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir paz e prosperidade para todos. Os ODS, apresentados na Figura 4.1 foram construídos em conjunto com os 193 países signatários da ONU, e buscam mobilizar os esforços globais ao redor de 169 metas, que definem as prioridades e aspirações de desenvolvimento sustentável global para 2030. Os ODS oferecem um referencial internacional útil para avaliar impactos econômicos, sociais e ambientais.



Figura 4.1. Objetivos do desenvolvimento sustentável

Os ODS podem ser divididos em seis grupos de transformação. O primeiro grupo é referente à educação, inclusão, empregos e crescimento (ODS 4, ODS 5, ODS 8, ODS 9 e ODS 10), o segundo grupo refere-se à saúde e bem-estar, principalmente representado pelo ODS 3 e ODS 10, mas também é fortemente influenciado pelo ODS 13 devido às doenças causadas pelo aquecimento global. O terceiro grupo é referente à alimentação e uso da terra de forma sustentável (ODS 1, ODS 2, ODS 6, ODS 14 e ODS 15). O quarto grupo é referente a cidades inteligentes e transporte (ODS 9 e ODS 11), o quinto grupo é referente a tecnologias digitais e e-governança (ODS 16 e ODS 17). O sexto grupo de transformação é referente à energia e indústrias limpas (ODS 12 e ODS 7), também englobando o ODS 13 com a redução de emissões.

Os equipamentos tecnológicos que utilizam terras raras desempenham papel fundamental na transição energética, tanto na geração de energia eólica, por meio de turbinas que empregam ímãs de terras raras, quanto na eletrificação dos transportes, que substitui motores a combustão interna por motores elétricos,

contribuindo com a redução global de emissões dos gases do efeito estufa. Portanto, os ETR contribuem diretamente com os objetivos 7 “Energia Acessível e Limpa” e 13 “Combate às Alterações Climáticas”. Porém, para que seja satisfeito o ODS 12 “Consumo e Produção Responsáveis”, que aborda a necessidade de indústrias limpas, é necessário que a produção de ETR respeite os princípios da sustentabilidade.

O ODS 9 — Indústria, Inovação e Infraestrutura — exige infraestruturas resilientes, objetivo diretamente ameaçado pela concentração do mercado de ETR na China e pela volatilidade de preços decorrente. O Brasil tem oportunidade concreta de contribuir para sua superação ao desenvolver cadeias produtivas domésticas que fortaleçam o fornecimento à indústria nacional e a outras cadeias hoje estritamente dependentes da China.

Apesar dos ETR contribuírem com os ODS, a sua produção, se não bem gerida, pode prejudicar o alcance de alguns objetivos, como o ODS 15 “Vida Terrestre”, uma vez que os processos causam consequências ambientais negativas devido ao uso intensivo de produtos químicos, energia e à geração de resíduos tóxicos. Ademais, é preciso que o setor se comprometa com a sustentabilidade, uma vez que os impactos negativos relatados pela literatura podem ser considerados uma ameaça para o alcance dos ODS 3 e 8, que apontam a necessidade de garantir vidas saudáveis e bem-estar para promover o crescimento econômico com oportunidades e trabalho decente para todos.

Um empreendimento comprometido com a sustentabilidade deve colaborar com o desenvolvimento da comunidade local e seus funcionários, atendendo o ODS 4 “Educação de Qualidade”. A obtenção de ETR tem um processo produtivo bastante especializado, englobando tecnologias recentes. Desta forma, há necessidade de que os trabalhadores também sejam altamente capacitados.

Por envolverem processos ainda pouco usuais na região, as mineradoras frequentemente precisam contratar especialistas de outras localidades. Para ampliar a participação da mão de obra local, é fundamental que também desenvolvam programas de capacitação voltados à identificação e ao preenchimento das lacunas de qualificação existentes. Nesse sentido, as empresas podem colaborar com grupos comunitários, escolas e universidades na construção de currículos adequados às demandas do setor, conectando a formação profissional a oportunidades de emprego ao longo da cadeia. A educação e a capacitação lideradas pelas empresas podem, assim, contribuir para o desenvolvimento das habilidades técnicas específicas necessárias ao desempenho das atividades.

Ainda, visto que os ETR são considerados materiais críticos, ressalta-se a necessidade do uso eficiente desse recurso natural. Neste cenário, o setor de mineração tem uma oportunidade única de criar processos eficientes, ambientalmente superiores e que levam desenvolvimento às comunidades locais. A transição energética e a vida moderna estão fortemente atreladas ao uso de recursos minerais, portanto, a sua obtenção deve ser feita da forma mais sustentável possível, empregando tecnologias modernas e valorizando a justiça social.

Juntamente com os governos e a sociedade civil, as empresas têm um importante papel no alcance dos ODS. Do ponto de vista empresarial, as ações em prol dos ODS podem gerar oportunidades tanto ao minimizar os impactos negativos quanto ao maximizar os impactos positivos nas pessoas e no planeta.

Também é importante ressaltar que as terras raras são fortemente empregadas em uso militar e, dependendo das condições de uso, sua aplicação pode prejudicar o alcance do ODS 16, referente à “Paz, Justiça e Instituições Fortes”.

4.3 Vantagens comparativas do Brasil

Para análise detalhada da posição geológica única do Brasil e de suas vantagens comparativas no contexto geopolítico global, ver Capítulo 1, Seção 1.6.1. O Brasil possui potencial para tornar-se um produtor de terras raras com maior desempenho ambiental, desde que a atividade seja conduzida em conformidade com as diretrizes de sustentabilidade. Essas diretrizes estão associadas à adoção de boas práticas ambientais, sociais e de governança, conhecidas no âmbito corporativo pela sigla ESG (*Environmental, Social and Governance*).

No aspecto da governança, é imprescindível que as atividades produtivas tenham o compromisso da transparência, cumprindo os requisitos legais. Diversos mecanismos de financiamento e acordos comerciais internacionais passaram a incorporar requisitos de rastreabilidade, governança e desempenho socioambiental. A indústria brasileira tem um reconhecimento histórico positivo em relação a ações ESG, contudo, o país viveu recentemente graves acidentes relacionados à mineração. Portanto, é imprescindível que as condutas que assegurem a sustentabilidade sejam adotadas. Os principais diferenciais estratégicos da obtenção de ETR no Brasil são descritos a seguir:

- **Matriz elétrica limpa:** os processos de obtenção de ETR utilizam energia elétrica intensamente. Deste modo, a matriz energética do país em que a produção de ETR está localizada influencia diretamente os impactos ambientais. O Brasil possui uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo (cerca de 88% renovável), o que permite o processamento de minerais com emissões de carbono significativamente menores que as de seus concorrentes que dependem de carvão, como a China;
- **Radioatividade:** muitos depósitos de terras raras contêm elementos radioativos associados, especificamente tório e urânio. O gerenciamento desses subprodutos radioativos nas bacias de rejeitos é um desafio complexo. A presença de radionuclídeos naturais é característica conhecida de determinadas rotas de processamento e demanda sistemas adequados de monitoramento, gestão e conformidade regulatória. O Brasil apresenta potencial de mineração com menor ou sem geração de resíduos radioativos;
- **Resíduos tóxicos e consumo de água:** o processamento requer o uso intensivo de produtos químicos, gerando grandes volumes de águas residuais e rejeitos tóxicos. Casos históricos, como o da mina de Bayan Obo na China, são citados como exemplos de danos severos aos ecossistemas locais, solos e recursos hídricos. O Brasil apresenta potencial de mineração com uso menos

intensivo em água e químicos na etapa de obtenção do concentrado de terras raras, devido às características intrínsecas a alguns depósitos;

- **Capacidade de integrar mineração primária e secundária desde a fase de planejamento do setor:** usualmente, o processamento de materiais secundários (reciclados) consome menos energia e emite menos gases de efeito estufa do que a produção a partir de minérios virgens. Utilizando a produção de 1 kg de metal reciclado como referência, as emissões de GEE para neodímio e disprósio correspondem a reduções de 41% e 28%, respectivamente, em comparação com a produção primária.;
- **ESG:** Por ser um setor em construção no país, o Brasil tem a oportunidade de estruturar rastreabilidade e compliance ESG desde o início da cadeia.

A promoção da sustentabilidade da cadeia de suprimentos de elementos de terras raras demanda uma abordagem que integre a economia circular e o desenvolvimento responsável da mineração doméstica. A seção a seguir explora em detalhes os caminhos para a adoção da economia circular. A estratégia brasileira não deve focar apenas na abertura de novas minas, mas na integração da mineração primária com a secundária (reciclagem), criando um ecossistema industrial resiliente e alinhado às demandas globais por sustentabilidade.

4.4 Estratégias de circularidade

A dependência predominante da mineração primária de terras raras, associada a elevados impactos socioambientais, evidencia a necessidade de reconfigurar os modelos tradicionais de fornecimento em direção a alternativas mais sustentáveis. A reciclagem é complementar à mineração primária e tende a ganhar relevância à medida que aumenta o estoque de produtos em fim de vida. Nesse contexto, a implementação da economia circular (EC) atua como uma ferramenta estratégica para a gestão sustentável de terras raras ao romper com o modelo linear ("extrair-produzir-descartar") e substituí-lo por um paradigma regenerativo focado na máxima retenção de valor e na eficiência no uso dos recursos.

Adicionalmente, uma cadeia de suprimentos circular promove a geração de "empregos verdes" associados a inovações em atividades de triagem, reparo e reprocessamento de materiais. Em países em desenvolvimento, o avanço da reciclagem alinhada à economia circular proporciona uma oportunidade para a inclusão socioprodutiva de catadores de materiais recicláveis, formalizando a atividade, distribuindo renda, melhorando as condições de saúde pública e fortalecendo economias locais (Guarnieri et al., 2026).

4.4.1 Fontes secundárias de terras raras

A recuperação de terras raras a partir de fontes secundárias constitui um dos pilares da economia circular aplicada à cadeia desses elementos. Essas fontes podem ser classificadas em duas grandes categorias:

- I. estoques antropogênicos pós-consumo, associados à **mineração urbana**, e
- II. estoques antropogênicos industriais, relacionados à recuperação de coprodutos e rejeitos de atividades minerais e industriais já existentes. A distinção conceitual permite estruturar as estratégias de circularidade, diferenciando os desafios tecnológicos, logísticos e regulatórios associados a cada tipo de fonte secundária.

A mineração urbana refere-se à recuperação de materiais já inseridos no sistema socioeconômico, isto é, terras raras previamente processadas e incorporadas a produtos em uso ou em fim de vida. As chamadas “minas urbanas”, portanto, correspondem aos estoques acumulados na sociedade e representam uma fonte estratégica de suprimento secundário. No âmbito dos produtos em fim de vida, destacam-se como principais fontes secundárias de ETR:

- **Ímãs permanentes de tecnologias de vida útil longa**, como motores elétricos, geradores eólicos e equipamentos de ressonância magnética desativados, que constituem estoques antropogênicos de ímãs de maior porte;
- **Ímãs permanentes presentes em resíduos eletrônicos**, incluindo discos rígidos, celulares, computadores e eletrodomésticos. Esses dispositivos contêm ímãs de pequeno porte, geralmente entre 1 g e 15 g por unidade (Habib, 2019), caracterizando fluxos altamente dispersos e de maior complexidade logística;
- **Lâmpadas fluorescentes e catalisadores de craqueamento catalítico fluido (FCC)**, cujos pós fosfóricos e resíduos de catalisadores gastos concentram principalmente lantânio, cério e outros elementos específicos.

Paralelamente à mineração urbana, há oportunidades relevantes na recuperação de terras raras a partir de **estoques antropogênicos industriais**, que incluem resíduos e coprodutos de cadeias minerais e industriais nas quais as terras raras não foram intencionalmente recuperadas. Nessa categoria enquadram-se a lama vermelha proveniente do refino da bauxita (como em Barcarena/PA), rejeitos associados à mineração de estanho (Pitinga/AM) e de fosfato (Catalão/GO e Araxá/MG), bem como cinzas de carvão (Capivari de Baixo/SC e Candiota/RS). Embora essas fontes não configurem mineração urbana em sentido estrito, representam reservas secundárias relevantes, cuja valorização pode reduzir a pressão sobre depósitos primários e mitigar passivos ambientais. Contudo, a recuperação de ETR destes depósitos pode ser economicamente inviável.

Os resíduos da manufatura de ímãs NdFeB ocupam uma posição intermediária na tipologia das fontes secundárias: são resíduos industriais, porém englobam terras raras já processadas, tampouco configuram mineração urbana derivada de produtos em fim de vida. Esses resíduos são caracterizados por elevada concentração de terras raras, composição conhecida e logística interna simplificada. Diferentemente da mineração urbana, esses fluxos não dependem de sistemas de coleta dispersa, o que representa uma rota

tecnicamente mais madura e economicamente viável para o desenvolvimento inicial da reciclagem de terras raras no Brasil. Atualmente, a maior parte da matéria-prima global destinada à reciclagem de ETR ainda provém de perdas geradas durante o processo de fabricação dos ímãs, especialmente nas etapas de corte e usinagem (IEA, 2024). O material recuperado é reintroduzido no processo de manufatura dos ímãs, formando um ciclo fechado autossuficiente que reduz a dependência de fornecedores externos. Desta forma, parte da gestão circular das terras raras ocorre no interior das fábricas de ímãs.

Os ímãs de terras raras contêm cerca de 30% de ETR, principalmente neodímio, praseodímio, disprosio e térbio, uma concentração muito mais elevada do que as encontradas em depósitos naturais. Por exemplo, os atuais depósitos naturais do tipo argila iônica sendo explorados no Brasil são caracterizados por teores de ETR tipicamente em torno de 0,3%. Neste contexto, os ímãs permanentes se tornam fontes secundárias com significativa concentração desses elementos. Atualmente, o maior montante de ímãs disponíveis para reciclagem concentra-se em eletrônicos de pequeno porte em fim de vida (Rizos et al., 2022), os quais estão dispersos na sociedade e demandam alta complexidade logística para sua coleta. Estima-se que apenas 5% dos ímãs NdFeB em fim de vida sejam coletados globalmente (US DOE, 2022). Fluxos relevantes de ímãs de maior volume, provenientes de veículos elétricos e turbinas eólicas, devem emergir apenas após 2030, com volumes expressivos a partir de 2040 (IEA, 2024).

4.4.2.1 Rotas circulares

A construção da cadeia brasileira de terras raras deve contemplar, desde sua concepção, mecanismos que assegurem a circularidade efetiva dos materiais, transformando resíduos industriais e tecnológicos em fonte estratégica de suprimento secundário. A logística reversa e a gestão de produtos em fim de vida que incorporam terras raras não se limitam a uma etapa ambientalmente necessária, mas caracterizam-se como componentes essenciais para a consolidação de uma cadeia de suprimentos circular, capaz de reter o valor dos materiais e ampliar a segurança de suprimento no longo prazo.

A extensão do ciclo de vida de um dispositivo/componente deve seguir a hierarquia da gestão de resíduos, priorizando sempre as alternativas que preservam o maior valor agregado e apresentam menor impacto ambiental (e.g. reuso antes da reciclagem). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece uma hierarquia de gestão que prioriza a não geração, redução, reutilização e reciclagem antes do tratamento e da disposição final (BRASIL, 2010), alinhando-se diretamente aos princípios da economia circular. Essa abordagem assegura maior eficiência no uso dos recursos e maior sustentabilidade à cadeia de suprimentos de terras raras. No caso dos ímãs permanentes, a hierarquia de gestão de resíduos orienta que a preservação do ímã em sua forma original seja priorizada sempre que possível. A desconstrução física (reciclagem de ciclo curto) ou química (reciclagem de ciclo longo) deve ser considerada apenas quando o reuso do ímã não for tecnicamente viável.

4.4.2.2 Etapas iniciais do fluxo reverso de terras raras

Para consolidar a cadeia circular de terras raras, é essencial estruturar as etapas iniciais do fluxo reverso. A coleta, a logística reversa e o pré-processamento (triagem, desmontagem e extração dos componentes que agregam ETR) formam a base que viabiliza a reinserção das terras raras no ciclo produtivo. Como mencionado anteriormente, os ímãs permanentes constituem as fontes secundárias com maior

concentração de terras raras. Em razão disso, as seções seguintes adotam os ímãs como referência para ilustrar o percurso que vai desde a coleta do produto em fim de vida até a definição de estratégias circulares para a reinserção das terras raras nos processos produtivos.

a) Coleta e logística reversa

A coleta e a logística reversa representam um dos maiores gargalos para a viabilidade da circularidade das terras raras. A maior parte dos ímãs em fim de vida encontra-se dispersa nos resíduos eletrônicos (e.g. smartphones, fones de ouvido, discos rígidos), onde os ímãs são pequenos, pesando de 1 a 15 gramas. A logística para reunir esse material é extremamente onerosa, pois a dispersão dos materiais eleva os custos de transporte e armazenamento. Para ilustrar a magnitude do problema, seria necessário coletar entre 2 e 3 milhões de smartphones para recuperar a mesma quantidade de ímãs NdFeB contida em uma única turbina eólica de 3 MW (Habib, 2019).

A otimização da logística reversa está diretamente condicionada à rastreabilidade dos produtos ao longo do ciclo de vida. Atualmente, as tecnologias que contêm terras raras não são rastreadas, bem como não há canais formais para a logística reversa destes dispositivos no Brasil. Devido à falta de políticas específicas para fomentar a logística reversa, um volume significativo de terras raras é perdido com o descarte inadequado dos produtos em fim de vida.

Adicionalmente, observa-se que, no Brasil, empresas estrangeiras têm realizado a aquisição e a exportação de produtos em fim de vida que contêm ímãs permanentes, com o objetivo de reter a propriedade das terras raras neles incorporadas. Essa prática interrompe a circularidade das terras raras no Brasil e implica na perda de estoques estratégicos de materiais secundários. Em contraste, países têm adotado medidas para manter esses recursos em seus territórios. Recentemente, a Comissão Europeia anunciou que haverá restrições à exportação de dispositivos em fim de vida com ímãs permanentes de terras raras. O objetivo é obrigar que materiais valiosos permaneçam na União Europeia, incentivando o desenvolvimento da indústria de reciclagem local.

b) Pré-processamento - triagem, desmontagem e extração dos componentes

O pré-processamento compreende o conjunto de etapas empregadas aos produtos em fim de vida útil, para extrair e preparar os componentes que contêm terras raras para as rotas circulares subsequentes. Trata-se de uma fase crítica que determina a viabilidade econômica de toda a cadeia reversa. A qualidade do material que retorna à cadeia está sujeita à eficiência desta etapa. A forma como o pré-processamento é conduzido define o valor retido e a rota prioritária de circularidade do material.

Neste contexto, processos de triagem efetivos dependem da disponibilidade de dados confiáveis sobre os produtos. Atualmente, quando dispositivos em fim de vida chegam aos centros de triagem, não há mecanismos padronizados que permitam identificar quais equipamentos contêm ímãs permanentes, as especificações técnicas dos ímãs ou a localização exata do ímã no interior de um produto. As diferentes composições químicas dos ímãs, mesmo quando pertencem à mesma classe, dificultam a produção de um material homogêneo para os compradores. A ausência dessas informações compromete o processo de desmontagem das tecnologias em fim de vida e reduz a eficiência da recuperação de terras raras.

A desmontagem visa separar fisicamente o componente magnético do equipamento e pode ser manual, mecânica ou automatizada. Em eletroeletrônicos, os ímãs são pequenos tornando a remoção manual complexa e onerosa. Em aplicações que utilizam ímãs maiores (turbinas eólicas, motores elétricos, equipamentos de ressonância magnética), o elevado campo magnético também dificulta a remoção segura e a posterior desmagnetização.

As capacidades de coleta, desmontagem e triagem são fundamentais para a viabilidade econômica da reciclagem de ímãs. O gargalo operacional ocasionado pela morosidade e pelo alto custo da mão de obra humana incentivou o desenvolvimento de soluções automatizadas e robóticas para desmontagem rápida e com menor potencial de contaminação. Máquinas especializadas, como a máquina de desmontagem de motores elétricos da fabricante Hitachi (Hitachi, 2025), o robô de desmontagem de smartphones da Apple (McKinsey & Company, 2025) e células robóticas de desmontagem orientadas por sensores (Díaz et al., 2025), são exemplos de tecnologias projetadas para acelerar a extração de ímãs em larga escala e minimizar a contaminação dos materiais. Alternativamente, o Hydrogen Processing of Magnetic Scrap (HPMS), desenvolvido pela University of Birmingham (Walton et al., 2015), promove simultaneamente desmontagem, desmagnetização e pulverização controlada: a exposição ao hidrogênio transforma os ímãs em pó desagregado de revestimentos e fixações, permitindo extração de alta pureza sem trituração integral do equipamento.

As abordagens, no entanto, não se limitam às inovações tecnológicas. Seguindo os preceitos da economia circular, a solução ótima para superar as ineficiências do pré-processamento requer mudanças na fase de fabricação dos produtos. O design para desmontagem, nomeadamente ecodesign, visa projetar uma tecnologia considerando a sua fase de fim de vida. Para os ímãs permanentes, isso significa projetar produtos sem colas e adesivos, com fixação mecânica e encaixes padronizados, facilitando o acesso, a desmontagem automatizada e a extração dos ímãs intactos, de forma rápida e econômica.

4.4.2.2 Reuso dos ímãs permanentes

Ímãs extraídos de aplicações em fim de vida podem ser reutilizados em novos produtos, desde que atendam aos requisitos técnicos e de desempenho especificados. Essa estratégia representa a rota circular de maior retenção de valor, com menor consumo energético e menor pegada de carbono. Contudo, até o momento, sua aplicação em escala industrial permanece limitada.

Para evitar a oxidação e a perda de propriedades magnéticas, a reutilização demanda que o processo de desmontagem preserve o revestimento do ímã intacto e remova as impurezas, como resíduos de cola. Ímãs de grande porte, como os provenientes de motores elétricos, aerogeradores e aparelhos de ressonância magnética, são mais propícios ao reuso.

A qualificação estrutural e magnética é essencial antes do reuso. Os ímãs precisam ser caracterizados como livres de defeitos para que possam ser reutilizados. Mesmo quando os materiais aparentam estar externamente intactos, podem existir defeitos internos (e.g. microfissuras, porosidades e inclusões) que prejudicam as propriedades magnéticas e a integridade mecânica dos ímãs (Cui et al., 2023). Há também uma limitação em relação à geometria do ímã disponível, podendo haver necessidade de usinagem.

4.4.2.3 Reciclagem e recuperação das terras raras

Quando a reutilização direta dos ímãs em fim de vida não é viável, a reciclagem é a rota recomendada. A reciclagem tem sido amplamente reconhecida como uma opção estratégica para conciliar a segurança de recursos com as metas de redução de emissões atmosféricas. Ao contrário da extração primária, que é limitada pelas reservas de minério, a produção secundária é condicionada pelo tamanho dos estoques em uso, pela escala dos materiais ao final de sua vida útil e pela eficiência dos sistemas de coleta e tratamento. Da perspectiva das emissões de carbono, os impactos da reciclagem são determinados conjuntamente por fatores como qualidade dos ímãs em fim de vida, rotas e eficiências dos processos e matriz energética subjacente.

O processo de reciclagem é conduzido a partir de ciclos curtos ou longos. O ciclo curto é uma estratégia de reciclagem em que os ímãs em fim de vida são reprocessados para formar novos ímãs sem que haja a separação completa dos seus elementos químicos constituintes. Trata-se de um processo simplificado que consome significativamente menos energia, produtos químicos e recursos, minimizando o impacto ambiental da reciclagem, mas exige ímãs em fim de vida de alta qualidade. O ciclo longo caracteriza-se por um processo de reciclagem complexo, que tem por objetivo decompor os ímãs EoL para separar e extrair individualmente cada um de seus elementos, como neodímio, praseodímio, disprosio e térbio, à custa de mais energia e químicos. A escolha entre a melhor rota de reciclagem depende estritamente do estado de conservação e grau de contaminação do ímã em fim de vida.

Diante da alta contaminação e oxidação dos ímãs, a reciclagem de ciclo longo é a rota empregada para recuperar o valor das terras raras sem comprometer a qualidade do material final. A reciclagem por ciclo longo, contudo, apresenta alto consumo de energia e produtos químicos, tornando o processo mais caro e com maior impacto ambiental se comparado ao ciclo curto.

Para contornar as limitações associadas aos métodos convencionais de reciclagem, vêm sendo desenvolvidas tecnologias e rotas inovadoras para a recuperação de terras raras, como a biolixiviação, o uso de líquidos iônicos e solventes eutéticos profundos (DESSs), além de técnicas aprimoradas de extração por solvente e troca iônica. Essas abordagens são embasadas nos princípios da química verde, buscando reduzir impactos ambientais, aumentar a eficiência energética e melhorar a seletividade na separação dos elementos. Embora apresentem elevado potencial sob a perspectiva da sustentabilidade, a literatura indica que a maioria desses processos ainda se encontra em estágios iniciais de maturidade tecnológica, enfrentando desafios relacionados à escalabilidade e à viabilidade econômica em nível industrial (Srivastava et al., 2026).

4.4.3 Gargalos estruturais e oportunidades

Assegurar uma cadeia de suprimentos sustentável exige não apenas a adesão a marcos regulatórios rígidos e o aproveitamento racional das jazidas, mas também o fomento vigoroso a práticas mais sustentáveis de produção, alinhadas aos princípios ESG e à economia circular. Considerando o ciclo de vida completo dos produtos que empregam terras raras, é possível transformar passivos ambientais em ativos econômicos e mitigar a pressão sobre a mineração primária.

O Brasil tem a oportunidade de se tornar um líder em mineração verde. No entanto, extração de ETR advindos de depósitos virgens deve ser condicionada a processos que garantam a transparência na obtenção de licenças ambientais, respeitando as necessidades da comunidade local e áreas indígenas. O processo de mineração deve assegurar o emprego de tecnologias modernas que garantam desempenho ambiental superior. Além disso, a mineração ilegal deve ser combatida, nela os impactos ambientais e sociais ficam fora de controle e oferecem uma grande ameaça. Empreendimentos que resultem em desenvolvimento local e nacional devem ser priorizados. Em muitas localidades do mundo, áreas mineradas sofrem com o passivo ambiental enquanto o lucro da exploração se concentra na mão de poucos ou acaba se transferindo para empresas estrangeiras. Tais questões devem ser abordadas ao se cumprir com os requisitos sociais e econômicos do ESG. O Brasil tem um histórico de fornecimento de produtos com menor valor agregado, seja na mineração ou na agricultura. Tais produtos são exportados, beneficiados fora do país e depois importados com maior valor. O desenvolvimento da cadeia de ETR tem a oportunidade de mudar esta lógica, portanto, deve haver incentivo para a agregação de valor dentro do próprio país.

Em relação à economia circular, a otimização dos processos industriais é um dos seus pilares, pois busca reduzir perdas e aumentar a eficiência no uso de recursos. A minimização da geração de resíduos nos processos de mineração de terras raras e na fabricação de ímãs permanentes constitui um requisito estratégico para a sustentabilidade industrial.

O Projeto de Lei nº 4443/2025 incentiva o aproveitamento de matérias-primas secundárias (Brasil, 2025). Contudo, a expansão da reciclagem em escala industrial, atualmente, enfrenta múltiplos desafios. Estudos apontam que, globalmente, a taxa de reciclagem das terras raras ainda é inferior a 1% (Zheng et al., 2025). Embora o crescimento da demanda por oferta secundária crie oportunidades de negócio, custos elevados para a obtenção dos materiais em fim de vida podem comprometer a competitividade dos materiais reciclados em relação aos materiais virgens. Barreiras adicionais incluem: coleta ineficiente de produtos em fim de vida, ausência de tecnologias de reciclagem maduras e economicamente viáveis, entraves regulatórios, infraestrutura insuficiente, falta de transparência e rastreabilidade dos ímãs, dificuldades técnicas para sua extração em dispositivos em fim de vida e o ceticismo quanto ao desempenho de ímãs reciclados (IEA, 2024; US DOE, 2022; Rizos et al., 2022). Nacionalmente, a viabilidade econômica é considerada o maior obstáculo para a estruturação de uma cadeia de terras raras de ciclo fechado. Modelos de negócios circulares são tidos como de alto risco devido às incertezas em relação aos fluxos de receita e ao valor futuro dos materiais recuperados. As transições para a circularidade exigem tempo e investimentos e os retornos financeiros costumam aparecer apenas a longo prazo, o que justifica a hesitação dos elos da cadeia em adotar estratégias da economia circular (Raspini et al., 2022).

A cadeia reversa de terras raras falha quando o custo de coletar, transportar, identificar, desmontar o equipamento e extrair componentes é maior que o valor de mercado do material recuperado. Se as etapas de coleta e pré-processamento são altamente onerosas, a reciclagem torna-se financeiramente desinteressante para a indústria, o que interrompe o ciclo circular e mantém a dependência da mineração primária. Neste contexto, estratégias circulares, como passaportes digitais e rastreamento de materiais, apresentam-se como fundamentais para viabilizar o processo de reciclagem.

Para o estabelecimento de uma cadeia de suprimentos circular, a informação deve fluir de forma consistente ao longo de toda a cadeia de valor. A falta de informações sobre a localização e composição dos ímãs de terras raras nos produtos em fim de vida exige uma desmontagem manual onerosa e ineficiente. Políticas públicas podem exigir requisitos de rotulagem ou o desenvolvimento de "passaportes digitais de produtos", permitindo, por exemplo, que cada ímã permanente seja associado a um registro estruturado contendo informações sobre origem das matérias-primas, histórico de processamento, composição química, características magnéticas, localização no equipamento e orientações para desmontagem segura e eficiente. Os registros reduzem os custos associados à reciclagem. Adicionalmente, a incorporação de tecnologias digitais avançadas, como blockchain, é fundamental para aumentar a transparência e a rastreabilidade dos fluxos de terras raras ao longo da cadeia de valor. Setores estratégicos, como os setores eólico e de mobilidade elétrica, podem alimentar plataformas nacionais de registro de dados, com o objetivo de permitir a identificação e quantificação mais precisa dos estoques antropogênicos de terras raras, de forma a viabilizar o planejamento da capacidade futura de reciclagem.

Novos modelos de negócio devem ser incentivados. A adoção do modelo de negócios "Produto como Serviço" (PaaS) constitui um instrumento estratégico para o fortalecimento da circularidade na cadeia de suprimentos de terras raras. Ao manter a propriedade do ativo com o fabricante ao longo de todo o ciclo de vida do produto, o modelo cria incentivos econômicos para o design voltado à durabilidade, desmontagem e recuperação de componentes críticos. Diferentemente do modelo linear de venda definitiva, o PaaS permite maior previsibilidade da logística reversa, facilita a rastreabilidade dos ativos e assegura o retorno contratual dos equipamentos ao final do período de uso. Essa configuração favorece a internalização do valor residual das terras raras no modelo financeiro do fabricante e aumenta a segurança de suprimento secundário.

Diante das barreiras econômicas, técnicas e de mercado, as políticas públicas desempenham um papel fundamental na transição de um modelo linear para uma economia circular na cadeia de terras raras. Para fomentar essa transição, os governos podem adotar estratégias de longo prazo que combinem instrumentos regulatórios, incentivos econômicos e medidas de fomento à inovação. O apoio governamental será fundamental para prover um ambiente favorável, fornecendo tanto estrutura legal quanto incentivos, para que a adoção das estratégias da economia circular na cadeia de suprimentos de terras raras no Brasil seja financeiramente atrativa. Para atrair investimentos em infraestrutura de reciclagem, o Estado pode atuar oferecendo apoio financeiro direto, subsídios, linhas de crédito verde e incentivos fiscais, como a redução de impostos. Adicionalmente, o financiamento público também pode ser destinado ao fomento à inovação (PD&I) para o aprimoramento e desenvolvimento de tecnologias de reciclagem de terras raras.

Atualmente, as terras raras secundárias têm dificuldade em competir financeiramente com aquelas extraídas a partir de minerais virgens. Para criar e impulsionar a demanda no mercado secundário, políticas podem estabelecer cotas obrigatórias e progressivas de uso de terras raras recicladas na fabricação de componentes, caso dos ímãs permanentes de terras raras. Normativas de ecodesign, que instituem a obrigatoriedade dos fabricantes de conceber produtos modulares e fáceis de desmontar, evitam o uso de adesivos e soldagem que dificultam ou impedem a extração e a reciclagem dos componentes que contêm terras raras. Adicionalmente, pode-se instituir a Responsabilidade Estendida do Produtor (REP), a qual

determina que fabricantes sejam responsáveis pela fase pós-consumo de seus produtos, incluindo coleta, logística reversa, reciclagem e destinação ambientalmente adequada.

No âmbito da mineração urbana, incentiva-se a regulação do comércio internacional de resíduos que agregam terras raras, de forma a evitar a perda de recursos secundários estratégicos. Políticas de controle de exportação ajudam a reter as matérias-primas críticas no mercado interno, garantindo que o material secundário alimente a infraestrutura de reciclagem doméstica. Marcos regulatórios são instrumentos importantes para garantir o estabelecimento de práticas circulares na indústria. Nos últimos anos tem havido um esforço para a criação de leis e mecanismos, a Tabela 4.1 apresenta as mais relevantes.

Estabelecidos o *upstream*, o *midstream* e o eixo de sustentabilidade, os capítulos seguintes detalham as principais aplicações industriais das terras raras. A primeira delas — e a de maior valor estratégico — são os ímãs permanentes de alto desempenho à base de neodímio, ferro e boro, responsáveis por fração significativa da demanda mundial por elementos magnéticos pesados. O capítulo seguinte mapeia a trajetória brasileira nessa cadeia, dos primeiros projetos de cooperação internacional na década passada à iniciativa MAGBRAS atualmente em execução.

Tabela 4.1. Marcos regulatórios que direcionam para uma economia circular e sustentável.

Marco Regulatório	Descrição
PL 5801/2025	Propõe uma Lei da Plataforma Nacional de Economia Circular e Resíduos Zero com rastreamento digital do ciclo de vida de bens e metas de resíduos evitados;
PL 4821/2024	Propõe incentivo fiscal e financeiro para empresas que adotem práticas de economia circular, reciclagem e design sustentável
PL 2132/2025	Política Nacional de Circularidade das Baterias - Estabelece regras específicas para circularidade de baterias de veículos elétricos, incluindo reutilização, reaproveitamento de materiais e rastreabilidade.

4.5 Aspectos radiológicos e gestão de rejeitos TENORM/NORM

A associação de tório e urânio com a monazita e a xenotima, descrita do ponto de vista mineralógico no Capítulo 10, impõe à cadeia brasileira uma dimensão adicional de regulação e de risco operacional: a gestão de rejeitos contendo radionuclídeos de origem natural (NORM e TENORM). Essa condição é

estrutural — não depende da rota tecnológica escolhida — e está presente em grau distinto em todos os depósitos prioritários do país que contêm essas espécies minerais.

Ao longo da lixiviação, da purificação e dos circuitos de extração por solvente, esses radionuclídeos tendem a se concentrar em correntes intermediárias específicas — efluentes ácidos, sólidos de neutralização, lodos de filtração e resíduos de calcinação. Trata-se, portanto, de um problema químico-operacional, não apenas regulatório: as decisões de projeto de processo determinam onde os radionuclídeos serão concentrados e em que forma físico-química, o que repercute diretamente sobre as etapas seguintes de gestão.

O enfrentamento desse passivo exige resposta articulada em seis frentes: licenciamento radiológico das instalações, segurança ocupacional, monitoramento ambiental contínuo, armazenamento de longo prazo de rejeitos categorizados, aceitação social do empreendimento e conformidade com protocolos internacionais — em particular as diretrizes TENORM consolidadas por agências como a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e a Environmental Protection Agency (EPA). A ausência de uma infraestrutura nacional consolidada para essas frentes, especialmente para armazenamento de longo prazo e monitoramento padronizado, constitui hoje uma barreira não trivial à implantação de plantas comerciais de refino.

Esse conjunto articula-se diretamente com o paradoxo socioambiental descrito na seção 4.1 e com os gargalos estruturais discutidos na seção 4.4.3: sem protocolos radiológicos previsíveis e infraestrutura dedicada de gestão de rejeitos, a sustentabilidade declarada da cadeia brasileira de terras raras permanece como aspiração de discurso, sem ancoragem operacional. A construção dessa infraestrutura é, portanto, uma das pré-condições materiais para que o Brasil possa pleitear, em mercados ocidentais, a rastreabilidade ambiental que os marcos europeus e norte-americanos passaram a exigir desde 2024.

Capítulo 5

Cadeia produtiva de ímãs de terras raras no Brasil

Nota elucidativa — Fundamentos físicos dos ímãs NdFeB de alto desempenho

O desempenho dos ímãs permanentes à base de NdFeB tem origem na combinação entre a alta magnetização espontânea do ferro e a forte anisotropia magnetocristalina do neodímio, contribuição decisiva da camada eletrônica 4f desse lantanídeo. A fase tetragonal $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, que constitui o núcleo magnético desses materiais, organiza esses dois elementos em uma estrutura cristalina que confere simultaneamente elevada remanência e alta coercividade — propriedades que sustentam densidades de energia $(\text{BH})_{\text{max}}$ significativamente superiores às de qualquer outra classe de ímã produzida em larga escala. O termo $(\text{BH})_{\text{max}}$ refere-se ao Produto Energético Máximo (Maximum Energy Product), a principal métrica usada para medir a força e a densidade de energia de um ímã permanente, em termos mais simples, a energia magnética máxima armazenada pelo volume do ímã.

O acréscimo de disprósio e térbio, em frações relativamente baixas, eleva a coercividade da fase principal e estabiliza o desempenho magnético em temperaturas elevadas. Essa propriedade torna o NdFeB adequado a motores de tração automotiva, geradores de turbinas eólicas, sistemas aeroespaciais e plataformas de defesa, todas elas aplicações em que a perda de magnetização sob aquecimento operacional comprometeria a função. A tendência simultânea de miniaturização de dispositivos, eletrificação do transporte e expansão de geração eólica concentra, nesses quatro elementos — Nd, Pr, Dy e Tb — boa parte do esforço estratégico observado nas cadeias internacionais de terras raras.

Este capítulo tem como objetivo trazer elementos que permitam analisar a implementação estratégica de uma cadeia produtiva de ímãs de terras raras no Brasil, caracterizando seus elos tecnológicos e industriais, avaliando o estágio atual e as lacunas para sua consolidação. Os ímãs foram priorizados neste capítulo em razão de sua participação atual no mercado global de terras raras e de sua relevância para setores estratégicos, sem prejuízo da importância das demais cadeias analisadas neste estudo. A produção nacional de ímãs representa uma das alternativas possíveis para ampliar a autonomia tecnológica e reduzir vulnerabilidades em aplicações consideradas estratégicas. Os ímãs constituem uma das oportunidades de maior valor agregado identificadas neste estudo, razão pela qual receberam análise detalhada, sem prejuízo das demais rotas de agregação de valor discutidas ao longo do documento. A partir desse diagnóstico, são propostos direcionadores estratégicos para o período 2026–2040, considerando o contexto internacional de reorganização das cadeias globais de valor, a transição energética, as demandas da indústria nacional e a necessidade de fortalecimento da base tecnológica brasileira.

5.1 Importância estratégica da aplicação para o País

O crescimento da utilização de ímãs de terras raras (ITRs) se intensificou na última década, principalmente pela expansão de mercados como da mobilidade elétrica, da geração de energia eólica de grande porte e da automação industrial. Estimativas recentes convergem em torno de 385 mil toneladas anuais de produção global de ímãs em 2025, representando aproximadamente US\$ 19 bilhões, com expectativa de crescimento anual em torno de 7,8% até 2030 (RESEARCH AND MARKETS, 2025) — valor situado dentro da faixa de estimativas (250 a 385 kt) discutida na Tabela 5.1 do Capítulo 2, que reúne projeções de diferentes consultorias internacionais. Os ímãs permanentes de alto desempenho, sobretudo os à base de Nd-Fe-B, respondem por uma parcela significativa da demanda por neodímio (Nd), praseodímio (Pr), disprósio (Dy) e térbio (Tb), sendo componentes críticos em motores de veículos elétricos, turbinas eólicas de acionamento direto e sistemas eletromecânicos de alta eficiência.

Associado a esse aumento da demanda, mantém-se a preocupação quanto à segurança da cadeia global de suprimentos e à concentração das etapas de maior valor agregado em um único ator — concentração detalhada no Capítulo 1. O ponto específico desta análise é que, no elo da fabricação de ímãs permanentes, a China concentra aproximadamente 90% da produção global, percentual que reforça a necessidade de desenvolvimento de capacidades produtivas e tecnológicas em outras regiões, incluindo o Brasil.

Atualmente, empresas brasileiras fabricantes de compressores, motores elétricos, geradores e sistemas eletromecânicos de alta eficiência vêm ampliando a demanda por projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação voltados ao lançamento de novas gerações de produtos com maior desempenho energético, densidade de potência e confiabilidade operacional. Em diversas dessas aplicações, a utilização de ímãs permanentes de terras raras constitui requisito tecnológico para viabilizar ganhos de eficiência, redução de massa, confiabilidade e menor manutenção, especialmente nos segmentos associados à mobilidade elétrica, à geração de energia renovável e à automação industrial.

Assim como observado no cenário internacional, empresas nacionais também demonstram preocupações quanto à segurança da cadeia de suprimentos de ímãs e produtos estratégicos, bem como quanto à estabilidade de preços associada à China por sua maior parcela do mercado de fornecimento desses insumos. Dados de comércio internacional estimam que o Brasil importou em 2024, cerca de 10000 toneladas de ímãs permanentes. Destes, aproximadamente 1000 toneladas correspondem aos ímãs à base de terras raras (Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, 2026). Esses dados evidenciam a elevada dependência externa do Brasil de um insumo considerado crítico para equipamentos de alto desempenho e configura risco tecnológico e comercial relevante para a indústria brasileira.

Nessa perspectiva, ao longo da última década foram estruturadas iniciativas, públicas e privadas, voltadas à consolidação de competências nacionais na cadeia produtiva de ITRs, com escopos complementares e níveis distintos de maturidade tecnológica. A seguir, é apresentado um resumo de algumas destas iniciativas.

Em 2015, o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e o seu equivalente alemão, o *Bundesministerium für Bildung und Forschung* (BMBF) firmaram uma Declaração Conjunta de Intenções voltada à cooperação científica e tecnológica em matérias-primas estratégicas, com foco no

fortalecimento da pesquisa, desenvolvimento e inovação em terras raras, nióbio, tântalo e outros minerais críticos, oriundos tanto de fontes primárias quanto secundárias. A iniciativa previa a promoção de pesquisas conjuntas, desenvolvimento de tecnologias sustentáveis, elaboração de estratégias integradas com instituições de pesquisa e empresas, apoio à inovação, além do intercâmbio de pesquisadores e informações entre os países. Nesse contexto, foi criado o **Projeto REGINA** (*Rare Earth Global Industry and New Applications*), voltado à aspectos da sustentabilidade da cadeia produtiva de terras raras e ao desenvolvimento de tecnologias de fabricação de ITRs. Encabeçado pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e em parceria junto a outras Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs) nacionais, o projeto estruturou uma cooperação internacional entre Brasil e Alemanha com o objetivo de desenvolver soluções tecnológicas mais eficientes e ambientalmente sustentáveis para a produção e processamento de ITRs.

O **Projeto INCT-PATRIA** (Instituto Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação - Processamento e Aplicações de Ímãs de Terras Raras para Indústria de Alta Tecnologia), foi uma iniciativa nacional de pesquisa (2017–2023/2024), coordenada pela Universidade de São Paulo (USP) em parceria com instituições como o IPT e UFSC. Possuiu como objetivo principal estruturar a cadeia produtiva de terras raras no Brasil, com foco no desenvolvimento de competências científicas, tecnológicas e, principalmente, de formação de recursos humanos, criando uma rede nacional de pesquisa capaz de apoiar a indústria com soluções inovadoras em materiais, processos e produtos, em especial os ITRs.

O **Projeto FUNTEC** “Obtenção de ímãs de (Nd,Pr)FeB a partir de óxido de didímio”, iniciado em 2019 e financiado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) em parceria com a Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) e a empresa WEG S.A., representou um avanço estratégico para o Brasil ao demonstrar, em escala laboratorial, a viabilidade de internalizar toda a cadeia produtiva de ímãs de terras raras, desde a matéria-prima até o produto final. A iniciativa evidenciou o potencial do país em aproveitar recursos já disponíveis para produzir materiais de alto valor agregado. Ao dominar etapas críticas como a obtenção de didímio, produção de ligas e fabricação de ímãs (Nd,Pr)-Fe-B, o desenvolvimento tecnológico conduzido em parceria com instituições como o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e a UFSC, mostrou a capacidade nacional em inovação e engenharia de materiais avançados voltados para aplicações estratégicas.

O **Projeto REGINA 2**, intitulado “PD&I para o desenvolvimento competitivo e sustentável de processos e produtos da cadeia produtiva de terras raras no âmbito da cooperação internacional”, estruturado em 2020 e iniciado no final de 2023, foi concebido como um projeto encomenda do MCTI, representa uma continuação direta do Projeto REGINA, ampliando e aprofundando as iniciativas previamente estabelecidas no contexto da cooperação Brasil-Alemanha, e a expandindo para a cooperação internacional como um todo. A proposta tem como objetivo central desenvolver metodologias, processos e produtos sustentáveis ao longo da cadeia produtiva de elementos terras raras (ETRs) no Brasil, integrando competências nacionais em áreas como análise de sustentabilidade, processamento mineral, metalurgia e desenvolvimento de novos materiais, em escala laboratorial e semi-piloto. Como evolução do REGINA, o projeto reforça a articulação entre instituições de pesquisa, indústria e parceiros internacionais, promovendo a consolidação de uma base tecnológica robusta e alinhada às demandas globais.

O **Projeto INCT-MATERIA** (Materiais Avançados à Base de Terras Raras: Inovações e Aplicações), iniciado em 2025, representa uma evolução natural das iniciativas previamente estruturadas pelo INCT-PATRIA, atuando como sua continuidade ao ampliar o escopo científico e a abrangência institucional no país. Mantendo o foco na consolidação da base científica nacional, o INCT-MATERIA, coordenado pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM), fortalece a atuação em áreas estratégicas como materiais magnéticos, incluindo ímãs de terras raras, com ênfase na formação de recursos humanos altamente qualificados, na produção científica e no desenvolvimento de competências em caracterização avançada, modelagem e engenharia de materiais. Como diferencial, essa nova etapa promove a expansão da rede de pesquisa, integrando um número significativamente maior de instituições distribuídas em todas as regiões do Brasil. Essa ampliação contribui para maior capilaridade do conhecimento, intensifica a colaboração entre grupos de excelência e reforça a capacidade nacional de geração de inovação, além de ampliar a pesquisa em três eixos principais: ITRs; Cerâmicas Complexas de Terras Raras e; Concentrados e Rotas Metalúrgicas. Dessa forma, o projeto não apenas dá continuidade aos avanços do INCT-PATRIA, mas também amplia sua relevância ao fornecer sustentação científica ainda mais robusta e abrangente para iniciativas voltadas à industrialização e ao desenvolvimento tecnológico na área das terras raras.

Por fim, o **Projeto MAGBRAS** “Demonstrador Industrial do Ciclo Completo de Produção Brasileira de Ímãs Permanentes de Terras Raras”, mais recente, com início no segundo semestre de 2025, foi estruturado com foco na construção de competências técnicas nas etapas críticas da cadeia produtiva de ímãs permanentes, incluindo o processamento mineral, obtenção de metais puros e ligas intermediárias, além do desenvolvimento de rotas de processamento para ímãs de alto desempenho e reciclagem de ímãs. Sua contribuição central reside em implementar o ciclo completo de produção de ímãs permanentes de terras raras no Brasil em escala de demonstração industrial, para atender à demanda nacional e internacional com produtos de base tecnológica brasileira. Para tal, o projeto é coordenado pelo SENAI e conta com a participação de 3 Fundações de Apoio, 7 ICTs e 28 empresas.

O CIT SENAI ITR, criado a partir do Laboratório-Fábrica de Ímãs de Terras Raras (LabFab-ITR) e posteriormente integrado à estrutura do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), atua como planta piloto e demonstrador industrial de ímãs permanentes, integrando pesquisa aplicada, engenharia de processos e demandas industriais. Sua estrutura contribui para o desenvolvimento tecnológico, a atração de investimentos e o fortalecimento do ecossistema nacional de inovação no segmento de ímãs de terras raras.

A articulação entre estes projetos, em especial os que ainda estão vigentes como o MAGBRAS, REGINA 2, INCT-MATERIA, e a própria estrutura do SENAI por meio do CIT SENAI ITR, consolidou uma rede de parcerias mais robusta, no qual a geração de conhecimento científico, desenvolvimento tecnológico e interação com a indústria passaram a ocorrer de forma mais coordenada.

Até 2026, esse conjunto de iniciativas estabeleceu bases técnicas relevantes para a estruturação de uma cadeia produtiva nacional com maior agregação de valor, com domínio científico e tecnológico relevantes. Contudo, a consolidação em escala industrial competitiva requer continuidade estratégica, dada a complexidade tecnológica, a criticidade do tema e a multiplicidade de atores envolvidos.

O conjunto de direcionadores estratégicos apresentado neste capítulo amplia e atualiza essas ações, inserindo-as em um arcabouço prospectivo alinhado ao horizonte 2026–2040, com vistas à consolidação

de capacidades tecnológicas do Brasil visando sua industrialização e implementação das etapas da cadeia de terras raras, promovendo a redução de vulnerabilidades externas e à inserção qualificada do Brasil na cadeia global de ímãs de alto desempenho.

5.2 Principais usos industriais: ciclo de vida de produtos com ímãs de terras raras

Desde a década de 80, os ímãs permanentes de terras raras, em especial os de Nd-Fe-B, destacam-se por apresentar o maior produto energia-máximo comercialmente disponível. Essa característica permite gerar campos magnéticos de elevada intensidade em volume reduzido, viabilizando dispositivos mais compactos, leves e eficientes. Como consequência, esses materiais passaram a ocupar posição central em sistemas eletromecânicos modernos e dispositivos eletroeletrônicos diversos, nos quais desempenho, confiabilidade, redução de massa e eficiência energética são requisitos fundamentais.

Os ITRs estão presentes em uma ampla gama de produtos industriais e de consumo, com diferentes níveis de exigência funcional e de desempenho. Em dispositivos eletroacústicos, sensores, atuadores e mecanismos de gravação, seu elevado produto de energia-máximo possibilita a redução dimensional e maior estabilidade durante a operação. Em sistemas de maior potência, como em motores de veículos elétricos, geradores eólicos de acionamento direto, servomotores industriais e equipamentos médicos, essas propriedades tornam-se ainda mais determinantes. A utilização destes ímãs garante melhor resposta dinâmica e menores perdas energéticas quando comparados a soluções eletromagnéticas convencionais, como por exemplo, os ímãs baseados em óxidos de ferro (ferrites).

Sob a ótica do ciclo de vida do produto, as aplicações industriais de ímãs de terras raras podem ser classificadas conforme o estágio de consolidação tecnológica e dinâmica de mercado em que se inserem:

- **Introdução:** aplicações emergentes, associadas a novas arquiteturas de produto ou avanços tecnológicos ainda em fase prematura de adoção industrial;
- **Crescimento:** aplicações já estabelecidas tecnicamente, com expansão de mercado impulsionada por aumento de demanda, escalabilidade ou substituição de soluções convencionais;
- **Maturidade:** aplicações consolidadas, com cadeias produtivas estruturadas e crescimento estável, predominando melhorias incrementais de desempenho e redução de custos;
- **Declínio:** aplicações cuja participação de mercado é reduzida em razão de mudanças tecnológicas, reorganização setorial ou adoção de alternativas mais competitivas.

A seguir, no Quadro 5.1, destacam-se os principais usos de ímãs de terras raras segundo as etapas do ciclo de vida dos produtos.

Quadro 5.1 - Principais usos industriais de ímãs de terras raras, segundo as etapas do ciclo de vida dos produtos.

Usos Industriais de ímãs de TRs	Fase do Ciclo de Vida dos Produtos (Nível Mundial)			
	Introdução	Crescimento	Maturidade	Declínio
Indústria Aeroespacial		x		
Geração de Energia Nuclear			x	
Geração de Energia Eólica		x		
Linhas de Transmissão de Energia			x	
Aplicações em Defesa		x		
Motores para Indústria Automotiva		x		
Fabricação e Operação de Satélites		x		
Sistemas de Refrigeração Magnética	x			
Eletrônicos de uso Cotidiano			x	
Robótica Industrial		x		
Armazenamento de Energia e Atuadores para Redes	x			
Ressonância Magnética			x	
Sistemas Ferroviários		x		
Discos Rígidos (HDD)				x

Fonte: Adaptado de RESEARCH AND MARKETS, 2025.

Abordam-se, a seguir, alguns dos principais produtos fabricados com ímãs de terras raras, especialmente de Nd-Fe-B, como eletrônicos de consumo, motores industriais, equipamentos de ressonância magnética, geradores eólicos, motores elétricos automotivos e trens de levitação magnética.

5.2.1 Eletrônicos de Consumo

Diversos produtos de uso cotidiano contêm elementos de terras raras em sua composição. Estes produtos, chamados de eletrônicos de consumo, são destinados ao uso pessoal, em contraste com equipamentos industriais. Eles são projetados para facilitar a comunicação, o entretenimento e a produtividade no dia a

dia. Alguns também incorporam ímãs permanentes como elementos funcionais e essenciais, incluindo eletroeletrônicos, eletrodomésticos, ferramentas elétricas, sistemas de acionamento e dispositivos de mobilidade urbana. Embora a demanda associada a cada unidade seja relativamente pequena em massa, o elevado volume global de produção desses bens representa parcela significativa do consumo total de ímãs de terras raras. A Figura 5.1 exemplifica onde elementos terras raras são utilizados em equipamentos eletroeletrônicos de consumo.

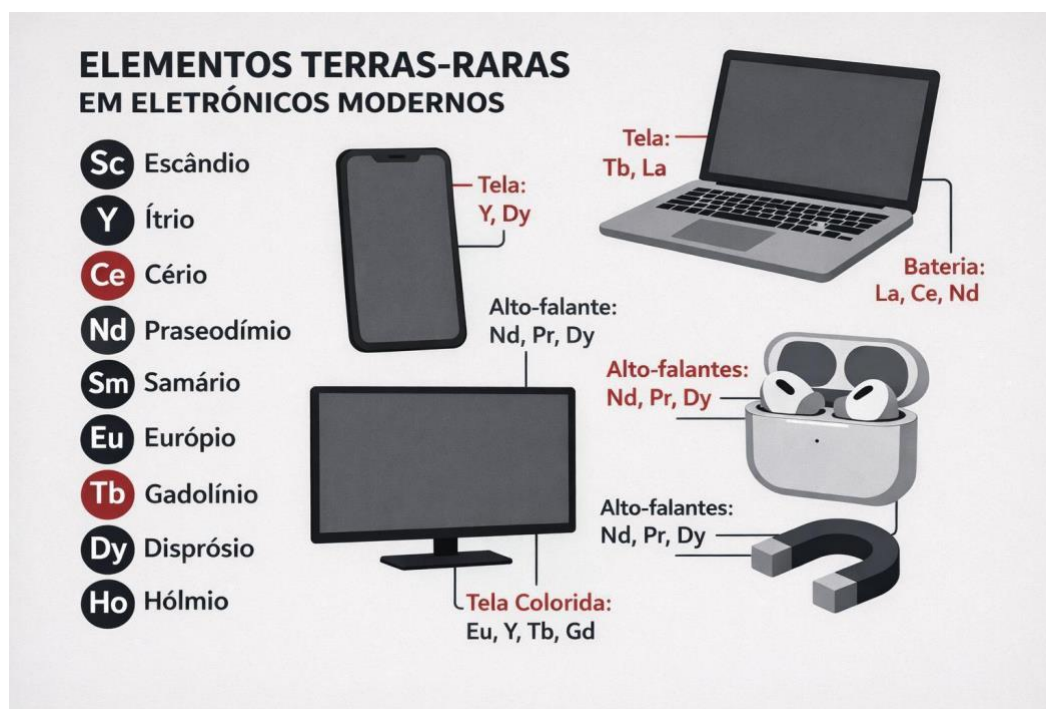


Figura 5.1 Aplicações de ímãs e outros elementos de terras raras em produtos do setor de tecnologias de informação e comunicação.

A adoção de ITRs nesses produtos está associada à possibilidade de obtenção de maior densidade de fluxo magnético em volumes reduzidos, o que permite fabricar produtos cada vez mais compactos, com melhor eficiência eletromecânica e maior integração funcional. Em dispositivos portáteis, como smartphones, fones de ouvido, discos rígidos, microatuadores e pequenos motores, ITRs possibilitam desempenho estável mesmo sob restrições geométricas severas.

Em aplicações que envolvem acionamentos rotativos, como máquinas de lavar, compressores, ventiladores e elevadores, a incorporação de motores síncronos de ímãs permanentes tem permitido a substituição de arquiteturas tradicionais com transmissão indireta por sistemas de acionamento direto, com ganhos em eficiência, redução de vibração e construção simplificada. No caso de elevadores, essa configuração pode eliminar a necessidade de grandes casas de máquinas, favorecendo maior aproveitamento de espaço na estrutura predial, além de reduzir a necessidade de manutenção.

Assim, o uso de ímãs nesses produtos é disperso em diferentes segmentos de mercado, mas as aplicações em bens de consumo e equipamentos domésticos constituem um componente relevante da demanda por ímãs de terras raras, tanto pelo volume agregado quanto pelo papel desses materiais na otimização de eficiência e compacidade dos produtos finais.

5.2.2 Motores Industriais

Historicamente, a aplicação de ímãs permanentes em motores industriais esteve associada a nichos específicos, sobretudo em situações com elevadas restrições geométricas, necessidade de densidade de torque também elevado ou operação em velocidade variável com controle preciso. No entanto, esse cenário vem se modificando de forma consistente nos últimos anos.

A evolução da eletrônica de potência, a ampla difusão de inversores de frequência, além da crescente exigência por eficiência energética, tem impulsionado a adoção de motores síncronos de ímã permanente em segmentos industriais antes dominados por máquinas de indução. Embora os motores à indução ainda representem a maior parcela instalada globalmente (RESEARCH AND MARKETS, 2025), observa-se expansão gradual de soluções baseadas em ímãs permanentes, especialmente em aplicações de bombeamento, ventilação, compressão, extrusão, papel e celulose, mineração e processamento industrial contínuo.

Os motores com ímãs permanentes costumam apresentar melhor rendimento em regimes de carga parcial, além de operarem com fator de potência elevado e menores perdas no rotor. Tais características têm permitido atender com maior facilidade às classes de eficiência elevada (IE4 e IE5), cada vez mais exigidas por regulamentações energéticas internacionais. Como resultado, a decisão de adoção deixa de ser apenas técnica e passa a considerar o custo total de propriedade, incluindo economia de energia ao longo da vida útil do equipamento.

Paralelamente, surgem arquiteturas híbridas, como motores de relutância síncrona assistidos por ímã (PM-assisted SynRM), representado na Figura 5.2, que buscam reduzir a quantidade de terras raras mantendo elevado desempenho eletromagnético. Essa abordagem combina eficiência energética com mitigação de risco na cadeia de suprimentos.

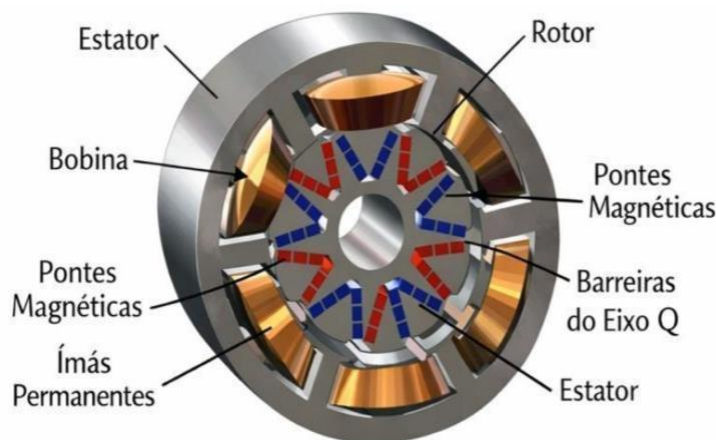


Figura 5.2 Representação esquemática de motor PM-assisted SynRM.

Do ponto de vista industrial, fabricantes globais como ABB, Siemens e Nidec expandiram suas linhas de motores síncronos de alto rendimento, enquanto no Brasil destacam-se soluções desenvolvidas pela WEG S. A., que incorporam ímãs permanentes em diferentes tipologias. Assim, a inserção de ímãs permanentes em motores industriais já não se limita a aplicações restritas, mas integra um movimento mais amplo de modernização do parque industrial, orientado por eficiência energética e redução de emissões associadas ao consumo elétrico.

5.2.3 Equipamentos de ressonância magnética

Os sistemas de ressonância magnética (RM) constituem equipamentos biomédicos de alto valor agregado e tecnologia consolidada no diagnóstico por imagem. O segmento de maior participação de mercado, voltado a sistemas de alto campo magnético (1,5 T e 3 T), é predominantemente baseado em tecnologias com supercondutores, em razão da elevada intensidade e homogeneidade de campo magnético requeridas.

Os ímãs permanentes de terras raras mantêm relevância principalmente em sistemas de baixo e médio porte, nos quais a ausência de criogenia, menor complexidade operacional e arquiteturas mais abertas favorecem aplicações específicas e soluções descentralizadas, preferenciais para atendimento a demandas da área da saúde. Assim, embora a participação relativa dos ímãs permanentes no mercado total de RM seja limitada, sua demanda permanece estável em nichos bem definidos. A Figura 5.3 mostra uma representação esquemática de uma máquina de ressonância magnética.

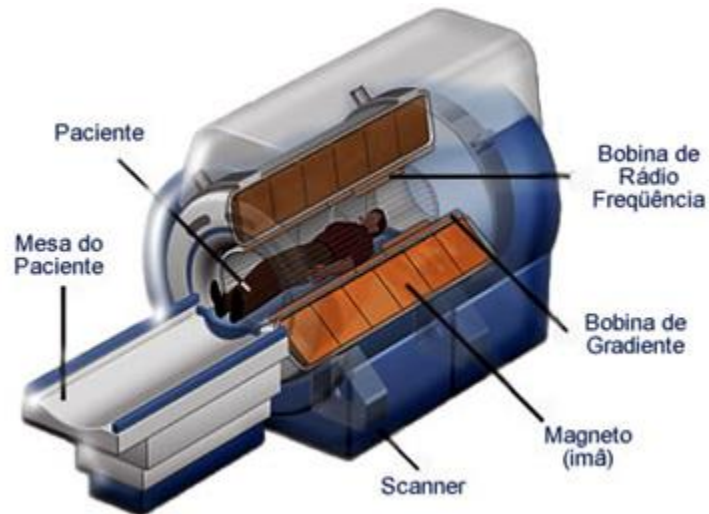


Figura 5.3 Representação esquemática de dispositivo para ressonância magnética.

No Brasil, a cadeia produtiva desses equipamentos é essencialmente dependente de importação, com domínio tecnológico concentrado em fabricantes internacionais com distribuidores e representantes nacionais.

5.2.4 Geradores Eólicos

Os geradores eólicos são atualmente uma das principais aplicações industriais de ímãs permanentes de terras raras, especialmente em turbinas de médio e grande porte (Figura 5.4). A incorporação de geradores síncronos com o uso ímãs permanentes tornou-se particularmente relevante no segmento offshore, onde a confiabilidade operacional, a redução de manutenção e a eficiência energética são determinantes.

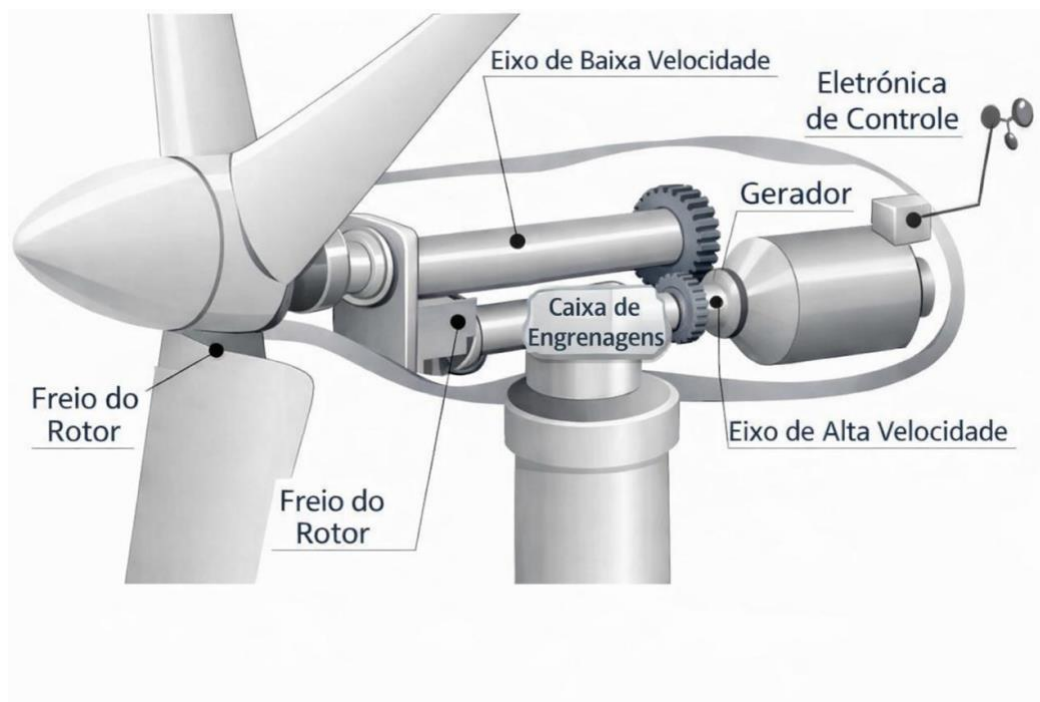


Figura 5.4 Representação esquemática de aerogerador síncrono.

Ao contrário do cenário observado no início da década de 2010, quando os geradores de ímãs permanentes representavam uma fração reduzida do mercado global, sua participação cresceu de forma significativa, sobretudo em turbinas offshore e em projetos de maior potência por unidade geradora. A evolução tecnológica levou à consolidação de outras arquiteturas, reduzindo a dependência de sistemas de excitação elétrica e, em alguns casos, eliminando ou simplificando caixas de engrenagens.

As principais vantagens técnicas associadas ao uso de ímãs permanentes incluem maior eficiência em regime parcial, elevada densidade de potência, redução de perdas associadas ao sistema de excitação e menor complexidade eletromecânica. Em ambientes *offshore*, onde intervenções de manutenção são particularmente onerosas, a redução de componentes sujeitos a desgaste contribui para maior disponibilidade operacional.

Paralelamente, observa-se um esforço tecnológico voltado à otimização do uso de terras raras pesadas, especialmente do disprósio, visando manter estabilidade térmica com menor quantidade desses elementos. Assim, o setor eólico permanece como um dos vetores mais relevantes de demanda por ímãs de terras raras, ainda que sob contínua pressão por eficiência e redução de custos ao longo da cadeia.

5.2.5 Motores Elétricos Automotivos

O segmento de veículos e motores elétricos constitui atualmente o principal vetor de crescimento da demanda por ITRs. Essa vertente associada à mobilidade urbana é impulsionada por metas globais de descarbonização, políticas industriais e avanços em tecnologia de baterias. Assim, tem-se ampliado de forma significativa a produção de veículos híbridos e elétricos. Nesse contexto, motores síncronos com

ímãs permanentes (PMSM), especialmente em configuração de ímã interno (IPM), representado na Figura 5.5, consolidaram-se como solução dominante para sistemas de tração.

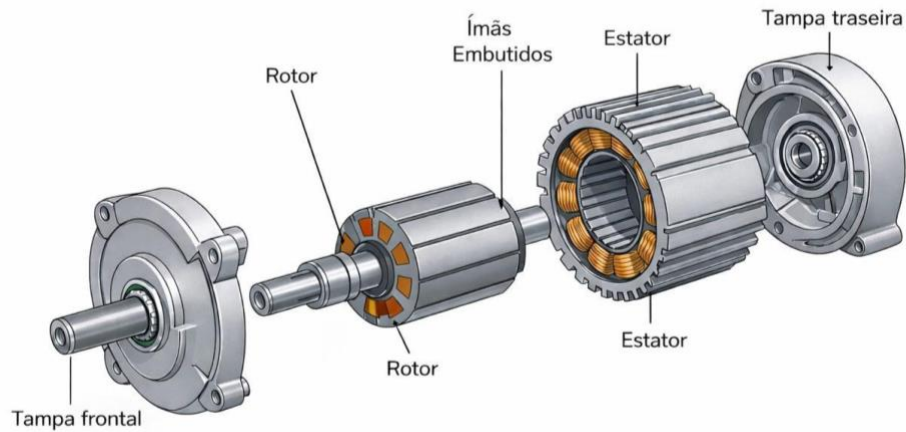


Figura 5.5 Representação esquemática de motor síncrono do tipo IPM.

Os ímãs de Nd-Fe-B são empregados principalmente no conjunto de propulsão elétrica. Cada veículo costuma conter de 1 a 2 kg destes ímãs em aplicações de tração principal, além de quantidades adicionais distribuídas em motores auxiliares (bombas, direção elétrica, sistemas de climatização e atuadores diversos), como mostrado em exemplos na Figura 5.6 O elevado torque produzido, alta eficiência em ampla faixa de velocidade e excelente desempenho em regimes transitórios tornam os motores síncronos com ímãs particularmente adequados aos requisitos de compactação e autonomia dos veículos elétricos modernos.

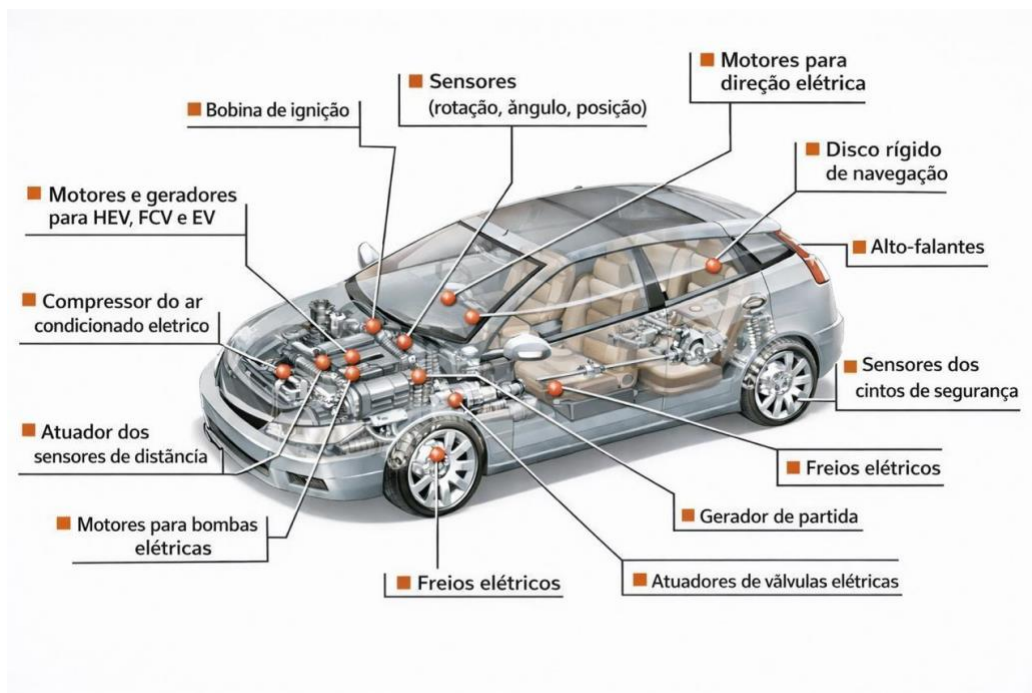


Figura 5.6 Representação esquemática de dispositivos em automóveis que contêm ímãs.

A adoção dessa tecnologia não se restringe aos automóveis de passeio. Ônibus elétricos, caminhões leves e pesados, bicicletas elétricas e sistemas de micromobilidade também incorporam motores de ímãs permanentes como solução predominante. Em aplicações de mais baixa potência, como bicicletas elétricas, a combinação entre simplicidade construtiva, eficiência e baixo peso praticamente inviabiliza alternativas de desempenho equivalente.

Paralelamente à expansão desse mercado, observa-se intensa atividade tecnológica voltada à otimização do uso de terras raras, assim como no caso dos geradores eólicos devido à demanda crescente e criticidade desses elementos. Também ganham espaço na indústria para formulação de produtos com tecnologias híbridas, buscando equilíbrio entre desempenho, custo e segurança da cadeia de suprimentos.

Dessa forma, o setor de mobilidade elétrica representa atualmente uma das mais relevantes fontes de demanda por ímãs de terras raras, com tendência de crescimento sustentado no médio e longo prazo, tanto em volume absoluto de veículos quanto na complexidade e potência dos sistemas de tração adotados.

5.2.6 Trens de Levitação Magnética

Entre as aplicações mais recentes associadas aos ITRs, os sistemas de transporte por levitação magnética (MagLev) ocupam posição singular. Diferentemente das aplicações já consolidadas ou em crescimento, como a geração de energia e a mobilidade elétrica, os sistemas MagLev ainda apresentam implantação restrita e dependente de investimentos estruturais de grande escala, sendo caracterizados por baixo volume global, porém elevada complexidade técnica por unidade instalada.

Nos arranjos de levitação eletrodinâmica, a utilização de ímãs permanentes de alto desempenho permite a manter o trem estável sob interação com trilhos condutores (Figura 5.7), viabilizando operação em velocidades superiores às dos sistemas ferroviários convencionais. A elevada resistência à desmagnetização e estabilidade térmica dos ímãs de Nd-Fe-B tornam esses materiais adequados a regimes dinâmicos intensos e a variações de carga características de sistemas de transporte de alta velocidade.

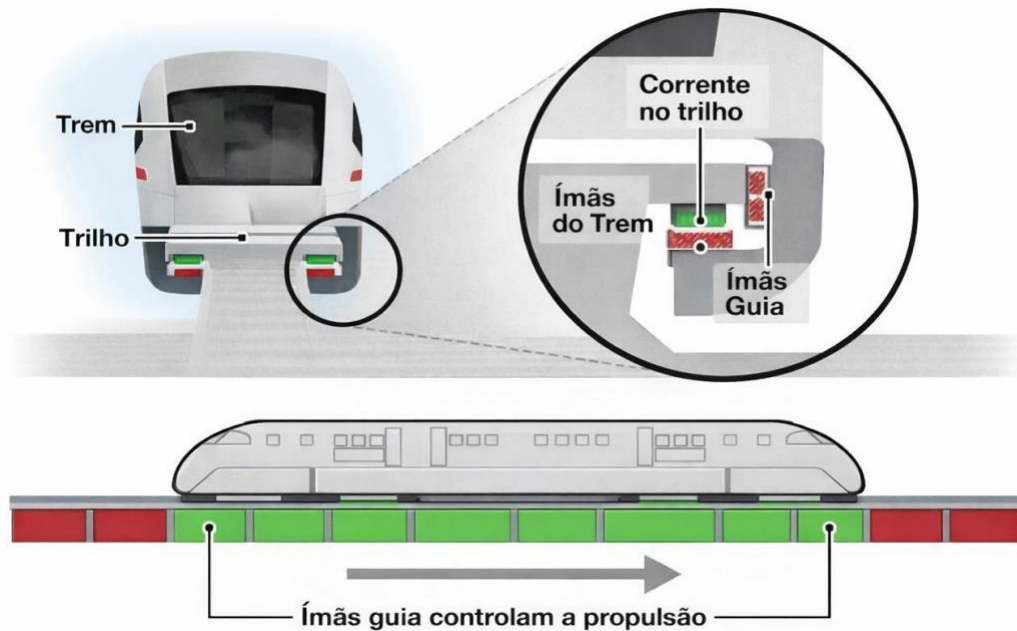


Figura 5.7 Representação esquemática de trilhos magnéticos (MagLev).

Apesar de ainda se situarem em estágio de maturidade comercial relativamente baixo quando comparados a veículos elétricos ou aerogeradores, os trens de levitação magnética representam uma aplicação de potencial estratégico de longo prazo. Sua eventual expansão dependerá não apenas de avanços tecnológicos, mas também de decisões de política pública frente à logística e planejamento urbano.

Do ponto de vista da demanda por terras raras, trata-se de uma aplicação industrial robusta, porém com impacto agregado ainda limitado. Contudo, os sistemas de levitação magnética antecipam desafios que se refletem em todo o setor: estabilidade térmica, confiabilidade e otimização do uso de elementos críticos. Esses aspectos remetem diretamente às rotas tecnológicas e aos processos de produção de ímãs, que passam a ser determinantes para sustentar aplicações futuras de maior exigência.

5.3 Cadeia produtiva de ímãs de terras raras

Os elementos terras raras possuem alta estabilidade quando na forma de óxidos. Assim, os processos de redução desses elementos demandam tecnologias singulares. Descrevem-se, a seguir, os processos de redução de óxidos de terras raras no intuito de obter ligas e subsequente produção dos ímãs permanentes.

A redução desses óxidos de terras raras para obtenção dos metais constitui etapa decisiva da cadeia produtiva, uma vez que esses óxidos apresentam elevada estabilidade termodinâmica e requerem processos energeticamente intensivos. Industrialmente, a rota predominante para produção em larga escala é a redução eletroquímica em sais fundidos, após conversão prévia dos óxidos em haletos ou carbonatos de terras raras.

Em processos eletrolíticos, o eletrólito é composto por misturas de haletos de terras raras com sais de metais alcalinos ou alcalino-terrosos. Sob aplicação de corrente elétrica, os íons de terras raras são reduzidos no cátodo, frequentemente constituído por molibdênio, tungstênio ou grafite. Estas são alternativas interessantes devido à estabilidade química em meios fundidos e condutividade elétrica. O metal reduzido pode ser coletado como fase líquida no fundo da célula ou formar liga intermediária, dependendo da configuração operacional e insumos. O controle da composição do eletrólito, da densidade de corrente e da atmosfera é essencial para minimizar contaminações por oxigênio, carbono ou inclusões indesejadas. A Figura 5.8 representa uma célula de redução típica para uso no contexto das terras raras.

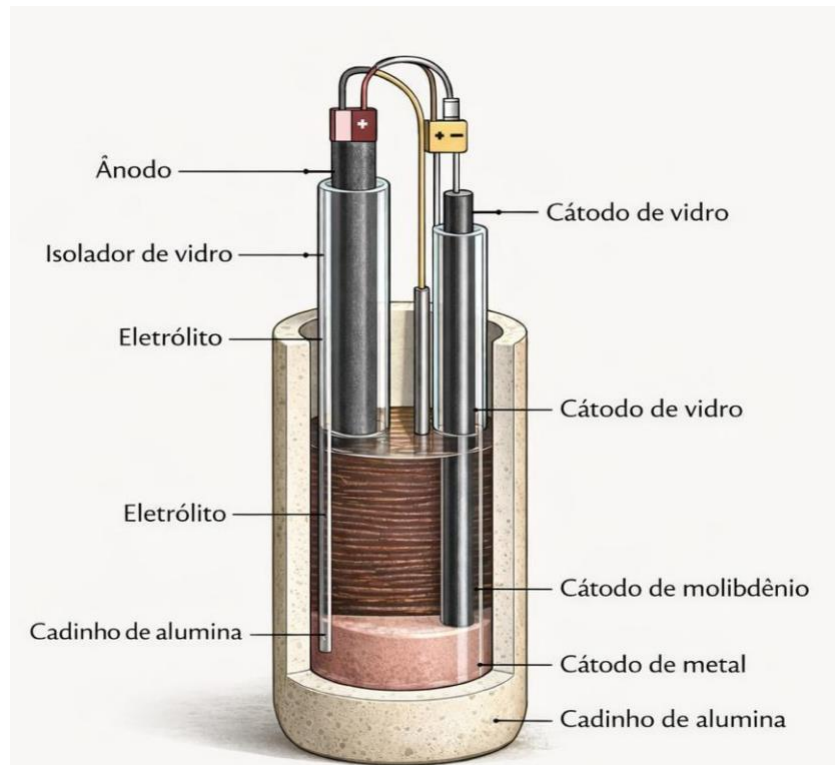


Figura 5.8 Representação esquemática de célula para redução eletrolítica.

Há outro processo alternativo, chamado de redução metalotérmica, como a calciotérmica. Embora seja tecnicamente viável e utilizada em contextos específicos ou laboratoriais, essa técnica de redução tem aplicação industrial mais limitada quando comparada à eletrólise de sais fundidos, sobretudo em função da complexidade no manejo de subprodutos e na purificação subsequente.

Após a redução, os metais de terras raras obtidos apresentam elevada reatividade, suscetíveis à oxidação. Por essa razão, etapas subsequentes de armazenamento e formação de ligas ocorrem sob atmosfera

inerte ou alto vácuo. A pureza e o controle do teor de oxigênio dissolvido nessa fase são determinantes para as propriedades metalúrgicas e magnéticas das ligas que serão produzidas, influenciando diretamente no desempenho do ímã produzido ao final da cadeia.

Cada rota de transformação para fabricação dos metais de terras raras apresenta vantagens e limitações associadas a cada elemento específico, à pureza requerida, à escala de produção e ao custo operacional. Embora compartilhem comportamento químico semelhante, os elementos de terras raras exibem variações significativas em ponto de fusão, pressão de vapor e estabilidade termodinâmica dos compostos intermediários. Essas diferenças influenciam diretamente a escolha da rota de redução dos óxidos, halógenos ou carbonatos e a viabilidade de aplicação de um processo único para todos os elementos. Além disso, a possibilidade de estados de oxidação alternativos em alguns casos impõe ajustes nos parâmetros eletroquímicos e no controle do eletrólito durante a redução.

No cenário industrial global, a produção de metais de terras raras encontra-se fortemente concentrada, com domínio tecnológico e escala produtiva consolidados sobretudo na Ásia. No Brasil, apesar da existência de reservas minerais e competência científica instalada, a etapa de redução metálica ainda não alcançou maturidade industrial. Grupos de pesquisa em instituições como o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e a Universidade de São Paulo (USP) já desenvolveram estudos relevantes em metalurgia de terras raras. No contexto atual, iniciativas voltadas à segurança de suprimento e à agregação de valor às reservas nacionais recolocam a discussão sobre internalização dessas etapas, especialmente considerando a experiência brasileira em metalurgia de alumínio e outros metais não ferrosos, que pode representar base tecnológica potencial para futuras adaptações.

Como etapa subsequente à redução, tem-se a fabricação das ligas intermetálicas destinadas à produção de ímãs permanentes. No caso dos sistemas de Nd-Fe-B, o neodímio constitui tipicamente cerca de 25–30% em massa da composição nominal da liga. O praseodímio pode substituir parcial ou integralmente o neodímio. Já elementos como disprósio ou térbio são empregados em menores proporções para aumentar a coercividade (resistência à desmagnetização) e estabilidade térmica.

A fabricação dessas ligas envolve fusão sob vácuo ou atmosfera inerte, combinando os metais de terras raras com ferro e boro (frequentemente introduzido na forma de liga de Fe-B). Embora o princípio metalúrgico seja relativamente simples, o controle de contaminações é crítico. Teores residuais de oxigênio, carbono e elementos metálicos indesejados influenciam na formação das fases intermetálicas, especialmente com relação à fase $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, principal responsável pelo desempenho magnético destes tipos de ímãs.

Assim, a transição da etapa de redução para a formação da liga não representa apenas uma sequência operacional, mas uma etapa de definição metalúrgica que condiciona toda a rota empregada para a fabricação dos ímãs permanentes.

Há outros requisitos metalúrgicos específicos na preparação da liga para ímãs de Nd-Fe-B, entre eles a minimização da presença de ferro livre na microestrutura da liga após a solidificação. A formação de fases indesejadas pode ser mitigada por controle adequado da composição e, sobretudo, pela taxa de resfriamento durante a solidificação. Este parâmetro influencia a distribuição das fases ricas em terras

raras e a formação da fase $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Processos como *strip casting* são amplamente empregados justamente para garantir a solidificação rápida da liga (Figura 5.9).

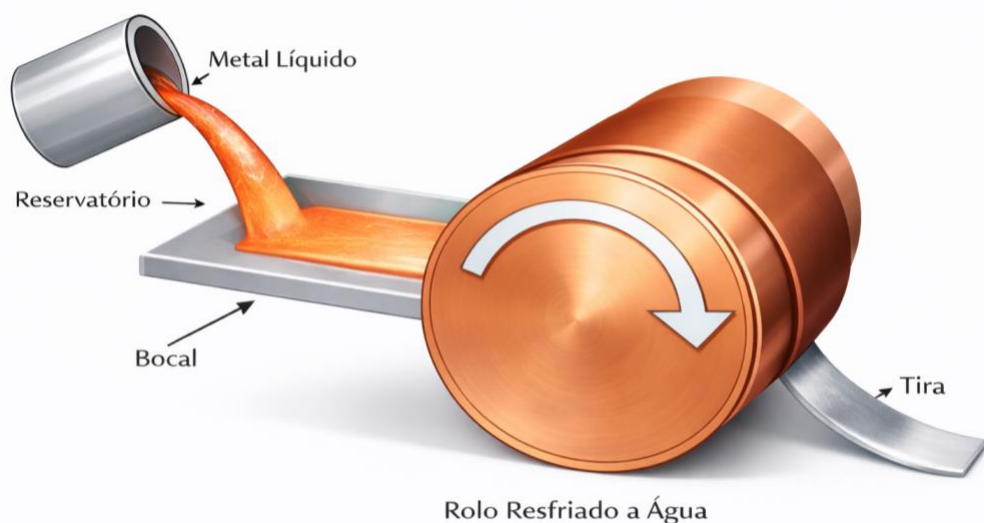


Figura 5.9 Representação esquemática do processo de lingotamento em tiras (*strip casting*).

No Brasil, existem institutos de pesquisa, como o IPT, que possui infraestrutura de escala piloto com *strip casting*. O desafio maior não está na fusão em si, mas na integração dessas operações com controle rigoroso de contaminação e especificações adequadas ao uso para ímãs de mais elevado desempenho.

Uma vez que as ligas são produzidas, as etapas subsequentes são referentes à fabricação de ímãs sinterizados. Inicia-se com a liga solidificada na forma de lingotes ou fitas, que são fragmentados e submetidos a etapas de moagem. Inicialmente, pode-se empregar a técnica de Decrepitação por Hidrogênio (Hydrogen Decrepitation - HD) para fragilizar estes compostos, facilitando a cominuição subsequente. A obtenção de pós com granulometria adequada é etapa crítica, pois o tamanho e a distribuição das partículas influenciam diretamente nas propriedades magnéticas finais.

O pó destinado à sinterização apresenta tipicamente tamanho médio na faixa de 2 a 7 μm , com sua distribuição controlada. A tecnologia industrial mais difundida para obtenção desse pó fino é via moagem com jatos opostos sob atmosfera inerte. Nesse processo, a fragmentação ocorre por colisão entre partículas aceleradas por gás (geralmente nitrogênio ou argônio de alta pureza), minimizando contaminação mecânica e permitindo controle rigoroso do teor de oxigênio e adequação da distribuição granulométrica.

Após a moagem, o pó é submetido à compactação. Durante essa etapa, aplica-se um campo magnético externo para orientar cada partícula, promovendo anisotropia magnética. Entretanto, existem processos avançados com PLP (Pressless Process), já em escala piloto, que isenta a etapa de compactação uma vez que a consolidação das peças se dá exclusivamente pela sinterização assistida por fase líquida.

Este processo de sinterização ocorre tipicamente entre 1050 a 1200 $^{\circ}\text{C}$ sob vácuo ou atmosfera inerte. Isto para promover a consolidação das peças e atingir densidades superiores a 95–98% da densidade teórica. Durante essa etapa, forma-se uma microestrutura composta pela fase ferromagnética principal $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$

e fases ricas em terras raras nos contornos de grãos, essenciais para o desenvolvimento da coercividade. Tratamentos térmicos subsequentes, geralmente na faixa de 500 a 600°C, são realizados para promover redistribuição das fases de contorno de grão, podendo aprimorar significativamente a resistência à desmagnetização.

Dessa forma, a fabricação de ímãs sinterizados envolve uma sequência de etapas interdependentes, nas quais composição química, controle atmosférico, microestrutura e parâmetros térmicos atuam de forma integrada para definir as propriedades magnéticas finais, garantindo o controle de qualidade. As etapas principais são sumarizadas na Figura 5.10.

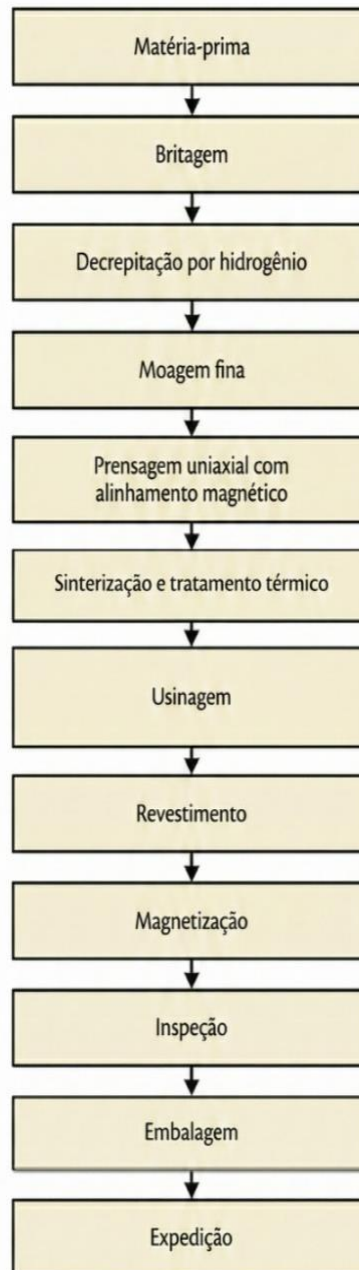


Figura 5.10 Processo produtivo convencional para fabricação de ímãs de Nd-Fe-B.

No contexto brasileiro, todo este circuito relativo à produção de ímãs tem recebido destaque pelo seu potencial estratégico. O Laboratório de Materiais Magnéticos (MAGMA), localizado na UFSC-Florianópolis-SC, consolidou-se como principal infraestrutura acadêmica dedicada à síntese e caracterização de ímãs de terras raras no país, operando em escala laboratorial e piloto, com foco em desenvolvimento microestrutural e otimização de propriedades magnéticas. Ademais, o CIT SENAI ITR (Laboratório-Fábrica de Ligas e Ímãs de Terras Raras), lotado em Lagoa Santa-MG, atua como planta piloto e demonstrador industrial para produção nacional de ímãs permanentes, evidenciando o potencial tecnológico para escalonamento e validação de processos.

O interesse industrial nessas etapas também é evidente. Empresas como WEG S.A. e NIDEC, grandes consumidoras de ímãs em motores elétricos, e grupos como PETROBRAS, com demanda potencial, acompanham o desenvolvimento nacional da cadeia produtiva. Esse alinhamento entre capacidade científica, infraestrutura piloto e demanda industrial podem criar condições para reduzir a dependência externa e agregar valor às reservas nacionais de terras raras.

Quanto à finalização da cadeia de fabricação dos ímãs, esta se dá com a usinagem e recobrimento dos ímãs. Na usinagem, pontos de atenção estão relacionados à fragilidade dos componentes e à sua suscetibilidade à oxidação. Processos como corte com ferramentas diamantadas, retífica de precisão e eletroerosão (Electrical Discharge Machining - EDM) são empregados conforme a complexidade geométrica exigida.

Com a superfície preparada, é realizado recobrimento para proteção contra corrosão. Esta é etapa obrigatória, especialmente para ímãs de Nd-Fe-B, cuja microestrutura contém fases ricas em terras raras nos contornos de grão, mais reativas eletroquimicamente. Sistemas de revestimento multicamadas, como Ni-Cu-Ni são amplamente utilizados, mas aplicações industriais modernas também empregam revestimentos orgânicos (epóxi) e alumínio. O desempenho do revestimento influencia diretamente a durabilidade do componente em motores, geradores e sistemas expostos a umidade, ambientes salinos (como em turbinas eólicas *offshore*), vibração ou variações térmicas.

Na etapa final, os ímãs são magnetizados até a saturação por aplicação de campos magnéticos intensos, geralmente por meio de sistemas de magnetização por pulso capacitivo e destinados como insumos para suas aplicações, como na mobilidade elétrica e geração de energia.

Assim, a etapa final de fabricação, qualificação e aplicação dos ímãs não representa apenas a conclusão do processo, mas o ponto de convergência entre ciência e indústria para a consolidação de uma cadeia produtiva nacional integrada. Entretanto, nas últimas duas décadas, essa rota passou a incorporar duas dimensões estratégicas adicionais: a reciclagem de materiais e a engenharia microestrutural voltada à redução do consumo de elementos críticos, especialmente terras raras pesadas como disprosio e térbio.

Globalmente, a reciclagem de ímãs de terras raras ainda representa fração modesta de suprimentos total, mas sua relevância cresce à medida que aumenta o volume de equipamentos em fim de vida. A União Europeia, por exemplo, tem implementado ativamente iniciativas voltadas à gestão de ímãs permanentes em fim de vida. Diante de uma dependência de importação de elementos de terras raras estimada entre 98% e 99%, bem como de uma taxa de reciclagem inferior a 1% no continente europeu, o bloco busca estabelecer um sistema de economia circular em ciclo fechado (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2024).

Nesse contexto, as principais iniciativas concentram-se no desenvolvimento de processos de reciclagem de alto desempenho baseados em rotas de “ciclo curto” (*short-loop*), no fortalecimento das cadeias de suprimento e na implementação de novos marcos regulatórios.

As rotas industriais mais promissoras concentram-se em reaproveitamento direto de ligas magnéticas ou recuperação hidrometalúrgica das terras raras, buscando reduzir etapas de refino primário e dependência de mineração. No Brasil, o reaproveitamento dos ímãs como matéria-prima ainda se encontra em estágio inicial, mas há iniciativas em desenvolvimento no âmbito acadêmico e para consolidação em escala piloto, alinhadas à estruturação de uma cadeia nacional de ímãs. O potencial é particularmente relevante considerando a futura disponibilidade de resíduos, bem como a possibilidade de integração com programas de economia circular.

Do ponto de vista técnico, a reciclagem impõe desafios específicos, desde a separação dos ímãs de seus produtos de origem em fim de vida, ao controle de impurezas, oxidação e à homogeneidade da liga reciclada. Estes aspectos impactam diretamente as propriedades magnéticas finais. Assim, a viabilidade da reciclagem está intimamente ligada ao domínio das etapas primárias de tratamento de resíduos, até processos subsequentes que podem envolver, dissolução, fusão e processamento via metalurgia do pó.

Assim, é comum que ímãs reciclados tenham desempenho inferior aos originais. Para que ímãs reciclados possam retornar às suas aplicações, em especial os que são submetidos a altas temperaturas, precisa-se do aumento da coercividade dado pela adição de disprósio ou térbio, ou ainda por optar por rotas de reciclagem mais longas e dispendiosas. Entretanto, esses elementos apresentam maior criticidade econômica e geopolítica, além de elevarem o custo desses insumos já reciclados.

Nesse contexto, técnicas avançadas como a difusão de contorno de grão (Grain Boundary Diffusion – GBD) tornaram-se estratégicas. A abordagem, que também pode ser aplicada na fabricação tradicional de ímãs à base de Nd-Fe-B, consiste na introdução controlada de pequenas quantidades de Dy ou Tb na superfície do ímã, seguido de tratamento térmico que promove sua difusão preferencial pelos contornos de grão. Dessa forma, cria-se uma camada enriquecida por elementos terras raras pesados ao redor de grãos da fase principal, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, elevando a coercividade uma vez que o processo de desmagnetização se origina na superfície de cada grão (Figura 5.11).

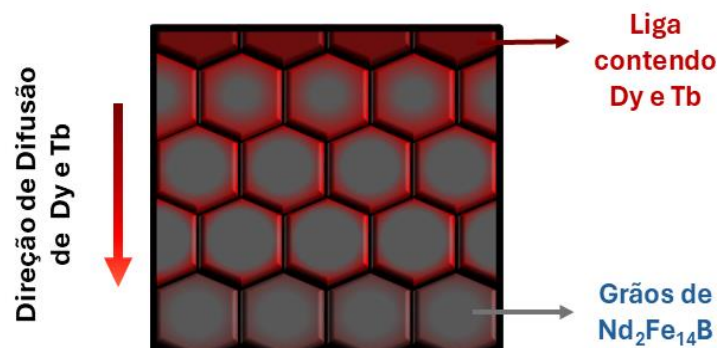


Figura 5.11 Representação esquemática do processo de difusão via contornos de grão em ímãs à base de Nd-Fe-B.

Esse método permite reduzir significativamente o consumo de elementos de terras raras pesados por unidade de ímã, mantendo desempenho adequado para aplicações que exigem mais elevada coercividade.

Por esta razão, a incorporação da reciclagem e de técnicas como GBD transforma o processo de fabricação de ímãs de uma sequência linear em um sistema integrado, como estratégia complementar para que a cadeia produtiva seja sustentável.

No cenário mundial relativo aos materiais críticos, a competitividade de cada país não se define apenas pela capacidade de produzir o ímã, mas pela eficiência no uso das terras raras, pela redução da intensidade material por aplicação e pela integração de rotas circulares. Para países como o Brasil, que buscam consolidar sua capacidade industrial na área, o domínio dessas tecnologias avançadas representa não apenas avanço técnico, mas elemento de posicionamento estratégico na cadeia de valor.

Para entendimento do panorama acerca das tecnologias de produção de ímãs, realizou-se um levantamento de patentes para as etapas iniciais da cadeia produtiva de ímãs de terras raras. O objetivo foi identificar tendências, áreas de maior concentração de inovação e principais agentes atuantes nessas etapas da cadeia.

O levantamento foi conduzido a partir da base de dados Derwent Innovations Index. Para tanto, foi adotada uma estratégia de busca estruturada, considerando palavras-chave, códigos de classificação tecnológica e recortes temporais pertinentes ao escopo do estudo, conforme apresentado no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 Estratégia de busca adotada no levantamento de patentes referentes a ímãs permanentes de terras raras

Referência	Busca	Resultados
#1	"rare earth*"	78221
#2	"magnetic properties"	5669
#3	"permanent magnet*"	134211
#4	NdFeB	1078
#5	"rare earth*" AND NdFeB	270
#6	"rare earth*" AND "permanent magnet*"	4359
#7	"rare earth*" AND "magnetic properties"	596
#8	"rare earth permanent magnet*"	2516
#9	"rare earth magnet*"	1521
#10	"rare earth magnet*" OR "rare earth permanent magnet*" OR ("rare earth*" AND "permanent magnet*") OR ("rare earth*" AND "magnetic properties") OR ("rare earth*" AND NdFeB)	6003

Fonte: Estratégia de busca na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 02 de abril de 2026.

Identificaram-se 6003 patentes no período de 2015 a 2025 (#10), que foram classificadas por ano, proprietário e código ICP. A Figura 5.12 mostra a evolução das patentes referentes a ímãs permanentes de TRs durante o período relatado.

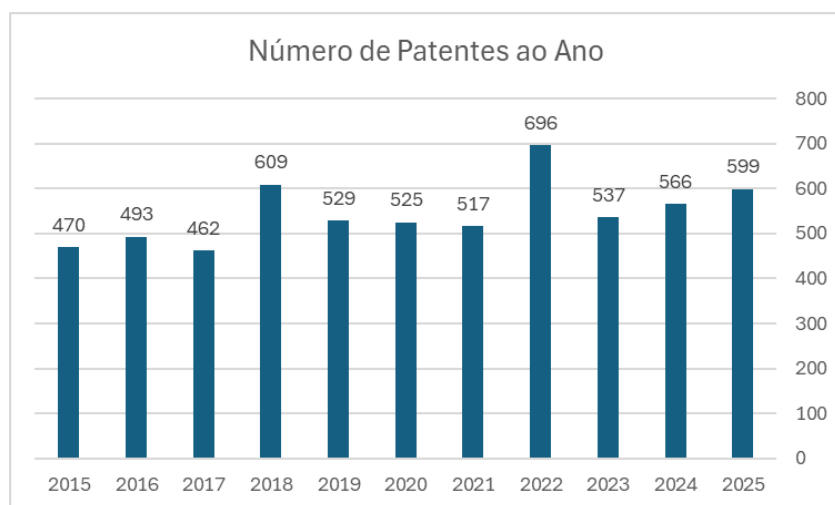


Figura 5.12 Evolução das patentes referentes a ímãs permanentes de terras raras

Fonte: Busca direta na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 02 de abril de 2026.

O Quadro 5.3 mostra os principais proprietários (critério top 20) destas patentes selecionadas. O Quadro 5.3 tem como indicativo que a maioria das empresas proprietárias de patentes referentes a ímãs permanentes de TRs é japonesa ou chinesa. A empresa líder neste período de 2015 a 2025 foi a TDK, seguido de institutos e empresas também orientais como a Ningbo Inst Materials Technology Eng C e a Toyota.

Quadro 5.3 Proprietários de patentes referentes a ímãs permanentes de terras raras: 2015-2025

Proprietário	Total
Tdk Corp	103
Ningbo Inst Materials Technology Eng C	96
Toyota Jidosha Kk	95
Toyota Motor Corp	70
Xiamen Tungsten Co Ltd	68
Fujian Changting Golden Dragon Rare Eart	65
Univ Jiangxi Sci Technology	64

Proprietário	Total
Hitachi Metals Ltd	53
Star Group Ind Co Ltd	51
Cent Iron Steel Res Inst	50
Toshiba Kk	50
Beijing Zhongke Sanhuan Hi Tech Co Ltd	49
Fujian Changting Jinlong Rare Earth Co	49
Mitsubishi Electric Corp	49
Univ Beijing Technology	45
Grirem Advanced Materials Co Ltd	41
Zhejiang Innuovo Magnetics Co Ltd	39
Toshiba Corp	38
Baotou Inst Magnetics New Materials Co	37
Univ Zhejiang	35

Na sequência, o Quadro 5.4 mostra os resultados da análise das 6003 patentes, classificadas segundo as subclasses e respectivos códigos da International Patent Classification (ICP), indicando os dez códigos mais registrados para estas patentes.

Quadro 5.4. Patentes referentes a ímãs permanentes de terras raras, classificadas por subclasses e respectivos códigos da ICP: 2015-2025 (critério top 10)

TOP 10 classificações	Total	Porcentagem
H01f-041/02	1691	28%
H01f-001/057	1233	21%
C22c-038/00	446	7%
B22f-003/00	423	7%

TOP 10 classificações	Total	Porcentagem
H01f-001/08	417	7%
H02k-001/27	406	7%
H01f-001/053	388	6%
B22f-001/00	356	6%
H01f-001/055	325	5%
B22f-003/24	318	5%

Na análise das patentes por código da ICP, constatou-se que as subclasses ICP de maior representatividade pertencem ao grupo H01F de ímãs; indutâncias; transformadores; seleção de materiais por suas propriedades magnéticas. Adicionalmente, verificou-se que as áreas de conhecimento dessas patentes pertencem majoritariamente à engenharia.

O presente levantamento das patentes revela intensa atividade tecnológica advinda de países orientais no contexto da cadeia de terras raras para ímãs, especialmente da China e do Japão. Esses países são importantes exportadores e usuários de ímãs permanentes. No contexto nacional, é importante visualizar oportunidades de patenteamento de nossas tecnologias, bem como identificar potenciais desenvolvimentos a partir da queda de patentes.

5.4 Competência atual associada à cadeia produtiva de ímãs de terras raras

No cenário atual, a avaliação das competências nacionais associadas à cadeia produtiva de ímãs de terras raras evidencia um momento de transição: embora o Brasil ainda não possua produção industrial consolidada de ímãs sinterizados. A Figura 5.13 mostra as competências no país referente à produção de ímãs. Já houve avanços significativos na última década na consolidação de núcleos de pesquisa, desenvolvimento tecnológico e em escala piloto, porém carecem de avanços para pleno domínio e em escala industrial (produção). As competências instaladas refletem o acúmulo das iniciativas descritas na Seção 5.1 e estão distribuídas ao longo da cadeia conforme detalhado a seguir.

Jazidas e Atividade Mineral:

Ocorrências em Poços de Caldas, Araxá, Pitinga, Tapira, Salitre e outras regiões

**Usos Industriais:**

- Indústria aeroespacial
- Geração de energia nuclear
- Geração de energia eólica
- Transmissão de energia elétrica
- Aplicações em defesa
- Indústria automotiva
- Sistema de refrigeração magnética
- Eletrônicos de Consumo

Figura 5.13 Mapeamento das competências brasileiras na produção de ímãs.

No nível experimental e de pesquisa aplicada, o país apresenta domínio técnico em praticamente todas as etapas da cadeia, incluindo separação de óxidos e outros subprodutos de elementos de terras raras, síntese de ligas, processamento de pós, sinterização, caracterização magnética e estudos avanços de engenharia microestrutural. Destacam-se centros de pesquisa como o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), o IPT e a UFSC, que se consolidaram como principais centros nacionais dedicados à síntese e caracterização de ímãs ou de insumos necessários para abastecimento da cadeia produtiva, em escala laboratorial e piloto. A interação desse ambiente acadêmico com demandas industriais tem permitido também alinhamento com requisitos reais de aplicação e estimulado o escalonamento da produção de ímãs.

No âmbito de desenvolvimento piloto e demonstração tecnológica, o CIT SENAI ITR representa um marco relevante. Operando como laboratório-fábrica e planta piloto, o centro tem capacidade de produzir ligas e ímãs Nd-Fe-B em escala demonstrativa, funcionando como ambiente tecnológico para industrialização. Essa estrutura preenche uma lacuna histórica entre a pesquisa acadêmica e a validação industrial. Assim, permite-se testar rotas de fabricação, qualificar materiais e reduzir riscos tecnológicos para investidores. Entretanto, quando se observa a produção em escala industrial, o domínio ainda é parcial ou incipiente.

Do ponto de vista da demanda e interface industrial, o Brasil possui empresas que utilizam ímãs permanentes, especialmente nos segmentos de motores elétricos e sistemas eletromecânicos. Empresas como WEG S.A., Schultz, Bosch e NIDEC, por exemplo, figuram entre os grandes consumidores globais de motores industriais. No setor energético, a expansão de parques eólicos e a consolidação da mobilidade elétrica ampliam a demanda potencial por geradores e motores com ímãs permanentes. Esse contexto cria uma base de mercado doméstico capaz de sustentar uma produção nacional caso os gargalos tecnológicos sejam superados.

No campo da inovação e desenvolvimento de processos de fabricação avançados para subsidiar essa cadeia produtiva, os grupos de pesquisa brasileiros mantêm inserção internacional ativa, com participação

em redes de colaboração, publicações especializadas e desenvolvimento de temas de fronteira, como técnicas de difusão de contorno de grão (GBD), otimização microestrutural e reciclagem de ímãs. Entretanto, a consolidação de uma cadeia plenamente integrada ainda depende de investimentos adicionais em infraestrutura industrial, escalonamento produtivo e políticas de fomento alinhadas a estratégias de minerais críticos.

5.5 Visão de futuro e objetivos estratégicos: horizonte 2040

A partir desse diagnóstico descrito ao longo do presente capítulo, definiram-se para a cadeia de ímãs de terras raras a visão de futuro para 2040 e os objetivos estratégicos para alcançar essa visão (Quadro 5.5). Assim, tais objetivos são expressos de acordo com as dimensões do presente estudo e servem como indicadores para traçar caminhos estratégicos sobre o tema em âmbito nacional.

Visão de futuro da cadeia produtiva de ímãs de TRs Brasil: horizonte 2040

Fabricação de ímãs de TRs em escala industrial a partir de TRs de origem nacional, atuando de forma competitiva no atendimento ao mercado nacional e internacional, obedecendo aos preceitos de sustentabilidade.

Quadro 5.5 Objetivos estratégicos para alcance da visão de futuro 2040.

Dimensão	Situação atual	Objetivos estratégicos	Situação 2040
ME – Mercado de Ímãs de Terras Raras (ITRs) e de seus usos industriais	A China produz cerca de 90% dos ITRs do mundo, dificultando a exportação por meio de cotas e impostos. Aumento da demanda e preocupação da indústria mundial com a disponibilidade de matéria-prima para a fabricação vêm aumentando a demanda por projetos de P&D com objetivo de lançar novas gerações de produtos em alinhamento às tecnologias de baixo carbono, que utilizam ímãs.	Ampliar a escala de produção industrial de ITRs com uso de TRs de origem nacional a preços competitivos. Focar no desenvolvimento da cadeia de ímãs induzida pelo mercado a partir da ponta da cadeia produtiva (usos industriais). Estruturar e fortalecer a participação dos fabricantes e usuários na cadeia.	Com o aumento crescente das novas tecnologias para realização da transição energética, existe uma demanda crescente por ITRs, principalmente para os carros híbridos e elétricos e geradores eólicos. Além das perspectivas de aumento na demanda de ímãs nas tecnologias de baixo carbono, há um crescente desenvolvimento na área de eletroeletrônicos e motores de baixa manutenção, visando à miniaturização, o que impacta na demanda por ímãs.
RP – Reservas e produção de TRs no Brasil	Mineradoras como o grupo Viridis tiveram a inauguração recente para produção de TRs. Atualmente, outras mineradoras anunciaram projetos para a exploração e produção de TRs. No Brasil há registros de ocorrências de TRs em Araxá, Poços de Caldas, Catalão e Pitinga, Tapira, Salitre e em outras regiões, com potencial para exploração mineral. Globalmente, há um movimento em busca das TRs por serem considerados estratégicos para os próximos anos.	Garantir o escalonamento de produção de TRs de origem nacional. Fontes de matéria-prima potenciais seriam, por exemplo, as argilas iônicas de Poços de Caldas, além da monazita estocada pela empresa Indústrias Nucleares do Brasil (INB) e os rejeitos de Catalão/Fosfertil e Araxá. Viabilizar novas fontes de exploração de TRs. Colocar o Brasil como grande player na exploração de ETRs.	Reservas minerais de TRs conhecidas. A disponibilidade de TRs no país é satisfatoriamente conhecida, e a produção é realizada de maneira rentável e sustentável, atendendo à demanda nacional de uso de ímãs. Inserção competitiva em mercados externos. Estimativa numérica: 10.000 t/ano.
PO – Política nacional para TRs: foco na cadeia produtiva de ímãs de TRs	Priorização dos minerais estratégicos nas políticas do governo federal: ENCTI 2012-2015, PBM-2012 2014, PAC CPRM 2010-2014 e PNM-2030. Além disso, acordos recentes junto a países como EUA, países da união europeia mediante acordo com Mercosul, e Índia.	Criar incentivos fiscais para uso de TRs de origem nacional, de natureza tributária, para a integração a montante da cadeia produtiva de ITRs, em especial para viabilização da indústria nacional. Criar programas de incentivos para estados e municípios atuarem no mercado como	Continuidade das políticas públicas voltadas para o desenvolvimento da cadeia produtiva de ímãs com foco na proteção nacional, revisadas em função das prioridades estratégicas do país e dos avanços tecnológicos alcançados. Ampliação da indústria nacional da produção de ímãs e suas aplicações.

Dimensão	Situação atual	Objetivos estratégicos	Situação 2040
		demandante de produtos que utilizem tecnologias baseadas em ITRs, por exemplo, ônibus elétricos, trens magnéticos, geradores elétricos, dentre outros usos.	
MR – Marco regulatório: foco na cadeia produtiva de ITRs	A legislação vigente ainda não enfatiza a produção de ITRs de forma competitiva, sustentável, com agregação de valor.	Encaminhar e aprovar o novo marco regulatório mineral, explicitando e direcionando aspectos referentes ao desenvolvimento da cadeia produtiva de TRs como produtos estratégicos para o contexto nacional.	Novo marco regulatório estimula os investimentos produtivos e prioriza a produção de TRs de forma competitiva, com importância estratégica e sustentável.
INV – Investimentos na cadeia produtiva de ITRs	No Brasil, existem poucas empresas atuando na fabricação de ímãs de ferrite para atendimento às demandas nacionais de menor desempenho. Não há investimento diretamente ligado à produção de ITRs em escala industrial, tanto pela indústria pública ou pela iniciativa privada. Existem investimentos para estabelecimento da cadeia em escala piloto, mostrando o potencial do setor industrial brasileiro para o mercado.	Atrair mais investimentos de forma escalonada (busca de domínio tecnológico em escalas científica, piloto e industrial); Consolidar capacidade de produção em nível industrial de ITRs; Integrar os processos produtivos de fabricação de ímãs às etapas de fabricação de insumos de ITRs nacionais.	Investimentos consolidados em função do aumento da demanda pelos requisitos legais de controle de emissões pelo aumento da frota de veículos elétricos e híbridos no mercado interno e externo e pela necessidade de produção de energia limpa.
NF – Infraestrutura física para a cadeia produtiva de ITRs	Existência de infraestrutura básica laboratorial para PD&I e para ímãs, mas não integrada diretamente às temáticas como sustentabilidade e transição energética.	Consolidar e expandir a infraestrutura de laboratórios de PD&I com foco em produção piloto e laboratorial; Integrar e expandir as infraestruturas das ICTs para temáticas voltadas à transição energética, formando um elo para ampliação de trabalhos de PD&I.	Infraestrutura laboratorial modernizada em instituições acadêmicas, ICTIs e empresas. ICTs integradas a temáticas da transição energética e sustentabilidade. Laboratórios-fábrica estruturados para produção de pequenas séries, atuando mais próximas às indústrias e empresas produtoras e consumidoras de ímãs de TRs.

Dimensão	Situação atual	Objetivos estratégicos	Situação 2040
		Implementar programas de PD&I com apoio a projetos cooperativos ICT/empresa, facilidades de pesquisa, expansão mediante patentes e suporte técnico e logístico ao desenvolvimento da cadeia produtiva de ímãs.	Cadeia produtiva estruturada atendendo o mercado nacional e internacional.
RH – Recursos humanos para o desenvolvimento tecnológico e operações da cadeia produtiva de ITRs	Existência de grupos de pesquisa e especialistas dedicados à temática em vários centros de pesquisa em diferentes regiões do Brasil.	Expandir esforços na capacitação e retenção de recursos humanos em todos os níveis para fazer frente aos novos desafios da cadeia produtiva de ímãs. Incentivar/apoiar programas de cursos de pós-graduação com objetivo de formar mestres e doutores com foco na produção e utilização de ITRs, além de pesquisadores e pós-doutores para atuação em projetos de PD&I e em empresas para a ampliação de escala produtiva.	Competência tecnológica faz frente aos desafios da cadeia produtiva de ímãs de ITRs. Nas temáticas de transição energética, os recursos humanos são voltados para PD&I de novas composições e processos com o objetivo de inovar e reduzir custos de produção, aliados aos objetivos estratégicos nacionais e gerando novas tecnologias para aplicação no setor.
TE – Tecnologias para a cadeia produtiva de ITRs	Há forte interesse de empresas nacionais e internacionais produtoras de equipamentos que demandam ITRs de terem maior domínio sobre a tecnologia de fabricação de ímãs e também de adequá-las a suas necessidades específicas. Associado à disponibilidade de TRs no Brasil e aos anúncios recentes de projetos e acordos nesta área, emerge um cenário adequado para parcerias de desenvolvimento tecnológico da cadeia como um todo. Com a concretização deste cenário, várias empresas objetivam diminuir a atual dependência.	Promover e expandir o desenvolvimento de novas tecnologias de processos e produtos com tecnologia nacional, registro de propriedade intelectual no sentido de garantir competitividade e soberania tecnológica.	Domínio tecnológico da cadeia produtiva de ímãs e empresas instaladas no Brasil produzindo e consumindo ITRs. Novos produtos especialmente desenvolvidos com tecnologia nacional, integrando processos, produtos, aplicação e de forma circular.

A fabricação de ímãs sinterizados de alto desempenho depende, na etapa imediatamente anterior, da produção de ligas metálicas portadoras de terras raras com composição e microestrutura controladas. Sem essas ligas — e sem o domínio nacional da etapa de redução metalúrgica do óxido ao metal —, a cadeia de ímãs permanece dependente de insumos importados. A viabilidade de longo prazo depende da combinação entre demanda doméstica, exportações e inserção em cadeias globais de valor. O capítulo seguinte trata desse elo intermediário, frequentemente subestimado no debate público, mas decisivo para a soberania da cadeia.

Capítulo 6

Cadeia produtiva de catalisadores à base de terras raras no Brasil

Este capítulo caracteriza a cadeia produtiva de catalisadores à base de terras raras (TR), com a indicação do estágio de competência em cada etapa, considerando os seguintes segmentos de uso industrial: (i) refino de petróleo em unidades de craqueamento catalítico fluidizado (FCC); (ii) biorrefino e coprocessamento de cargas renováveis (Bio-FCC); (iii) controle de emissões veiculares por meio de catalisadores automotivos aplicados a veículos leves, veículos pesados e motocicletas; (iv) sistemas catalíticos para geração de hidrogênio; e (v) desenvolvimento de suportes e aditivos baseados em CeO_2 , aplicáveis a múltiplos contextos, com potencial para impulsionar o surgimento e a consolidação de *startups* tecnológicas no setor. Com base nessa análise, estabelece-se a visão de futuro para a cadeia produtiva de catalisadores à base de TR no horizonte de 2040. Ao final, o respectivo Roadmap Estratégico da Cadeia Produtiva de Catalisadores, estruturado em alinhamento com os direcionadores do Roadmap Estratégico da Cadeia Integrada de Terras Raras no Brasil: 2026–2040 (Capítulo 3), é detalhado e estruturado em três horizontes temporais, contemplando objetivos e ações estratégicas, prazos e atores responsáveis para cada horizonte.

6.1 Metodologia adotada¹¹

O primeiro instrumento organiza os catalisadores à base de TR em cinco grupos funcionais (catalisadores para refino de petróleo em unidades de FCC, catalisadores para biorrefino e coprocessamento de cargas renováveis, catalisadores automotivos, sistemas catalíticos para geração de hidrogênio e suportes e aditivos baseados em CeO_2) e classifica cada tipo de catalisador segundo o ciclo de vida do produto em quatro estágios: introdução, crescimento, maturidade e declínio (Quadro 6.2). Esse posicionamento foi determinado com base em três critérios combinados:

- i. grau de adoção comercial documentado na literatura técnica e em relatórios industriais;
- ii. volume de investimento em pesquisa e desenvolvimento por segmento; e
- iii. nível de prontidão tecnológica medido pelo Technology Readiness Level (TRL) (Mankins, 2009).

A combinação desses critérios permitiu identificar, para cada tipo de catalisador, tanto a janela estratégica de atuação quanto o nível de risco tecnológico associado ao desenvolvimento de competências nacionais.

¹¹ A metodologia de levantamento patentário na base Derwent Innovations Index é a mesma descrita em detalhe no Capítulo 5 (Seção 5.3). Aqui registramos apenas as adaptações específicas para esta cadeia, quando aplicáveis.

O segundo instrumento é o mapa de competências da cadeia produtiva nacional, estruturado em cinco níveis diferenciados: pleno, parcial, emergente, incipiente e crítico. Esse gradiente foi definido com base em revisão da literatura técnica especializada e em consultas a especialistas do setor realizadas em 2026. Para cada nível, avaliaram-se quatro dimensões:

- i. domínio tecnológico efetivo;
- ii. capacidade produtiva instalada;
- iii. inserção em redes globais de pesquisa, desenvolvimento e inovação; e
- iv. acesso a insumos críticos de terras raras.

A distinção entre competência plena, como a da FCC S.A. em catalisadores para refino de petróleo em unidades de craqueamento catalítico fluidizado (FCC), e competência crítica, como a da etapa de separação e obtenção de precursores de alta pureza, é analiticamente relevante porque determina a sequência de prioridades do *roadmap* e o nível de intervenção de política pública requerido em cada elo da cadeia.

O quarto instrumento é o *roadmapping* estratégico estruturado para os períodos 2026-2030, 2031-2035 e 2036-2040, com base em instrumento de planejamento estratégico orientado a objetivos de políticas públicas de longo prazo e voltado à realização de uma visão de futuro (Kerr, 2023; Phaal et al., 2024). As ações estratégicas foram organizadas em cinco dimensões analíticas:

- i. estrutura da cadeia e integração a montante;
- ii. segmentos de aplicação e competências tecnológicas;
- iii. pesquisa, desenvolvimento, inovação e recursos humanos;
- iv. mercado, inserção internacional e política industrial; e
- v. regulação, sustentabilidade e economia circular.

Para cada ação estratégica, identificaram-se os atores principais responsáveis por sua execução, os prazos-alvo, permitindo o monitoramento contínuo da trajetória estratégica e a avaliação de resultados nas janelas de revisão previstas.

Complementarmente, foi realizado levantamento dos grupos de pesquisa nacionais associados à cadeia produtiva de catalisadores à base de TR, a partir de consulta à Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa do MCTI, ao Diretório de Grupos de Pesquisa no Brasil do CNPq e ao portal da Sociedade Brasileira de Catálise. Os 25 grupos identificados foram analisados quanto à distribuição geográfica e institucional e às linhas de pesquisa por temática, com o objetivo de caracterizar a base científica disponível e identificar assimetrias estruturais relevantes para a construção do Mapa do Caminho Estratégico desta cadeia.

6.2 Importância estratégica da aplicação para o País

Catalisadores heterogêneos são sólidos que aceleram a velocidade de reações químicas, tornando processos industriais viáveis do ponto de vista técnico, podendo colaborar para sua viabilidade econômica

e ambiental (IUPAC, 2014). Eles são considerados insumos estratégicos, pois viabilizam a produção de combustíveis, insumos químicos e materiais de alto valor agregado em cadeias que respondem por parcela relevante do PIB industrial, das exportações e da segurança energética do País. No processo de craqueamento catalítico fluidizado (FCC), por exemplo, os produtos gerados podem valer até 75 vezes o valor do próprio catalisador, o que evidencia sua centralidade na criação de valor ao longo da cadeia produtiva do petróleo.

Os catalisadores possuem relevância econômica e industrial significativa em setores estratégicos para a economia brasileira. Além disso, os catalisadores à base de terras raras atendem simultaneamente mercados tradicionais de refino e petroquímica e mercados emergentes associados à transição energética.

O mercado global de materiais catalíticos à base de TR foi estimado em US\$ 6,6 bilhões em 2024 e deve alcançar US\$ 13,3 bilhões até 2035, crescendo a uma taxa composta (CAGR) de 6,58% ao ano (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 Projeções do mercado global e brasileiro para catalisadores à base de TR: 2033-2035

Segmento de mercado	Valor 2024 (US\$)	Projeção 2033–2035 (US\$)	CAGR (%)	Fontes
Materiais catalíticos à base de TR (global)	US\$ 6,6 bilhões	US\$ 13,3 bilhões (2035)	6,58%	Spherical Insights & Consulting (2025)
Catalisadores para FCC (global)	US\$ 3,47 bilhões	US\$ 6,31 bilhões (2033)	6,81%	Global Growth Insights (2025)
Mercado de catalisadores automotivos (global)	US\$ 120,39 bilhões (2026)	US\$ 177,87 bilhões (2031)	8,12%	Mordor Intelligence, (2026).
Mercado de cério – global (na forma de CeO ₂)	US\$ 692 milhões	US\$ 886 milhões (2030)	4,20%	Market.us (2025)
Catalisadores FCC – Brasil (estimado)	US\$ 140–180 milhões	US\$ 220–280 milhões	~4,00%	Especialistas consultados em 2026.

A Tabela 6.1 evidencia um crescimento consistente do mercado global de catalisadores à base de terras raras (TR) utilizados em unidades de craqueamento catalítico fluido (FCC) de petróleo, tecnologia central nos processos de conversão em refinarias. Nesse contexto, observa-se também a ampliação da demanda por elementos de terras raras (ETR), em especial lantânio (La) e cério (Ce) na formulação de catalisadores de alto desempenho, capazes de aumentar a eficiência do processo, a estabilidade operacional e o rendimento em produtos de maior valor agregado.

As projeções para o mercado global de cério e para o segmento de catalisadores para FCC no Brasil indicam uma trajetória de crescimento alinhada a essas tendências internacionais, o que reforça a relevância estratégica da integração entre a produção de TR e a indústria de catalisadores, particularmente em países que buscam ampliar a agregação de valor aos seus recursos minerais e fortalecer cadeias produtivas

associadas à transição energética e à modernização da indústria de refino (Spherical Insights & Consulting, 2025; Global Growth Insights, 2025; Mordor Intelligence, 2026; Market.us, 2025).

No contexto brasileiro, a importância estratégica da cadeia produtiva de catalisadores à base de TR pode ser compreendida a partir de pelo menos quatro dimensões principais no horizonte até 2040.

Segurança energética e transição para combustíveis de baixo carbono

O País dispõe de um parque de refino relevante na América Latina, com unidades de FCC que vêm incorporando matérias-primas renováveis e óleos com conteúdo de biomassa, a partir de tecnologias desenvolvidas e adaptadas em centros de PD&I nacionais (Petrobras, 2023; 2025). O uso de catalisadores contendo TR é determinante para assegurar alta conversão, estabilidade e seletividade nessas operações: lantânio e cério estabilizam a estrutura da zeólita Y sob condições hidrotérmicas severas, preservando os sítios ácidos responsáveis pela atividade catalítica e pela seletividade aos produtos desejados (Sousa-Aguiar et al., 2013). Essa função é ainda mais crítica ao processar cargas com diferentes perfis de composição — como misturas de frações fósseis e bio-óleos —, contribuindo para ampliar a oferta de combustíveis com menor pegada de carbono, incluindo produtos certificados como de conteúdo renovável (Petrobras, 2023; 2025).

Competitividade industrial, agregação de valor e neindustrialização verde

A existência de capacidades instaladas para produção e desenvolvimento de catalisadores de FCC, consolidada pela atuação da FCC S.A. — *joint venture* entre a Petrobras e a Ketjen, subsidiária da Albemarle Corporation —, posiciona o Brasil como polo relevante desse segmento na América do Sul (FCC S.A., 2026). Nessa perspectiva, a incorporação de TR de origem nacional à cadeia produtiva de catalisadores, combinada a estratégias de recuperação de lantânio e cério a partir de catalisadores exauridos, abre oportunidades concretas para ampliar a agregação de valor às reservas minerais brasileiras. Estudos laboratoriais já demonstram rendimentos superiores a 90% para a recuperação de lantânio em etapas de lixiviação ácida (Wenzel et al., 2016; Zhao et al., 2016), indicando viabilidade técnica para esse vetor de economia circular. Essas perspectivas ganham particular relevância diante da expressiva base de recursos minerais do país e se mostram coerentes com a agenda de reindustrialização baseada em inovação e sustentabilidade expressa na Nova Indústria Brasil (NIB), lançada em janeiro de 2024 pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (Brasil/MDIC, 2024; PL 2780/2024). A descarbonização, a transição energética e os minerais críticos — entre eles as TR — figuram como missões prioritárias da NIB para o desenvolvimento produtivo nacional até 2033.

Cumprimento de compromissos ambientais e melhoria da qualidade do ar

Catalisadores automotivos são essenciais para o cumprimento de metas de qualidade do ar em centros urbanos, convertendo CO, NOx e compostos orgânicos voláteis (COVs) em CO₂, N₂ e H₂O nos sistemas de escape de veículos leves e pesados (Farrauto e Deeba, 2020; Kumar et al., 2020). A tendência global de endurecimento regulatório materializa-se no Regulamento Euro 7, que unificou pela primeira vez as exigências para veículos leves e pesados em um único ato legislativo. O regulamento introduz limites mais restritivos de NOx e CO para caminhões e ônibus e amplia os requisitos de durabilidade e de testes em

condições reais de condução (União Europeia, 2024; ICCT, 2024). A degradação dos catalisadores em frotas urbanas de alta quilometragem concentra desproporcionalmente as emissões de poluentes, evidência que reforça a importância da manutenção periódica e da substituição tempestiva dos sistemas catalíticos. A título de ilustração, um programa de substituição massiva de catalisadores e sondas lambda em frotas de táxi de Hong Kong reduziu as emissões totais de CO e NOx em equivalente a 5–8% das emissões de todo o setor de transporte rodoviário do território (Yao et al., 2022). Resultados dessa magnitude indicam que políticas de renovação de frotas e controle do ciclo de vida dos catalisadores automotivos constituem instrumentos de gestão ambiental urbana de alta eficácia. Para o Brasil, sinalizam a oportunidade de articular, de forma integrada, políticas de qualidade do ar, inovação industrial e aproveitamento das reservas nacionais de TR na cadeia de catalisadores automotivos.

Inserção do Brasil na economia do hidrogênio e em processos químicos de baixo carbono

O Brasil reúne um conjunto de vantagens comparativas que o posicionam de forma singular no mercado emergente de hidrogênio de baixo carbono, particularmente em rotas que demandam catalisadores à base de TR. Esse posicionamento assenta-se em três pilares convergentes:

- I. produção consolidada de etanol de cana-de-açúcar, que confere ao País infraestrutura única para rotas de H₂ via reforma de etanol, tecnologia com menor intensidade de carbono do que a reforma de metano convencional (SMR) e já contemplada no Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂) como via prioritária (EPE/MME, 2021; Brasil, 2024);
- II. potencial de produção de H₂ de baixo carbono estimado em até 18,9 milhões de toneladas anuais em cenário de máximo aproveitamento das fontes renováveis, com concentração expressiva na região Nordeste (EPE, 2024); e
- III. parque industrial de refino e petroquímica com experiência consolidada em processos catalíticos de alta temperatura, incluindo reforma de metano e biogás, que constitui base tecnológica adaptável às rotas de baixo carbono (Siqueira et al., 2023; Kolb, 2008).

A esses pilares soma-se a massa crítica de pesquisa em catálise com TR acumulada por grupos brasileiros, que amplia as condições para o desenvolvimento de rotas próprias baseadas em recursos domésticos. A combinação desses ativos — disponibilidade de biomassa, capacidade instalada industrial e competência científica em catálise — cria condições para posicionar o Brasil como fornecedor de soluções tecnológicas e de catalisadores no mercado global de H₂ de baixo carbono. A demanda por esse vetor energético tem indicativos de crescimento acentuado até 2040, especialmente em setores de difícil eletrificação como siderurgia, fertilizantes e transporte de longa distância (IEA, 2025b; CGEP, 2024).

Articuladas essas quatro dimensões, a cadeia produtiva de catalisadores à base de TR deve ser tratada como eixo estratégico transversal, integrando políticas públicas com a abordagem "da mina ao catalisador" e "do catalisador ao uso final". Sua importância para o País não se limita ao suprimento de insumos industriais, alcançando etapas de maior valor agregado, como o refino de petróleo e a funcionalização, a exemplo da transformação de Ce em CeO₂ de alta área superficial.

Essa cadeia envolve, de forma crescente, a capacidade nacional de reduzir vulnerabilidades externas, capturar oportunidades da transição energética e ambiental em curso e consolidar posição de liderança

multilateral em segmentos associados a combustíveis, transporte, hidrogênio e química de baixo carbono no horizonte para o qual o presente capítulo propõe o Mapa do Caminho Estratégico para a cadeia produtiva de catalisadores à base de TR.

6.3 Principais usos industriais: Ciclo de vida dos catalisadores à base de TR

O Quadro 6.1 sintetiza os usos industriais atuais de catalisadores à base de TR, indicando a funcionalidade habilitadora e os elementos TR requeridos em cada aplicação.

Quadro 6.1 Terras raras em catalisadores: tipos, usos industriais, funcionalidades e elementos TR

Tipo de catalisador		Uso industrial	Funcionalidade habilitadora	Elementos TR
Catalisadores para refino de petróleo em unidades de craqueamento catalítico fluidizado (FCC)	Catalisador zeolítico (REY/REUSY)	Craqueamento de frações pesadas (gasóleo, resíduo atmosférico).	Estabilização da estrutura cristalina da zeólita Y na temperatura de regeneração (650–750 °C).	La, Ce
	Promotor de combustão de CO	Controle de emissões de CO no regenerador	Promoção da combustão completa de CO a CO ₂ no leito fluidizado do regenerador.	Ce
	Aditivo de <i>mischmetal</i>	Aumento de atividade e seletividade de craqueamento.	Atividade catalítica combinada via liga de TR mistas incorporada ao catalisador zeolítico.	La, Ce, Pr, Nd
Catalisadores para biorrefino e coprocessamento de cargas renováveis (Bio-FCC)	Catalisador FCC modificado (Bio-FCC)	Coprocessamento de óleos vegetais, gorduras residuais e bio-óleos com cargas fósseis em unidades de FCC.	Estabilização da zeólita REUSY em presença de cargas oxigenadas; redução de desativação por metais (Ni, V) de bio-óleos Controle de basicidade superficial.	La, Ce, Pr
	Catalisador de hidrodesoxigenação (HVO/HEFA)	Produção de diesel renovável por hidrodesoxigenação de triglicerídeos e ácidos graxos.	Promoção da atividade de hidrodesoxigenação e descarbonilação. Estabilização do suporte Al ₂ O ₃ em presença de água.	Ce, La
	Catalisador de reforma de bio-óleos	Reforma a vapor de frações oxigenadas de bio-óleos para produção de H ₂ renovável.	Supressão de coque via OSC do CeO ₂ ; estabilização de Ni em temperatura de reforma (600–800 °C).	Ce, La, Pr
Catalisadores automotivos	Catalisador de oxidação/redução (TWC)	Catalisador de oxidação/redução (TWC).	Catalisador de oxidação/redução (TWC).	Ce, Pr
	Washcoat (revestimento catalítico)	Washcoat (revestimento catalítico).	Washcoat (revestimento catalítico).	La, Y
	Suporte Ce-Zr-Y de alta estabilidade	Suporte Ce-Zr-Y de alta estabilidade.	Suporte Ce-Zr-Y de alta estabilidade.	Ce, Y (+ Zr*)

Tipo de catalisador		Uso industrial	Funcionalidade habilitadora	Elementos TR
Sistemas catalíticos para geração de hidrogênio	Catalisador de reforma a vapor de metano/etanol (SMR/ESR)	Produção centralizada de H ₂ para a indústria química, fertilizantes e mobilidade	Supressão de coque via OSC do suporte CeO ₂ -La ₂ O ₃ ; estabilização de Ni e Rh em alta temperatura; promoção da <i>reação water-gas shift</i> (WGSR).	Ce, La, Pr
	Catalisador de water-gas shift (WGS — alta e baixa temperatura)	Purificação e enriquecimento de H ₂ em cadeias de reforma e produção de amônia.	Ciclos redox Ce ⁴⁺ /Ce ³⁺ habilitam a oxidação de CO por vacâncias de oxigênio na superfície do CeO ₂ (mecanismo Mars-van Krevelen).	Ce
	Catalisador de reforma a seco (DRM) e oxidação parcial (POX)	Produção de gás de síntese (H ₂ /CO) a partir de CH ₄ e CO ₂ — aproveitamento de gás associado e biogás.	Tolerância a coque e sinterização via suporte Ce-Zr ou La ₂ O ₃ . Basicidade do La aumenta adsorção e ativação de CO ₂ .	Ce, La
	Catalisador de eletrólise a alta temperatura (SOEC)	Produção de H ₂ verde por eletrólise de vapor em células de óxido sólido reversíveis.	CeO ₂ como eletrólito ou camada de barreira funcional; condutividade iônica de O ²⁻ em temperatura de operação (700–900 °C).	Ce, Gd, Sm
Suportes e aditivos baseados em CeO₂ (aplicáveis a múltiplos contextos)	Suporte catalítico multifuncional (CeO ₂ puro e Ce-ZrO ₂)	Suporte universal para catalisadores de metais nobres (Pt, Pd, Rh, Au) em oxidação, reforma e tratamento de efluentes.	Estrutura fluorita com alta mobilidade de vacâncias de O ₂ . Efeito SMSI (<i>strong metal-support interaction</i>) estabiliza nanopartículas metálicas e impede sinterização.	Ce (+ Zr*, Y*)
	Aditivo redutor de SO _x /NO _x (DESOX/DENOX)	Controle de emissões de SO _x e NO _x em regeneradores FCC, caldeiras e fornos industriais.	Armazenamento de SO ₂ por formação de sulfatos de Ce ³⁺ . Regeneração <i>in situ</i> por redução em atmosfera redutora no <i>riser</i> . Basicidade da La ₂ O ₃ favorece adsorção de gases ácidos.	Ce, La
	Suporte dopado para fotocatalise e catálise ambiental	Tratamento de efluentes líquidos e gasosos; degradação de micropoluentes orgânicos.	Dopagem do CeO ₂ com TR trivalentes reduz energia de formação de vacâncias, amplia absorção no visível e melhora atividade fotocatalítica redox.	Ce, La, Pr, Nd, Sm
	Suporte para catálise de oxidação avançada (Fenton heterogêneo)	Oxidação de poluentes recalcitrantes em efluentes industriais.	Redox Ce ⁴⁺ /Ce ³⁺ gera radicais OH a partir de H ₂ O ₂ sem lixiviação metálica. Alta área superficial do suporte nanoestruturado.	Ce

Fontes: Johnson Matthey (2025); Ganduglia-Pirovano et al. (2007); Cerqueira et al. (2008); Montini et al. (2016); IEA (2021).

As terras raras (TR) são componentes insubstituíveis nas principais linhas de produção de catalisadores industriais. Nos catalisadores para FCC, por exemplo, são incorporadas ao componente zeolítico, núcleo ativo deste complexo sistema multifuncional, com o objetivo de aumentar sua estabilidade térmica e

atividade catalítica, viabilizando o processamento de cargas cada vez mais pesadas de hidrocarbonetos. Décadas de pesquisa dedicadas à substituição das TR neste segmento não lograram êxito, o que confirma que nenhum substituto técnico e economicamente competitivo foi identificado até o presente para essa função na geração de combustíveis.

Nos catalisadores automotivos de três vias, responsáveis pela oxidação de hidrocarbonetos não reagidos e de monóxido de carbono, bem como pela redução de óxidos de nitrogênio a N_2 , o óxido de cério (CeO_2) constitui um componente central, para o qual não há ainda substituto viável. Sua elevada capacidade de armazenamento de oxigênio e seu comportamento redox conferem ao conversor catalítico a eficiência necessária para atender às crescentes exigências das normas de redução de emissões, como Euro 7 na Europa, China VI e Proconve no Brasil (ICCT, 2024; 2018; 2019).

Para além dessas aplicações consagradas, as TR assumem papel crescente em novos segmentos catalíticos associados à transição energética: (i) o biorrefino (Bio-FCC), (ii) a reforma de etanol e metano para produção de hidrogênio verde; e (iii) os sistemas de células a combustível de óxido sólido (SOFC). Em todos esses contextos, a céria (CeO_2) e seus óxidos mistos figuram como componentes de desempenho superior, sem alternativas competitivas no horizonte tecnológico de 2040. A importância estratégica dos catalisadores à base de TR para o Brasil transcende, portanto, os segmentos tradicionais, posicionando o País diante de uma oportunidade industrial de alcance histórico. Em 2023, a FCC S.A. realizou, em parceria com a Petrobras, o primeiro processamento mundial de 100% de carga renovável (óleo de soja) em uma unidade FCC convencional, utilizando catalisadores da linha proprietária ReNewFCC (que naturalmente contém La e Ce).

O Quadro 6.2 apresenta o posicionamento de cada tipo de catalisador em relação ao estágio no ciclo de vida e reflete as tendências de mercado observadas em 2025, incorporando os novos segmentos emergentes associados à cadeia produtiva de catalisadores à base de TR.

Quadro 6.2 Estágio do ciclo de vida dos catalisadores baseados em terras raras: nível mundial – 2024/2025

Tipo de catalisador	Estágio do ciclo de vida (nível mundial)			
	Embrionário	Crescimento	Maturidade	Declínio
Catalisadores para refino de petróleo em unidades de craqueamento catalítico fluidizado (FCC)				
Catalisador zeolítico REY / REUSY (La, Ce)				
Promotor de combustão de CO (Ce)				
Aditivo de liga de TR leves (La, Ce, Pr, Nd)				
Catalisadores para biorrefino e coprocessamento de cargas renováveis (Bio-FCC)				
Catalisador FCC modificado para Bio-FCC (La, Ce, Pr)				
Catalisador de hidrodesoxigenação HVO/HEFA (Ce, La)				
Catalisador de reforma de bio-óleos (Ce, La, Pr)				
Catalisadores automotivos				
Catalisador TWC (Pt, Pd, Rh / $CeO_2-Al_2O_3$)				

Tipo de catalisador	Estágio do ciclo de vida (nível mundial)			
	Embrionário	Crescimento	Maturidade	Declínio
Revestimento catalítico / washcoat (La, Y / Al ₂ O ₃)				
Suporte Ce-Zr-Y de alta estabilidade				
Sistemas catalíticos para geração de hidrogênio				
Catalisador SMR / ESR para H ₂ renovável (Ce, La, Pr)				
Catalisador WGS alta e baixa temperatura (Ce)				
Catalisador DRM / POX — gás de síntese (Ce, La)				
Catalisador SOEC eletrólise a alta temperatura (Ce, Gd, Sm)				
Suportes e aditivos baseados em CeO₂ (aplicáveis a múltiplos contextos)				
Suporte multifuncional Ce-ZrO ₂ (metais nobres)				
Aditivo DESOX / DENOX para FCC e caldeiras (Ce, La)				
Suporte dopado para fotocatalise (Ce, La, Pr, Nd, Sm)				
Suporte Fenton heterogêneo (CeO ₂ nanoestruturado)				

Nota: O estágio do ciclo de vida (nível mundial) foi determinado com base em três critérios combinados: (i) grau de adoção comercial documentado na literatura técnica e em relatórios industriais; (ii) volume de investimento em pesquisa e desenvolvimento por segmento; e (iii) nível de prontidão tecnológica medido pelo Technology Readiness Level (TRL) (Mankins, 2009).

6.3.1 Catalisadores para refino de petróleo em unidades de FCC: Maturidade com renovação tecnológica

O processo de craqueamento catalítico fluidizado (FCC) permanece como um dos pilares do refino global, com mais de 650 unidades em operação em todo o mundo em 2024, processando cerca de 18 milhões de barris por dia. A zeólita Y contendo terras raras, especialmente lantânio (La) e cério (Ce), segue sendo o componente ativo dominante, respondendo por mais de 60% do material ativo utilizado.

Em ensaios realizados pelo Japan Petroleum Institute em 2024, catalisadores zeolíticos com terras raras registraram aumento de 4,2% no rendimento de gasolina, além de operar de forma estável acima de 750°C.

A Fábrica Carioca de Catalisadores S.A. (FCC S.A.), *joint venture* entre a Petrobras e a Ketjen (subsidiária da Albemarle Corporation), completou 40 anos de seu acordo de cooperação tecnológica em dezembro de 2024. Líder absoluta no mercado de catalisadores FCC do hemisfério sul, a empresa expandiu seu portfólio nos últimos anos para incluir: catalisadores para processamento de resíduos pesados de hidrocarbonetos; aditivos de redução de enxofre na gasolina; a linha ReNewFCC, para processamento de cargas 100% renováveis; e o Cyclus, catalisador pioneiro para reciclagem química de plásticos.

Do ponto de vista tecnológico, o período 2026–2040 será marcado por três transições fundamentais na catálise de FCC. A primeira é o aumento progressivo do co-processamento de bio-óleos (bio-FCC), alinhado à política brasileira de biocombustíveis. Estudos recentes demonstram que a introdução de até 10–20% em massa de *feedstocks* biogênicos (óleos de pirólise, óleos vegetais, gorduras e sebos) em unidades FCC existentes é tecnicamente viável sem impacto significativo no rendimento de coque ou gasolina, aproveitando a infraestrutura instalada de refino, sem a necessidade de investimentos de capital adicionais relevantes (Clough Mastry et al., 2023; IEA Bioenergy Task 39, 2024).

A segunda transição é o desenvolvimento de catalisadores para produção de olefinas leves — propileno e buteno — como insumos estratégicos da petroquímica: as unidades FCC já respondem por 20 a 30% de toda a produção mundial de propileno, com o mercado específico de catalisadores FCC voltados a essa finalidade crescendo de aproximadamente 10.000 toneladas por ano em 2005 para cerca de 90.000 toneladas anuais em 2014 (Vogt e Weckhuysen, 2015); a adição de zeólita ZSM-5 em teores de 10% à carga catalítica pode elevar o rendimento de propileno em mais de 9% em massa, e tecnologias avançadas como o processo *Deep Catalytic Cracking* (DCC), desenvolvido pelo Sinopec RIPP e com 18 unidades comerciais licenciadas na China e no exterior, atingem rendimentos de propileno de até 24,8% em massa (Aitani et al., 2015; Akah e AL-Ghrami, 2021; Sinopec Ripp, 2022). A terceira transição é a integração de inteligência artificial e experimentos de alto rendimento no design de catalisadores: a combinação de aprendizado de máquina com plataformas experimentais automatizadas — os chamados *self-driving labs* — está transformando o ciclo de descoberta de catalisadores, antes baseado em tentativa e erro iterativo, em processos guiados por dados com redução substancial de tempo e custo de desenvolvimento (Xu et al., 2023; Pereira et al., 2024; Zhong et al., 2024).

No contexto da transição energética, cabe destacar que a demanda por catalisadores para FCC não se extingue com a eletrificação dos veículos, pois a necessidade de combustíveis para aviação sustentável (SAF), diesel de baixo carbono e petroquímica de base renovável garante relevância crescente ao processo até pelo menos 2040. A título de ilustração, a Shell Catalysts & Technologies, em parceria com a empresa australiana Licella, anunciou em novembro de 2024 uma solução integrada de baixo carbono para conversão de biomassa em SAF, combinando a tecnologia Cat-HTR™ de liquefação hidrotérmica catalítica (HTL) da Licella com a *expertise* de hidroprocessamento da Shell para refino do biocru em combustível sustentável de aviação (Shell Catalysts & Technologies, 2024).

6.3.2 Catalisadores para biorrefino e coprocessamento de cargas renováveis (Bio-FCC)

A convergência entre a política de biocombustíveis do Brasil e as demandas da transição energética global posiciona o País como ator importante no desenvolvimento de catalisadores à base de TR para o biorrefino. O pioneirismo da FCC S.A. no processamento de 100% de carga renovável em unidade FCC industrial abre uma nova geração de aplicações, até então classificadas como em fase de introdução:

- Bio-FCC: processamento de óleos vegetais, gorduras residuais e bio-óleos de segunda geração em unidades FCC adaptadas;
- Pirólise catalítica: conversão de biomassa lignocelulósica em olefinas e combustíveis por catalisadores de zeólita modificados;

- *Upgrade* de resíduos: valorização de ácidos graxos e resíduos industriais em hidrocarbonetos com menor pegada de carbono;
- Hidrogênio renovável: utilização de CeO_2 e perovskitas em reações de reforma de etanol, gás natural e CO_2 para produção de hidrogênio verde.

A integração da FCC S.A. com o Parque Tecnológico de Santa Cruz — onde está instalada a Planta Multipropósito de Catalisadores (ProCat) em parceria com a UFRJ e o CENPES da Petrobras — representa a infraestrutura de escala piloto e semipiloto mais avançada da América do Sul nesse domínio. Esta plataforma deve ser o epicentro do desenvolvimento de catalisadores da próxima geração para o biorrefino no horizonte 2030–2040.

6.3.3 Catalisadores automotivos: Transição energética e novas exigências regulatórias

O mercado de catalisadores automotivos enfrenta uma dinâmica dual no horizonte 2025–2040: (i) de um lado, a expansão da eletrificação reduz gradativamente a frota de veículos de combustão pura; e (ii) de outro, os veículos híbridos e as crescentes exigências de normas para a redução de emissões (Euro 7 na Europa, China VI e Proconve no Brasil) demandam conversores catalíticos de três vias mais eficientes e duráveis. Os elementos Ce, La e Nd seguem como componentes fundamentais desses sistemas.

O mercado global de óxido de cério foi avaliado em US\$ 692 milhões em 2024, com projeção de atingir US\$ 886 milhões até 2030 (CAGR de aproximadamente 4,2%) (Market.us, 2025). Em novembro de 2025, os preços do óxido de cério no polo comercial de Baotou (China) registraram alta notável em função da demanda de fabricantes de catalisadores automotivos. A demanda global por materiais catalíticos automotivos à base de TR deve crescer de forma sustentada especialmente nos mercados emergentes, onde a massificação do transporte individual convive com normas ambientais progressivamente mais rigorosas.

No Brasil, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) avança em direção ao Proconve L8 para veículos leves e P9 para pesados, alinhando o País às melhores práticas internacionais. A frota híbrida e *flex-fuel* brasileira, singular no mundo pela elevada penetração de etanol, cria demandas específicas de adaptação dos catalisadores, representando um nicho tecnológico com potencial exportador relevante.

As empresas Umicore e BASF (que incorporou a Engelhard) mantêm produção local, mas o conhecimento de fabricação dos monolitos segue concentrado no exterior. Cabe destacar que o Instituto Nacional de Tecnologia (INT) vem desenvolvendo competências relevantes neste contexto, com potencial de contribuição para reduzir essa lacuna tecnológica. A oportunidade estratégica reside no desenvolvimento nacional de formulações específicas para o combustível brasileiro.

6.3.4 Sistemas catalíticos para geração de hidrogênio e materiais catalíticos à base de CeO_2

A geração de hidrogênio por reforma de etanol e metano, empregando catalisadores contendo terras raras, especialmente CeO_2 e seus óxidos mistos, ocupa posição estratégica crescente no horizonte 2026 – 2040. O Brasil, segundo produtor mundial de etanol, dispõe de vantagem comparativa singular para

estruturar uma cadeia de hidrogênio de baixo carbono apoiada no desenvolvimento de catalisadores nacionais à base de TR.

As aplicações de TR na formulação de catalisadores ao longo da cadeia do hidrogênio são transversais e estratégicas, compreendendo etapas críticas de produção, condicionamento e conversão energética, com destaque para:

Reforma de etanol e metano a vapor (*steam reforming*): catalisadores Pt/CeO₂ e Ni/La₂O₃;

Reação de deslocamento de gás d'água (*water-gas shift*): catalisadores Au/CeO₂ e Pt/CeO₂;

Oxidação preferencial de CO (PROX): para purificação de H₂ para células PEM;

Células de combustível de óxido sólido (SOFC): CeO₂ e gadolínio-ceria (GDC) como eletrólito;

Dissociação termoquímica de CO₂ e H₂O com ceria não-estequiométrica via ciclos redox solar.

A estratégia nacional de hidrogênio de baixo carbono estrutura-se sobre dois instrumentos legislativos complementares: a Lei nº 14.948/2024, que estabelece o Marco Regulatório do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono e institui o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂), e a Lei nº 14.990/2024, que cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), prevendo a mobilização de R\$ 18,3 bilhões em créditos fiscais entre 2028 e 2032 para produtores e consumidores habilitados.

Nesse contexto, os catalisadores à base de CeO₂ e La₂O₃ são insumos diretos nos eletrolisadores e células a combustível desses polos, o que reforça a relevância estratégica da cadeia de catalisadores à base de TR para a competitividade do hidrogênio de baixo carbono brasileiro.

6.4 Cadeia produtiva de catalisadores à base de TR e análise de patentes

A cadeia produtiva de catalisadores à base de terras raras configura um sistema integrado que vai da prospecção e lavra de jazidas de TR ao uso final em unidades industriais e veículos, passando por beneficiamento mineral, separação e purificação, preparação de suportes e precursores catalíticos, formulação e produção de catalisadores, uso em refinarias, veículos e processos industriais, gestão de resíduos e recuperação progressiva de TR de catalisadores gastos, conforme representado esquematicamente na Figura 6.1.



Figura 6.1: Cadeia produtiva de catalisadores à base de TR

Essa cadeia é intensiva em conhecimento, capital e regulação e sua governança envolve um conjunto diversificado de atores: empresas mineradoras, indústrias químicas, fabricantes de catalisadores, refinarias de petróleo, montadoras, operadores logísticos, instituições científicas e tecnológicas e órgãos reguladores.

Estrutura-se em nove etapas interdependentes. As duas primeiras compreendem a mineração e o beneficiamento dos minérios hospedeiros, etapas fortemente concentradas na China. As duas etapas seguintes envolvem a separação e o refino dos elementos individuais por extração líquido-líquido ou troca iônica, processos intensivos em reagentes químicos e geração de rejeitos radioativos, que representam a principal barreira técnica à diversificação geográfica da cadeia (Ganduglia-Pirovano; Hofmann; Sauer, 2007).

A quinta etapa é a preparação de suportes e precursores catalíticos, que são óxidos mistos Ce-Zr-Y, soluções sólidas La-Al₂O₃, zeólitas REY e REUSY dopadas com La e Ce, etapa dominada por fornecedores especializados como BASF, Ketjen e Solvay (Cerqueira et al., 2008).

A sexta etapa corresponde à formulação e fabricação dos catalisadores acabados, com *washcoats* e monólitos para aplicações automotivas e partículas microesféricas para FCC, em que Johnson Matthey, BASF e Grace detêm posições de liderança (Johnson Matthey, 2025).

As duas últimas etapas referem-se à coleta de catalisadores gastos e a recuperação e reciclagem dos elementos TR a partir desses catalisadores, segmento ainda em desenvolvimento em escala industrial plena, mas estratégico diante das projeções de duplicação da demanda por TR para aplicações de energia limpa até 2040 (IEA, 2024).

A recuperação de La e Ce a partir de catalisadores FCC exauridos tem histórico comercial mais desenvolvido do que a de fósforos ou ímãs, justamente pelo volume gerado nas refinarias e pela concentração dos fluxos. Empresas como Albemarle e Grace já operam rotas de regeneração e recuperação parcial de TR de catalisadores gastos em escala comercial.

A partir dessa caracterização, apresentam-se as tendências tecnológicas, avanços e desafios associados ao desenvolvimento de catalisadores em foco com base em levantamento patentário conduzido na base

Derwent Innovations Index, abrangendo o período de 2015 a 2025 e fundamentado na estratégia de busca detalhada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Estratégia de busca adotada no levantamento de patentes referentes a catalisadores à base de terras raras: 2015-2025

Item	Estratégia de busca	Nº de patentes
#1	TS= ("rare earth*" OR "rare-earth*" OR lanthan* OR cerium OR lanthanum OR neodymium OR praseodymium OR gadolinium OR samarium)	211.296
#2	TS=(catalyst* OR catalytic* OR "spent catalyst*" OR "catalyst regenerat*" OR "FCC" OR "automotive")	634.049
#3	IP=(B01J-023* OR B01J-035* OR B01J-037* OR B01J-038* OR C22B-003* OR C22B-007* OR C22B-059* OR B09B-003*)	216.302
#4	#1 AND #2	39.581
#5	#3 AND #4	20.021

Fonte: Busca direta na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 20 mar. 2026.

Os códigos da Classificação Internacional de Patentes (CIP) indicados no item #3 combinam deliberadamente três camadas da cadeia:

- B01J-023*, 035*, 037*, 038* — cobrem toda a vida útil do catalisador: composição → propriedades físicas → preparação → regeneração;
- C22B-003*, 007*, 059* — cobrem a recuperação de TR em diferentes fontes: minérios e concentrados (003), resíduos e sucata industrial (007) e especificamente metais de terras raras (059);
- B09B-003* — captura o fluxo de resíduos sólidos industriais, incluindo catalisadores exauridos destinados a tratamento, disposição ou valorização material.

A análise por código da CIP revelou que a inovação em catalisadores à base de TR se organiza em torno de quatro eixos interdependentes: (i) composição — centrada nas TR e em sistemas multimetálicos complexos; (ii) processamento — com forte ênfase em métodos de síntese, impregnação e ativação térmica; (iii) controle de emissões e processos limpos — com foco em controle catalítico de emissões veiculares e industriais; e (iv) recuperação e valorização de catalisadores: voltadas à extração de TR a partir de catalisadores exauridos, com destaque para processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos, regeneração catalítica e tratamento de resíduos sólidos industriais. A Tabela 6.3 apresenta a distribuição dos principais códigos CIP (critério “top 10”) por eixo temático da inovação em catalisadores à base de terras raras (2015–2025).

Tabela 6.3: Distribuição dos principais códigos CIP por eixo temático da inovação em catalisadores à base de terras raras (2015–2025)

Eixo	Código CIP	Descrição	Nº de patentes
Eixo I: Composição – TR e sistemas multimetálicos complexos	B01J-023/83	Catalisadores de cério (Ce) — CeO ₂ como componente ativo ou promotor redox	3.887
	B01J-023/89	Catalisadores contendo metais de terras raras — classe específica de lantanídeos	2.311
	B01J-023/889	Sistemas multimetálicos com TR e metais de transição (Ce-Mn, La-Co, Ce-Zr-Y)	1.944
	B01J-023/34	Catalisadores de manganês (Mn) — sistemas bimetálicos Ce-Mn para oxidação catalítica	1.607
	B01J-023/755	Sistemas Ce-Zr — óxidos mistos de cério e zircônio com TR promotoras	1.063
	B01J-021/06	Catalisadores suportados em alumina (Al ₂ O ₃) — suporte universal em TWC e FCC com La	1.047
	B01J-032/00	Catalisadores bifuncionais — zeólitas RE-Y e sistemas Ce/ácido de Lewis combinados	997
	B01J-023/80	Lantânio (La) e demais lantanídeos — catalisadores de óxido de La e La ₂ O ₃	584
	B01J-023/887	Sistemas lantanídeo + metal de transição — Ce-Co, La-Ni, Ce-Fe e correlatos	582
	B01J-023/888	Catalisadores com dois ou mais lantanídeos — La-Ce, La-Ce-Pr, Ce-Nd e misturas	474
Eixo II: Processamento – Síntese, impregnação e ativação de catalisadores	B01J-037/08	Métodos de preparação — ativação, sulfetação e tratamentos pós-síntese	4.439
	B01J-037/02	Impregnação — deposição de fase ativa metálica em suportes	4.230
	B01J-035/10	Controle de área superficial específica (m ² /g) — textura e mesoporosidade	2.848
	B01J-037/03	Coprecipitação — síntese simultânea de suporte e fase ativa	2.060
	B01J-035/00	Forma física do catalisador — pellets, extrusados, monolitos (geral)	1.801
	B01J-037/00	Métodos de preparação de catalisadores — classe geral	1.643
	B01J-035/02	Catalisadores particulados — microesferas, grânulos e pós	1.467
	B01J-037/10	Métodos de ativação — redução, oxidação e condicionamento térmico	1.117
	B01J-035/61	Morfologia controlada de partículas — tamanho e distribuição granulométrica	1.110
	B01J-037/34	Síntese hidrotérmica — cristalização em meio aquoso pressurizado	861
Eixo III — Controle de emissões e processos limpos	B01D-053/86	Conversão catalítica de gases de escape — catalisadores automotivos (TWC, DOC)	3.774
	B01D-053/56	Remoção catalítica de NO _x de gases de combustão industrial	2.342

Eixo	Código CIP	Descrição	Nº de patentes
	B01D-053/94	Purificação catalítica de gases poluentes — emissões industriais (geral)	1.899
	B01D-053/72	Remoção catalítica de N ₂ O — óxido nitroso em gases industriais	968
	C02F-101/30	Tratamento catalítico de compostos nitrogenados em efluentes líquidos	853
	C02F-001/72	Fotocatálise — degradação de poluentes em efluentes com CeO ₂ e TR dopadas	847
	F01N-003/10	Catalisadores de três vias (TWC) — controle de CO, HC e NO _x em ciclo Otto	815
	B01D-053/62	Remoção catalítica de SO ₂ e H ₂ S de gases industriais e FCC	764
	C02F-001/78	Oxidação avançada (AOPs) — H ₂ O ₂ /ozônio para tratamento de efluentes	718
	F01N-003/28	Redução catalítica seletiva (SCR) — controle de NO _x em veículos a diesel	706
Eixo IV — Reciclagem de e recuperação de TR de catalisadores gastos	C01B-003/40	Produção de H ₂ por reforma catalítica a vapor — regeneração de catalisadores Ni/Ce	584
	C01B-003/04	Produção de H ₂ a partir de hidrocarbonetos — catalisadores com Ce e La	394
	C10G-002/00	Craqueamento catalítico de frações pesadas — regeneração de catalisadores para FCC	357
	C10G-011/05	Processo FCC — reativação, reposição e remanufatura de catalisadores com TR	293
	C01B-003/32	Reação de deslocamento do gás d'água (WGS) — reutilização de Ce e La	226
	C01C-001/04	Síntese de amônia — regeneração de catalisadores de Fe/Ce/La	203
	C25B-001/04	Eletrolise de água — recuperação eletroquímica de TR de licores de lixiviação	201
	C22B-059/00	Obtenção de metais de terras raras — recuperação hidrometalúrgica e pirometalúrgica	184
	B01J-038/02	Regeneração de catalisadores — processos de reativação e remanufatura	175
	H01M-004/90	Eletrodos para células a combustível — recuperação de TR de SOFCs esgotadas.	169

Notas: (i) Código B01J-023/889 com realce na base Derwent — representa sistemas Ce-La-Zr e Ce-La-Pr-Nd altamente relevantes para catalisadores de TWC e FCC de nova geração; (ii) Os valores de patentes por código CIP incluem documentos com múltiplas classificações, portanto o somatório por eixo é superior ao total de 20.021 patentes únicas do portfólio.

Fonte: Busca direta na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 20 mar. 2026.

A classificação dos 20.021 registros de patentes pelos quatro eixos temáticos revelou uma estrutura de inovação fortemente concentrada nos estágios iniciais da cadeia de valor catalítica — especialmente na preparação de suportes e precursores catalíticos e na formulação dos catalisadores. A gestão de fim de vida, envolvendo a reciclagem e a recuperação de TR de catalisadores gastos, mostrou-se ainda incipiente. Esse padrão reflete, simultaneamente, a maturidade relativa do conhecimento acumulado em síntese de catalisadores e a emergência de novos campos tecnológicos impulsionados pela agenda de transição energética.

O Eixo I (Composição — TR e sistemas multimetálicos complexos) contempla 14.496 ocorrências nos códigos CIP “*top 10*”, que se organizam em torno de uma progressão composicional clara, i.e., do componente individual a sistemas multimetálicos de alta complexidade.

O código B01J-023/83 (3.887 patentes) lidera com expressiva margem, confirmando o CeO_2 como elemento-âncora da inovação em catalisadores à base de TR, em virtude de sua capacidade de armazenamento de oxigênio (OSC) e de seus ciclos redox $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ — propriedades sem equivalente funcional nos demais óxidos metálicos disponíveis.

Já o código B01J-023/89 (2.311 patentes), que agrupa a classe específica de lantanídeos em catalisadores heterogêneos, e o B01J-023/889 (1.944 registros), relativo a sistemas multimetálicos com TR e metais de transição, evidenciam a crescente complexidade das formulações, nas quais as TR atuam não apenas como promotores isolados, mas como componentes de sistemas quaternários e quinários que integram Ce, La, Zr e metais de transição como Mn e Co.

Esse movimento composicional é corroborado pelos códigos B01J-023/887 (582 patentes) e B01J-023/888 (474 patentes), que cobrem, respectivamente, sistemas binários lantanídeo-metal de transição e combinações de dois ou mais lantanídeos — categorias de crescimento acelerado no período pós-2018, associadas ao desenvolvimento de catalisadores de nova geração para TWC, Bio-FCC e reforma catalítica.

A presença do código B01J-023/755 (1.063 patentes), referente aos óxidos mistos Ce-Zr, sinaliza a centralidade desse sistema binário como plataforma composicional de referência, sobre a qual são construídas as formulações mais complexas dos demais grupos. Para o Brasil, cuja competência em síntese de óxidos mistos Ce-Zr-Y ainda se concentra em escala laboratorial, este eixo representa simultaneamente o núcleo do déficit tecnológico nacional e o campo de maior oportunidade para diferenciação via PD&I orientada a *feedstocks* renováveis.

No Eixo II, os métodos de impregnação (B01J-037/02, 4.230 patentes) e de ativação/tratamentos pós-síntese (B01J-037/08, 4.439 patentes) dominam o portfólio de preparação, indicando que a fronteira de inovação neste eixo se deslocou da síntese de suportes para o controle preciso das etapas de deposição e ativação da fase ativa — aspecto diretamente relacionado ao desempenho em condições severas de operação (alta temperatura, presença de vapor e venenos catalíticos).

O Eixo III (Controle de emissões) registra 13.686 ocorrências nos top 10, com liderança do código B01D-053/86 (3.774 patentes), que agrupa catalisadores de três vias (TWC), catalisadores de oxidação diesel (DOC) e sistemas de pós-tratamento de escape. A expressiva presença de códigos de tratamento de efluentes líquidos (C02F-001/72, C02F-101/30) e de fotocatalise revela a diversificação das aplicações ambientais dos catalisadores à base de CeO_2 , em expansão acelerada no período pós-2018, impulsionada

pelo endurecimento regulatório global. O segmento de redução catalítica seletiva (SCR, F01N-003/28, 706 patentes) mantém posição relevante, refletindo a pressão das normas Euro 6/7 e China VI sobre a indústria de motores a diesel.

O Eixo IV (Recuperação e reciclagem de catalisadores) apresenta o menor volume de patentes nos “*top 10*”, mas concentra os códigos de maior relevância estratégica prospectiva. O código C22B-059/00 (184 patentes), que abrange a recuperação hidrometalúrgica e pirometalúrgica de TR de catalisadores exauridos e o B01J-038/02 (175 patentes), relativo à regeneração de catalisadores, representam o núcleo do esforço inovativo em economia circular aplicada na recuperação de catalisadores à base de TR. A baixa densidade patentária neste eixo reflete tanto a emergência do campo, quanto sua elevada dependência de *know-how* tácito e de processos proprietários não patenteados. Para o Brasil, onde o volume de catalisadores FCC exauridos gerados anualmente pelas refinarias da Petrobras supera 30.000 toneladas, a recuperação de La e Ce a partir desse fluxo representa uma oportunidade estratégica ainda insuficientemente explorada em termos de proteção intelectual.

A análise dos 30 principais depositantes individuais de patentes em catalisadores à base de TR identificados na base Derwent Innovation Index (critério “*top 30*”), organizada por grupos econômicos e institucionais, revelou uma concentração de portfólio significativamente mais expressiva do que a captada pelos registros individuais (Tabela 6.4).

Tabela 6.4: Principais depositantes de patentes em catalisadores à base de terras raras: ranking consolidado por grupo econômico e institucional: 2015–2025

Grupo/Entidades	País	Nº de patentes	Percentual do total
Grupo Sinopec (7 entidades)	China	3.614	18,1%
Universidades chinesas independentes (15)	China	2.335	11,7%
CAS - Academia Sinica (2 institutos)	China	671	3,4%
Grupo BASF (2 entidades)	Alemanha/ EUA	326	1,6%
PetroChina/CNPC	China	293	1,5%
Grupo Johnson Matthey (2 entidades)	Reino Unido/EUA	291	1,5%
SABIC Global Technologies BV	Arabia Saudita	101	0,5%

Fonte: Busca direta na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 20 mar. 2026.

O Grupo Sinopec — que reúne sete entidades com denominações distintas, mas vinculadas à mesma estrutura corporativa da China Petroleum & Chemical Corp — totaliza 3.614 patentes, equivalentes a 18,1% do portfólio completo de 20.021 documentos. Essa consolidação evidencia que o registro fragmentado por subsidiárias e institutos associados subestima sistematicamente o peso real dos grandes conglomerados, tornando a agregação por grupo o critério metodologicamente mais adequado para avaliar a real distribuição do poder inovativo neste segmento.

O segundo bloco de destaque é o das 15 universidades e institutos de pesquisa chineses independentes, que, embora não constituam um grupo econômico unificado, somam 2.335 patentes e consolidam a

academia chinesa como segundo maior produtor de propriedade intelectual no segmento. A Academia Sinica (CAS), consolidada em dois institutos, acrescenta 671 patentes adicionais, elevando o conjunto das entidades públicas de pesquisa chinesas a mais de 3.000 registros. Em perspectiva integrada, os três grandes atores estatais chineses, Grupo Sinopec (3.614), bloco universitário (2.335) e CAS (671), respondem por 6.620 patentes, o equivalente a 33,1% do portfólio total, reforçando a natureza de política industrial sistêmica que subjaz a esse esforço inovativo.

Entre os atores ocidentais, o Grupo BASF (326 patentes, Alemanha/EUA) e o Grupo Johnson Matthey (291 patentes, Reino Unido/EUA) são os únicos que figuram como grupos econômicos consolidados fora da China. Juntos, totalizam 617 patentes — apenas 3,1% do portfólio total, margem que evidencia o profundo desequilíbrio competitivo em termos de volume de proteção intelectual. A SABIC (Arábia Saudita, 101 patentes), entidade única entre os líderes, fecha o *ranking* consolidado como único representante do Oriente Médio.

A ausência de qualquer instituição brasileira neste mapeamento constitui o indicador mais objetivo do déficit estratégico do País em propriedade intelectual aplicada à cadeia de catalisadores à base de TR, o que justifica ações específicas de incentivo ao patenteamento como componente central do *Roadmap* proposto para alcance da visão 2040.

Complementando a análise por grupos econômicos e institucionais, o mapeamento por área de conhecimento oferece leitura mais granular das especificidades tecnológicas que estruturam a inovação em catalisadores à base de TR, revelando padrões que vão além da concentração temática e permitem identificar trajetórias estratégicas para o horizonte 2040. A Tabela 6.5 apresenta a distribuição das 20.021 patentes por área de conhecimento, adotando-se o critério “top 10”.

Tabela 6.5: Patentes referentes a catalisadores à base de terras raras, classificadas por área do conhecimento: 2015 - 2025 (critério: “top 10”)

Áreas	Nº de patentes
Química	19.990
Engenharia	19.616
Energia e Combustíveis	5.338
Ciência dos Polímeros	5.250
Instrumentação e Instrumentos	2.156
Recursos Hídricos	1.943
Ciência dos Materiais	1.354
Eletroquímica	738
Metalurgia e Engenharia Metalúrgica	472
Transporte	467

Fonte: Busca direta da base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 20 mar. 2026.

O núcleo irreduzível — ‘Química’ (19.990 ocorrências), ‘Engenharia’ (19.616) e ‘Energia e Combustíveis’ (5.338) — concentra as três primeiras posições, com volumes praticamente equivalentes nas duas primeiras categorias. Esse padrão indica que a inovação em catalisadores à base de terras raras (TR) é intrinsecamente integrativa: avanços na síntese de precursores dependem da engenharia de processos e reatores, que, por sua vez, respondem a requisitos de desempenho em conversão energética. A proximidade entre Química e Engenharia sugere uma fronteira difusa entre descoberta e aplicação, diferentemente de outros segmentos de TR mais orientados a materiais. Em conjunto, essas três áreas respondem por cerca de 78% das ocorrências entre as dez principais categorias, evidenciando a centralidade dos processos de conversão e formulação catalítica.

No segundo nível, emergem trajetórias relevantes para a prospecção até 2040. ‘Ciência dos Polímeros’ (5.520 ocorrências) ocupa a quarta posição, com destaque para suportes zeolíticos modificados, aglutinantes para extrusão e resinas de troca iônica aplicadas à separação de TR — domínio ainda incipiente no Brasil e estratégico para a formulação final de catalisadores. ‘Instrumentação e Instrumentos’ (2.156) mantém posição consistente, com foco crescente em monitoramento *in situ*, sensores e cromatografia de processo, elementos-chave para a digitalização da cadeia.

A presença de ‘Recursos Hídricos’ (1.943) na sexta posição reflete o avanço de aplicações em tratamento de efluentes, especialmente por fotocatalise, associado ao endurecimento regulatório ambiental. Para o Brasil, esse campo representa oportunidade de diferenciação tecnológica. ‘Ciência dos Materiais’ (1.354) e ‘Eletroquímica’ (738), nas posições seguintes, indicam a expansão das aplicações em energia, como células a combustível e sistemas de armazenamento. ‘Metalurgia’ (472) e ‘Transporte’ (467) completam o quadro, com aplicações em processos siderúrgicos e controle de emissões veiculares.

Esse conjunto evidencia a transição da catálise baseada em TR para um campo multidisciplinar, no qual convergem química, engenharia, materiais, eletroquímica e aplicações ambientais. Para o Brasil, essa dinâmica representa simultaneamente um desafio de atualização de competências e uma oportunidade de inserção estratégica em nichos como bioenergia, hidrogênio, tratamento de efluentes e controle de emissões.

6.5 Competência atual associada à cadeia produtiva de catalisadores à base de TR

A análise da competência atual da cadeia produtiva de catalisadores à base de TR no Brasil deve considerar, de forma diferenciada, a etapa de separação e obtenção de precursores de alta pureza, os principais grupos de aplicações e a reciclagem de catalisadores exauridos. Em cada um desses eixos de competência, o País apresenta graus distintos de domínio tecnológico, capacidade produtiva, inserção em redes globais de PD&I e acesso a insumos críticos, incluindo TR (Quadro 6.3).

Quadro 6.3: Mapa de competências da cadeia produtiva de catalisadores à base de TR no Brasil (2025–2026)

Competência	Nível	Descrição do domínio em 2025	Evolução nas últimas décadas
Separação e obtenção de precursores de alta pureza	Crítico	Sem planta industrial nacional; capacidade restrita à escala piloto (CETEM) e importação de precursores.	Estagnação industrial. Avanço tecnológico isolado. Domínio do <i>know-how</i> em escala piloto pelo CETEM, sem conversão em escala produtiva.
Catalisadores para refino de petróleo (FCC)	Pleno	PD&I e produção industrial estabelecidos; FCC S.A. opera com tecnologia proprietária.	Trajetória de consolidação progressiva; liderança sustentada nas últimas três décadas pela parceria Petrobras–Ketjen.
Catalisadores para biorrefino e coprocessamento de cargas renováveis (Bio-FCC)	Emergente	Escala piloto e demonstração; primeiro processamento comercial de 100% de carga renovável em 2023.	Surgimento acelerado pós-2015; FCC S.A. alcançou protagonismo mundial com o catalisador ReNewFCC.
Catalisadores automotivos (Otto/Flex)	Parcial	Produção local com tecnologia predominantemente licenciada; dependência de importação de monolitos e <i>washcoats</i> .	Estável com avanços limitados; gap tecnológico em suportes cerâmicos e <i>washcoats</i> Ce-Zr-Y persiste sem iniciativas de superação identificadas.
Catalisadores automotivos (Diesel/SCR)	Incipiente	Dependência quase integral de importação; ausência de produção nacional de catalisadores SCR.	Demanda crescente induzida pelo Proconve P-8; sem resposta industrial doméstica equivalente ao ritmo regulatório.
Catalisadores para geração de hidrogênio (reforma, WGS, PROX)	Incipiente	Pesquisa ativa em grupos universitários; sem escala industrial ou planta demonstrativa.	Progresso científico relevante, particularmente em reforma de etanol com Ce/La; distância entre laboratório e escala industrial permanece crítica.
Suportes e aditivos baseados em CeO ₂ (múltiplos contextos)	Incipiente	Fase de pesquisa; produção de CeO ₂ de alta área superficial ausente em escala nacional	Segmento em formação; publicações crescentes, porém sem transferência tecnológica ou proteção patentária expressiva.
Reciclagem e recuperação de TR de catalisadores gastos	Emergente	Grupos de pesquisa ativos em hidrometalurgia de TR; interesse industrial crescente, sem planta operacional.	Novo campo no Brasil, impulsionado pela agenda de minerais críticos; janela estratégica aberta pela recuperação de catalisadores para FCC gastos nas refinarias.

Legenda: Níveis de competência: *Pleno* — domínio tecnológico e industrial estabelecido; capacidade de P,D&I e produção em escala comercial; *Parcial* — produção nacional existente, mas com dependência tecnológica externa em componentes críticos; *Emergente* — escala piloto ou demonstração; competência científica consolidada, industrialização em curso; *Incipiente* — pesquisa laboratorial ativa; sem transferência tecnológica ou produção em escala relevante; *Crítico* — ausência de capacidade produtiva nacional; dependência integral de importação ou de insumo externo.

Fonte: Revisão da literatura técnica e consultas a especialistas em 2026.

6.5.1 Separação e obtenção de precursores de alta pureza — Nível: Crítico

A separação de TR e obtenção de precursores de alta pureza permanece o gargalo mais crítico da cadeia (ver Capítulo 11 para análise consolidada deste gargalo). O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) concluiu recentemente, após mais de dez anos de pesquisa com apoio e financiamento do governo federal, o *know-how* de separação individual dos elementos de TR em escala piloto contínua, por meio de extração por solvente. Trata-se de avanço tecnológico de alto valor estratégico, uma vez que a etapa de separação química desses elementos é a que agrega maior valor na cadeia produtiva e poucos países no mundo dominam essa tecnologia. O Centro integra o INCT MATERIA, rede nacional aprovada pelo MCTI/CNPq com investimento de R\$ 10,2 milhões ao longo de cinco anos, atuando nas frentes de extração sustentável, cerâmicas complexas e ímãs permanentes de alto desempenho.

A Universidade de São Paulo (USP), em parceria com o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), desenvolveu método de separação de TR baseado em nanotecnologia e menor impacto ambiental, enquanto o Instituto SENAI de Inovação (ISI) e o CIT Senai ITR — Laboratório-Fábrica de Ímãs de Neodímio de Lagoa Santa (MG), inaugurado em 2024 com capacidade de 100 t/ano — representam a primeira experiência semi-industrial do País na cadeia produtiva de TR metálicas.

Não obstante os avanços tecnológicos alcançados pelo CETEM e pelas instituições de pesquisa nacionais, a ausência de plantas industriais de separação no Brasil implica que toda a produção nacional de concentrado precisa ser enviada ao exterior — principalmente à China — para separação e refino.

O MagBras — consórcio de 38 entidades com orçamento de R\$ 73 milhões (dos quais R\$ 60 milhões do governo federal) — articula atores do ecossistema em torno da cadeia de TR, visando à consolidação de uma cadeia produtiva nacional de ímãs permanentes, essenciais para tecnologias de ponta nos setores de energia limpa, mobilidade elétrica e defesa. Do ponto de vista da demanda por precursores catalíticos, o MagBras gera efeito indutor direto sobre a cadeia de óxidos funcionais de TR, em particular CeO_2 , La_2O_3 e Nd_2O_3 , reforçando a necessidade de escalonamento das etapas de separação e refino no território nacional.

6.5.2 Catalisadores para refino de petróleo (FCC) — Nível: Pleno

No segmento de catalisadores para unidades de FCC na indústria de refino, o Brasil dispõe de competência considerada madura, com domínio pleno das etapas de desenvolvimento, produção e aplicação industrial. A FCC S.A., apoiada em tecnologia desenvolvida em estreita colaboração com o Cenpes da Petrobras e parceiros internacionais, consolidou-se como fabricante de referência na América do Sul, atendendo à maior parte da demanda nacional e exportando para outros mercados da região (FCC S.A., 2025; Brasil Energia, 2025).

Essa posição se reflete na capacidade de formular catalisadores sob medida para condições específicas das refinarias brasileiras, incluindo:

- Processamento de petróleos de diferentes perfis, inclusive com maior teor de contaminantes;
- Atendimento a requisitos mais estritos de qualidade de combustíveis, como teores reduzidos de enxofre;

- Adaptação a cargas contendo matérias-primas renováveis, como óleos vegetais e correntes com conteúdo lignocelulósico, em projetos de coprocessamento (Lima et al., 2009; Petrobras, 2025a).

Do ponto de vista da trajetória até 2040, a competência atual em catalisadores para FCC constitui base estratégica para a transição do parque de refino brasileiro na direção de uma maior participação de combustíveis de baixo carbono, incluindo diesel verde e outros combustíveis com conteúdo renovável, bem como para a produção de matérias-primas químicas associadas à economia de baixo carbono. É justamente sobre esse substrato tecnológico consolidado que se erguem as perspectivas dos catalisadores para biorrefino e coprocessamento de cargas renováveis, abordadas a seguir.

6.5.3 Catalisadores para biorrefino e coprocessamento de cargas renováveis (Bio-FCC)

— Nível: Emergente

Em perspectiva global, a descarbonização de unidades FCC configura uma das principais agendas tecnológicas do setor, com foco em coprocessamento de biocrudos, captura de carbono pós-combustão e integração com hidrogênio de baixo carbono — movimentos que consolidam a FCC como ativo central da "biorrefinaria do futuro" (CATF, 2025; IEA Bioenergy Task 39, 2024). O Brasil não apenas acompanha essa tendência como a antecipou: em 2023, a Refinaria de Petróleo Riograndense (RPR) processou, pela primeira vez no mundo, 100% de óleo de soja em uma unidade FCC industrial, com tecnologia e catalisadores da linha ReNewFCC desenvolvidos pelo CENPES em parceria com a FCC S.A., gerando bio-GLP, propileno renovável e bioaromáticos integralmente renováveis. Esse marco não é episódico — integra o Programa BioRefino e o Plano de Negócios 2025–2029 da Petrobras, que destina US\$ 1,5 bilhão a biocombustíveis, sinalizando a institucionalização dessa trajetória tecnológica (Petrobras, 2023; 2025b).

Consolidar e ampliar essa liderança exige, contudo, superar a principal vulnerabilidade da cadeia: o acesso competitivo e sustentável a precursores de alta pureza, cuja produção nacional permanece em escala piloto. É nessa lacuna que convergem os principais instrumentos de política pública em curso — o Fundo de Minerais Críticos do BNDES, a Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (PNMCE), instituída pelo PL 2780/2024, e o Programa Nova Indústria Brasil (NIB, 2024) —, além da necessidade de expandir a capacidade de PD&I em formulações voltadas a novos feedstocks e de consolidar a inserção em cadeias globais de valor de catalisadores verdes (BNDES, 2025; Brasil, 2024). A integração entre essas políticas e a competência industrial acumulada será determinante para que o Brasil avance da condição de consumidor de TR para a de desenvolvedor e exportador de soluções catalíticas de alto valor agregado, em consonância com as projeções do mercado global para o horizonte 2040.

6.5.4 Catalisadores automotivos — Nível: Parcial/ Incipiente

No segmento de catalisadores automotivos, verifica-se a coexistência de competências produtivas relevantes com dependência tecnológica externa em etapas críticas de projeto e formulação, ainda protegidas por segredo industrial e por portfólios de propriedade intelectual concentrados em poucas empresas globais. Empresas como Umicore e BASF operam fábricas no Brasil, com capacidade de produção e laboratórios de testes e desenvolvimento adaptados a combustíveis nacionais, mas o núcleo do *know-how* de formulações catalíticas permanece sediado nos centros globais dessas empresas.

A Umicore Catalisadores Ltda. mantém duas unidades produtivas em Americana (SP), além de instalações em Joinville (SC), integradas à rede global da empresa, que opera 16 plantas em 13 países (Umicore, 2024a; 2024b). A BASF, por sua vez, inaugurou em 2000 sua planta de catalisadores para emissões veiculares em

Indaiatuba (SP), que ao longo de 15 anos de operação acumulou a produção de 14 milhões de catalisadores e a eliminação estimada de 20 milhões de toneladas de poluentes do escapamento no Brasil e em países vizinhos, contando com cinco linhas de produção e mais de 100 colaboradores (BASF, 2015).

Cabe destacar que os catalisadores em uso em centros urbanos como Rio de Janeiro e São Paulo raramente são avaliados de forma periódica, restringindo o mercado de reposição praticamente a veículos novos. A inspeção veicular de emissões foi descontinuada em São Paulo em 2014, não tendo sido retomada desde então. Estudos apontam que, sem esse controle, veículos mais antigos frequentemente substituem o escapamento original por equipamentos sem catalisador, deteriorando substancialmente a qualidade do ar urbano (Poder360, 2024).

Considera-se fundamental a implementação de avaliação periódica obrigatória para criar um mercado mais robusto e, sobretudo, para preservar a qualidade do ar nessas cidades — objetivo, aliás, explicitamente previsto no Código de Trânsito Brasileiro (art. 104) e nas resoluções do CONAMA que tratam dos Programas de Inspeção e Manutenção (I/M) de Veículos em Uso (Brasil, 1997; CONAMA, 2002a). Este desafio estende-se às motocicletas, especialmente aquelas com motores de dois tempos, altamente poluentes e que, no contexto brasileiro, foram progressivamente retiradas de linha apenas a partir da primeira fase do PROMOT, em 2003, sem que houvesse, por muito tempo, obrigatoriedade de instalação de catalisador para as demais categorias (ABRACICLO, 2006; CONAMA, 1999).

A fase mais recente do Programa PROMOT M5, estabelecida pela Resolução CONAMA n.º 493/2019, vigente para novos modelos desde janeiro de 2023 e para toda a produção a partir de janeiro de 2025, tornou obrigatória a injeção eletrônica e estabeleceu limites evaporativos mais restritivos, representando avanço expressivo no controle das emissões da frota de motocicletas (CONAMA, 2019).

Esse arcabouço regulatório é respaldado por relevantes competências técnicas nacionais associadas a ensaios de emissões veiculares, modelagem de desempenho de catalisadores e avaliação de impactos de diferentes formulações e cargas de metais nobres — capacidades que a CETESB, como agente técnico conveniado ao IBAMA, desenvolve continuamente em seus laboratórios de emissão veicular em São Paulo e São Bernardo do Campo (CETESB, 2021).

A essas se somam as competências em pesquisa de novos materiais catalíticos, incluindo óxidos mistos de TR, suportes avançados e rotas alternativas para redução de NO_x e pós-tratamento de gases, além de estudos de integração entre sistemas de controle de emissões e especificações de combustíveis, em um contexto de ampla utilização de etanol e misturas de biocombustíveis na matriz brasileira. Esse fator distingue o mercado nacional e exige adaptações específicas nos protocolos de homologação, como previsto nas Resoluções CONAMA n.º 492/2018 (PROCONVE L7/L8) e n.º 490/2018 (PROCONVE P8) (CONAMA, 2018a; 2018b).

No horizonte 2040, a evolução da competência nacional em catalisadores automotivos dependerá de:

- Alinhamento progressivo do marco regulatório brasileiro de emissões com padrões internacionais restritivos como o Euro 7 — aprovado como Regulamento (UE) 2024/1257, em vigor desde maio de 2024 —, que introduz limites ainda mais rigorosos para NO_x, material particulado fino (PN₁₀), emissões não-exaustivas de freios e pneus, e novos requisitos de durabilidade, especialmente relevantes para veículos pesados e frotas urbanas (Parlamento Europeu; Conselho Da União Europeia, 2024; Conselho da União Europeia, 2024). O PROCONVE P8, já equivalente ao Euro VI para veículos pesados e vigente desde 2022 (CONAMA, 2018b; ICCT, 2019), constitui o patamar de partida para essa convergência futura.

- Fortalecimento da capacidade de PD&I em materiais e sistemas catalíticos voltados a motores flex, híbridos e aplicações específicas em que a eletrificação é mais lenta, considerando que o Proconve L8 — baseado na Resolução CONAMA n.º 492/2018 e vigente em três etapas a partir de 2025 — adota sistema de média corporativa de emissões e introduz testes em condições reais de condução (Real Drive Emission — RDE), criando incentivo sistêmico à eletrificação progressiva da frota (CONAMA, 2018a; CETESB, 2022).
- Desenvolvimento de parcerias estratégicas entre fabricantes de catalisadores, montadoras, centros de pesquisa e órgãos governamentais, com foco em soluções adaptadas à realidade brasileira e latino-americana, incluindo condições de uso, padrões de manutenção e qualidade de combustíveis.

6.5.5 Sistemas catalíticos para geração de hidrogênio e reações químicas avançadas — Nível: Incipiente

Em sistemas catalíticos para geração de hidrogênio e para reações químicas avançadas, o Brasil apresenta competência científica significativa, com grupos de pesquisa consolidados em catálise heterogênea, óxidos de TR, perovskitas e sistemas Pt–CeO₂ aplicados à reforma de etanol, metano, biogás, reações de shift e PROX. Essa base de conhecimento é um ativo estratégico para a inserção do País na economia do hidrogênio e em cadeias químicas de baixo carbono até 2040.

Todavia, a transição de competências essencialmente acadêmicas para capacidades industriais em larga escala ainda se encontra em estágio inicial, exigindo:

- Estruturação de projetos-piloto e demonstração em escala semi-industrial de rotas de hidrogênio de baixo carbono baseadas em recursos nacionais (como etanol, biogás e resíduo agrícola), com uso de catalisadores à base de TR;
- Mecanismos de apoio à inovação que conectem universidades, centros de pesquisa, empresas de energia, fornecedores de equipamentos e investidores, em modelos de parceria público-privada;
- Estratégias tecnológicas e de propriedade intelectual orientadas a aplicações de nicho com maior potencial competitivo para o Brasil — como a reforma de etanol para geração descentralizada de H₂, a integração com sistemas de backup energético para data centers e a estabilização de redes elétricas com fontes renováveis intermitentes — constitui frente prioritária para a consolidação da cadeia nacional de catalisadores à base de TR.

Nesse contexto, o emprego de inteligência artificial para a otimização do *design* e do desempenho de catalisadores representa vetor de aceleração tecnológica de elevado potencial, a ser incorporado às agendas de PD&I das instituições de pesquisa e das empresas do setor.

6.5.6 Recuperação e reciclagem de TR de catalisadores gastos — Nível: emergente

A atual competência do Brasil em recuperação de catalisadores exauridos contendo TR pode ser caracterizada como emergente, com avanços relevantes em pesquisa, mas ainda com baixa difusão em escala industrial.

Estudos nacionais já demonstraram a viabilidade de determinar e recuperar elementos terras raras presentes em catalisadores para FCC exauridos, empregando diferentes rotas de tratamento de amostras, lixiviação ácida e precipitação seletiva, com eficiências elevadas de recuperação para lantânio e cério (determinação de elementos terras raras em catalisadores gastos; recuperação de TR via precipitação seletiva).

Projetos recentes apoiados por agências de fomento buscam desenvolver rotas hidrometalúrgicas otimizadas para recuperação e valorização de catalisadores para FCC, avaliando tanto o desempenho técnico quanto aspectos de viabilidade econômica e ambiental (FAPESP, 2024).

Em paralelo, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece diretrizes para gestão adequada de resíduos industriais e incentiva a reciclagem, criando um marco favorável à valorização de catalisadores exauridos como fonte secundária de TR. Apesar desse avanço em conhecimento e ambiente regulatório, a implementação de unidades industriais dedicadas à recuperação de TR a partir de catalisadores ainda é incipiente, exigindo esforços adicionais de escala piloto, modelos de negócio e integração com a cadeia de suprimento de TR, bem como alinhamento com iniciativas internacionais de economia circular para elementos terras raras.

6.5.7 Síntese da competência atual da cadeia produtiva de catalisadores à base de TR

Em síntese, a competência atual da cadeia produtiva de catalisadores à base de TR no Brasil pode ser representada por esquemas de maturidade diferenciada, como apresentado no Quadro 6.3, com:

- Pleno domínio em catalisadores para FCC, incluindo desenvolvimento, produção e aplicação industrial, com capacidade consolidada de PD&I e atuação em redes multilaterais;
- Domínio parcial em catalisadores automotivos, com capacidade produtiva e relevante adaptação local, porém ainda dependente de *know-how* e de decisões estratégicas de empresas multinacionais;
- Competência emergente, com base científica consolidada e projetos em escala piloto ou de demonstração, porém com baixa difusão em escala industrial. Incluem-se nesse nível catalisadores para biorrefino e coprocessamento de cargas renováveis, bem como a recuperação e reciclagem de terras raras a partir de catalisadores gastos;
- Competência incipiente a intermediária em sistemas catalíticos para geração de hidrogênio e reações químicas avançadas, concentrada em grupos de pesquisa, com necessidade de maior integração com o setor produtivo;
- Nível crítico de competência, caracterizado pela ausência de capacidade produtiva nacional e pela dependência integral de importações ou de insumos externos. A separação de terras raras e a obtenção de precursores de alta pureza permanecem como o principal gargalo transversal às cadeias de aplicação.

A consolidação dessa base de competências, em articulação com políticas públicas e instrumentos de apoio a iniciativas de PD&I, será decisiva para que o País avance, até 2040, na direção do domínio integral

da cadeia "da mina ao catalisador e ao uso final", com foco em soluções ambientalmente sustentáveis e competitivas em mercados globais (KfW, 2024; Rainbow Rare Earths, 2024).

A partir de levantamento realizado diretamente à Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa do MCTI, ao Diretório de Grupos de Pesquisa no Brasil do CNPq e ao site institucional da Sociedade Brasileira de Catálise, foi possível identificar 25 grupos que desenvolvem linhas de pesquisa relacionadas à cadeia produtiva de catalisadores à base de TR (Tabela 6.6).

Tabela 6.6: Principais grupos de pesquisa associados à cadeia produtiva de catalisadores à base de TR no Brasil

Grupo de pesquisa	Instituição	Linhas de pesquisa
NUCAT – Núcleo de Catálise	COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro – RJ	Catálise heterogênea; reforma de etanol e metano; hidrotreatamento; catalisadores nanoestruturados (Pt–CeO ₂ /La ₂ O ₃); Bio-FCC; síntese e caracterização de zeólitas, carbetos e argilas pilarizadas
LACAT – Laboratório de Catálise	Instituto Nacional de Tecnologia (INT/MCTI)	Reforma a vapor do etanol (CeO ₂ /La ₂ O ₃); WGS; PROX; catalisadores Ni–CeO ₂ para H ₂ verde; síntese de catalisadores avançados
GCN – Grupo de Catálise e Nanomateriais	IQ/Unicamp, Campinas	Catalisadores heterogêneos via sistemas nanométricos modelo, com caracterização avançada por síncrotron, aplicados à conversão de CO ₂ e valorização de biomassa.
LEPAC – Laboratório para Estudos de Processos de Adsorção e Catálise	FEQ/Unicamp, Campinas	Preparação de catalisadores metálicos suportados, cinética de reações heterogêneas e adsorção de gases em materiais porosos, incluindo conversão de moléculas renováveis.
LABCAM – Laboratório de Catálise e Materiais	DQ / UFMG	Materiais catalíticos à base de CeO ₂ ; oxidação de CO; catálise ambiental; adsorção de TR.
Materiais e Catálise	EQ / UFRJ	Catalisadores FCC zeolíticos com TR; caracterização de TR em catalisadores gastos; recuperação.
GPCat – Grupo de Pesquisa em Catálise	DEQ / UFPR	Catalisadores La ₂ O ₃ /CeO ₂ para reforma de biogás; transesterificação; HDO de bio-óleo.
CETEM – Grupo de TR	CETEM / MCTI – Rio de Janeiro	Separação e purificação de TR por extração por solvente; óxidos Ce/La/Nd grau catalisador.
CENPES – Laboratório de Catálise	Petrobras, Rio de Janeiro	FCC e Bio-FCC; formulação de catalisadores com TR; recuperação de catalisadores exauridos contendo TR.
FCC S.A. – P&D em Catálise	FCC S.A. / Parque Tec. Santa Cruz	Catalisadores FCC com TR para petróleo pesado e biorrefinarias; Bio-FCC pioneiro mundial.
Grupo Catálise Heterogênea	IQ / USP – São Paulo	Catalisadores Pd–CeO ₂ ; reforma de etanol; fotocatalisadores com óxidos de TR
Laboratório de Catálise e Fenômenos Interficiais	DQ / UFSC – Florianópolis	Estudos do efeito catalítico de íons lantanídeos na hidrólise de ésteres de fosfato, com aplicações em descontaminação de compostos organofosforados.
LAC – Laboratório de Combustão e Catálise aplicadas	UFSC – Florianópolis	Síntese e caracterização de catalisadores heterogêneos, estudo da cinética química e simulação de reatores e sistemas, aplicando métodos avançados e ferramentas computacionais especializadas.

Grupo de pesquisa	Instituição	Linhas de pesquisa
LATEQ – Laboratório de Tecnologia Química	IQ / UnB – Brasília	Catalisadores $\text{CeO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$ para conversão de etanol; PROX para purificação de H_2 .
Grupo de Catálise Heterogênea (15)	DEQ / UFCG, Campina Grande – PB	Catálise heterogênea; síntese e caracterização de zeólitas; catalisadores para tratamento ambiental; reforma catalítica de hidrocarbonetos
Grupo de Catálise Heterogênea	DEQ / UFRN, Natal – RN	Catálise heterogênea; síntese e caracterização de catalisadores; oxidação seletiva; reforma catalítica; desativação de catalisadores
GECCAT – Grupo de Estudos em Cinética e Catálise	IQ / UFBA, Salvador – BA	Cinética química e mecanismos de reação; catálise heterogênea; oxidação seletiva; síntese e caracterização de catalisadores de óxidos mistos; catálise ambiental
LABCAT – Laboratório de Catálise e Materiais	UFBA, Salvador – BA	Catálise heterogênea; conversão catalítica de biomassa; oxidação de compostos orgânicos; síntese de novos materiais catalíticos; fotocatálise
LCC – Laboratório de Cinética e Catálise (19)	UERJ, Rio de Janeiro – RJ	Zeólitas e óxidos mistos derivados de hidrotalcitas; processos catalíticos industriais; remoção de poluentes por adsorção e fotocatálise; síntese e modificação de catalisadores
LabCat – Laboratório de Catálise	DEQ / UFSCar, São Carlos	Catálise heterogênea; hidrotreamento e hidroprocessamento; síntese e caracterização de catalisadores; conversão de biomassa; biocombustíveis
LAMOCA – Laboratório de Catálise Molecular	IQ / UFRGS, Porto Alegre	Catálise homogênea e organometálica; reações de acoplamento C–C; catálise em líquidos iônicos; síntese de catalisadores para química fina
LABORE – Laboratório de Cinética e Reatores	EQA / UFSC, Florianópolis	Cinética química e engenharia de reatores; modelagem e simulação de processos catalíticos; catálise ambiental; processos de separação integrados
LRC – Laboratório de Reatividade e Catálise	IQ/UFRGS, Porto Alegre – RS	Catálise heterogênea; reatividade de superfícies metálicas; catalisadores suportados; produção de hidrogênio; reforma a vapor e oxidação parcial
LSC – Laboratório de Simulação e Controle de Processos de Tratamento de Minérios	Escola Politécnica/ USP, São Paulo	Simulação e controle de processos catalíticos; modelagem de reatores químicos; otimização de processos; integração energética
RECAT – Laboratório de Reatores, Cinética e Catálise	DEQ / UFF, Niterói	Reforma catalítica para produção de gás de síntese e hidrogênio; conversão de bio-óleo e gaseificação de biomassa; conversão de CO_2 ; reatores com membranas

Fontes: Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa do MCTI; Diretório de Grupos de Pesquisa no Brasil do CNPq; Sociedade Brasileira de Catálise.

A análise do perfil dos grupos evidencia padrões relevantes para a construção do Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Catalisadores à base de terras raras (TR). Do ponto de vista geográfico e institucional, observa-se forte concentração no eixo Rio de Janeiro–São Paulo, que reúne 13 dos 25 grupos mapeados. No Rio de Janeiro, destacam-se instituições como UFRJ, INT/MCTI, CETEM/MCTI, UFF, UERJ, Petrobras (CENPES) e FCC S.A., totalizando oito grupos com significativa articulação entre pesquisa

acadêmica e aplicação industrial. Em São Paulo, os cinco grupos estão distribuídos entre Unicamp, USP e UFSCar.

A região Sul também apresenta participação relevante, com seis grupos distribuídos entre UFSC, UFRGS e UFPR. O Nordeste conta com quatro grupos, localizados na UFBA, UFCG e UFRN. Completam o panorama o LATEQ da UnB, no Centro-Oeste, e o LABCAM da UFMG, em Minas Gerais.

Apesar de esperada, essa concentração no eixo RJ–SP revela uma fragilidade estrutural, considerando que os principais insumos minerais da cadeia de TR se localizam no interior de Minas Gerais e em Goiás. Esses estados apresentam presença limitada no mapa de competências — Minas Gerais conta com apenas um grupo, enquanto Goiás não aparece no levantamento — indicando desalinhamento entre base de recursos e capacidades tecnológicas.

Sob a ótica institucional, identifica-se uma configuração tripartite: (i) grupos acadêmicos focados em pesquisa fundamental e pré-competitiva, com ênfase em reforma de etanol, controle de emissões e valorização de biomassa; (ii) institutos de pesquisa aplicada, com destaque para o CETEM/MCTI, único com competência em separação e purificação de TR em escala de bancada, e o INT/MCTI (LACAT), referência em catalisadores Ni–CeO₂ para produção de hidrogênio verde; e (iii) estruturas de P&D corporativo pela integração da FCC S.A. com o Parque Tecnológico de Santa Cruz — onde está instalada a Planta Multipropósito de Catalisadores (ProCat) em parceria com a UFRJ e o CENPES da Petrobras responsáveis pelas iniciativas de maior maturidade tecnológica no país nesse segmento, incluindo o desenvolvimento do Bio-FCC 100% renovável em escala industrial.

A análise temática das linhas de pesquisa revela duas assimetrias estruturais relevantes. A primeira é o predomínio de grupos dedicados à reforma de etanol e à produção de hidrogênio, presentes em cerca de um terço dos grupos, refletindo alinhamento com a política energética nacional, mas indicando possível redundância de esforços na ausência de coordenação interinstitucional.

A segunda assimetria refere-se à cobertura ainda incipiente do design computacional de catalisadores. Embora existam competências pontuais em modelagem e simulação, abordagens mais avançadas — como modelagem eletrônica por DFT, uso de aprendizado de máquina e integração com gêmeos digitais — não apresentam ancoragem institucional robusta. Essa lacuna representa um desafio estratégico, especialmente considerando sua centralidade na fronteira de inovação do setor até 2035, devendo ser priorizada no Mapa do Caminho Estratégico da cadeia.

6.6 Visão de futuro da cadeia produtiva de catalisadores à base de TR no Brasil – horizonte 2040

6.6.1 Enunciado da visão 2040

“Em 2040, a cadeia produtiva de catalisadores à base de TR no Brasil encontra-se integrada a montante, com uso competitivo e sustentável de TR de origem nacional, articulando mineração, transformação, formulação de catalisadores e reciclagem, e posicionando o País como referência regional em soluções catalíticas para refino, biorefinarias, transporte limpo, hidrogênio de baixo carbono e processos químicos avançados.

A cadeia opera segundo preceitos de sustentabilidade, com elevada eficiência no uso de recursos, padrões robustos de governança socioambiental, rastreabilidade dos fluxos de TR e inserção competitiva em mercados externos de alto valor agregado”.

Esse enunciado traduz uma ambição que vai além da condição de exportador de minério: o Brasil projeta-se como protagonista industrial ao longo de toda a cadeia catalítica — desde o domínio das etapas de lavra, separação e refino de TR até a produção de catalisadores de elevado desempenho e sua incorporação aos mercados de refino, controle de emissões e transição energética.

6.6.2 Dimensões estratégicas e objetivos para 2040

Com base nesse referencial, a análise estruturou-se em cinco dimensões que cobrem, de forma integrada, a progressão da cadeia produtiva da lavra e separação de TR à formulação de catalisadores, as competências tecnológicas e industriais necessárias à sua consolidação e os instrumentos de política pública e sustentabilidade requeridos até 2040.

O Quadro 6.4 sintetiza, para cada dimensão, o diagnóstico da situação atual, os objetivos estratégicos e a configuração desejada ao final do horizonte de planejamento.

Quadro 6.4: Objetivos estratégicos para alcance da visão de futuro 2040 da cadeia produtiva de catalisadores à base de TR

Dimensão	Situação atual	Objetivo estratégico	Situação 2040
Estrutura da cadeia e integração a montante (recursos e precursores fosforescentes)	– Ausência de plantas industriais de separação de TR. – Dependência integral de importação de óxidos de alta pureza (La_2O_3, CeO_2, Nd_2O_3). – <i>Know-how</i> de separação limitado a escala piloto (CETEM). Exportação de concentrado para refino externo (principalmente China). – Baixa integração entre mineração e indústria de catalisadores.	Construir cadeia integrada da mina ao catalisador, com fornecimento doméstico de precursores de TR de alta pureza.	– Capacidade instalada de separação e refino de TR para usos catalíticos superior a 5.000 t/ano de óxidos. – Fornecimento doméstico atende >60% da demanda nacional de precursores catalíticos. – Cadeia integrada da mina ao catalisador operacional, com rastreabilidade. – Participação brasileira na oferta global de precursores catalíticos de TR consolidada.
Segmentos de aplicação e competências tecnológicas	– FCC: competência plena (FCC S.A./Petrobras), com liderança em Bio-FCC. – Automotivos: produção local com tecnologia licenciada, dependência de washcoats e monolitos importados. – Geração de H_2 e processos químicos: competência científica relevante, sem escala industrial. Recuperação e reciclagem de TR de catalisadores gastos: projetos-piloto, sem operação comercial.	Consolidar liderança em Bio-FCC, desenvolver washcoats nacionais, escalar H_2 verde catalítico, estabelecer reciclagem comercial.	– Brasil reconhecido como referência regional em catalisadores sustentáveis para biorrefino e H_2 de baixo carbono. – Produção nacional de washcoats e suportes avançados atende >50% da demanda interna. – Três ou mais plantas industriais de H_2 verde operando com catalisadores nacionais base TR. – Recuperação e reciclagem de TR de catalisadores gastos consolidada como fonte secundária, representando >15% da oferta doméstica.

Dimensão	Situação atual	Objetivo estratégico	Situação 2040
P&D, inovação e recursos humanos	– 25 grupos de pesquisa ativos, concentrados no eixo RJ-SP-Sul. – Competência científica sólida em reforma catalítica, FCC e controle de emissões. – Ausência de proteção patentária expressiva (Brasil ausente do top 30 global). – Infraestrutura laboratorial dispersa, sem plataformas integradas de escala piloto. – Formação de RH concentrada em pós-graduação, com baixa articulação com demandas industriais.	Criar ecossistema robusto de inovação com proteção patentária, infraestrutura compartilhada, formação de RH e startups de base tecnológica.	– Portfólio brasileiro de patentes em catalisadores base TR superior a 200 documentos. Plataforma nacional de P,D&I operacional, com infraestrutura de piloto, caracterização avançada e modelagem computacional. – Formação anual de >50 profissionais especializados (mestrado/doutorado). – Pelo menos 3 <i>startups</i> de base tecnológica atuando em catalisadores funcionais, suportes avançados e recuperação / reciclagem de TR a partir de catalisadores gastos.
Mercado, inserção internacional e política industrial	– Demanda interna crescente por catalisadores FCC (US\$ 140-180 mi/ano) e automotivos, atendida majoritariamente por produção local com tecnologia externa. – Participação brasileira em exportações de catalisadores incipiente. Instrumentos de política industrial em construção (PNMCE, Fundo BNDES de Minerais Críticos, NIB 2024-2033). – Ausência de mecanismos de preferência para TR e catalisadores nacionais em compras públicas.	Posicionar o Brasil como exportador de catalisadores sustentáveis e <i>hub</i> regional de P&D, com instrumentos de política consolidados.	– Mercado brasileiro de catalisadores base TR superior a US\$ 500 milhões/ano, com >70% de conteúdo nacional em precursores. – Brasil figura entre os 10 maiores exportadores globais de catalisadores para biorrefino e H₂ verde. – Instrumentos de política industrial consolidados e em operação regular. – Hub regional de P&D e produção de catalisadores sustentáveis estabelecido.

Dimensão	Situação atual	Objetivo estratégico	Situação 2040
Regulação, sustentabilidade e economia circular	– Marco regulatório de emissões veiculares progressivo (Proconve L7/L8, P8), mas com lacunas em fiscalização e inspeção veicular. Regulação mineral em revisão (PNMCE em tramitação). – Ausência de padrões específicos de circularidade para catalisadores. Iniciativas de reciclagem de TR em estágio experimental. – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelecida, mas baixa implementação para resíduos industriais contendo TR.	Alinhar regulação a padrões internacionais, implementar logística reversa, certificação de sustentabilidade e rastreabilidade consolidada como diferencial competitivo da cadeia.	– Regulação brasileira de emissões convergente com padrões internacionais mais avançados. – PNMCE plenamente operacional, com instrumentos de incentivo e controle efetivos. – Inspeção veicular obrigatória implementada em >15 regiões metropolitanas. – Sistema de logística reversa operacional, recuperando >70% dos catalisadores automotivos e >90% dos catalisadores para FCC ao fim de vida. – Certificação de sustentabilidade e rastreabilidade consolidada como diferencial competitivo da cadeia.

6.7 Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Catalisadores à base de Terras Raras: 2026-2040

Em alinhamento com os direcionadores do Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de Terras Raras no Brasil: 2026–2040 (Capítulo 3), Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia de Catalisadores à base de Terras Raras estabelece, para o período 2026–2040, uma sequência de iniciativas interdependentes que combinam marcos regulatórios, decisões de investimento, avanços tecnológicos e qualificação de capacidades produtivas. Em cada horizonte criam-se os pré-requisitos técnicos, institucionais e industriais sem os quais as ações do horizonte seguinte não se viabilizam, o que confere às ações de curto prazo um caráter estratégico desproporcional ao seu horizonte temporal.

A trajetória estratégica 2026–2040 estrutura-se em três horizontes temporais complementares:

- **Horizonte 1 (H1) – Fundações institucionais e ativação dos primeiros elos da cadeia (2026–2030):** Estabelecimento das bases regulatórias e científicas, mobilização dos primeiros investimentos em infraestrutura catalítica e diagnóstico sistemático das lacunas críticas ao longo da cadeia produtiva.
- **Horizonte 2 (H2) – Escalonamento rumo à consolidação da cadeia de valor (2031–2035):** Transição da escala laboratorial para plantas-piloto e produção comercial; articulação entre produtores de precursores de terras raras, formuladores de catalisadores e setores usuários (refino, automotivo, química); consolidação de arranjos cooperativos empresa–ICT.
- **Horizonte 3 (H3) – Consolidação industrial e maior protagonismo internacional (2036–2040):** Operação plena da cadeia verticalizada, com oferta nacional de catalisadores de alto desempenho,

penetração em mercados externos de maior valor agregado e certificação internacional de rastreabilidade ambiental e social.

O horizonte 1 (H1), correspondente ao período de 2026 a 2030, concentra as decisões críticas que determinarão o posicionamento do Brasil na cadeia de catalisadores. Investimentos em infraestrutura, definição de marcos regulatórios e consolidação de competências técnicas são condicionantes para reduzir a dependência externa e estruturar capacidade competitiva nacional. Durante todo o H1, entretanto, o suprimento de precursores de lantânio (La) e cério (Ce) permanecerá integralmente dependente de importações, configurando uma vulnerabilidade estrutural a ser explicitamente considerada no desenho das estratégias e instrumentos de política pública (Quadro 6.5).

O horizonte 2 (H2) corresponde à conversão dessas bases em capacidade produtiva efetiva. A ênfase desloca-se da estruturação para a operacionalização, com foco no fechamento dos elos da cadeia, na superação dos gargalos de escalonamento entre as fases piloto e industrial e na consolidação de condições de competitividade técnica e econômica sustentável (Quadro 6.6).

O horizonte 3 (H3), de 2036 a 2040, projeta a consolidação do Brasil como produtor e exportador de catalisadores à base de terras raras com padrão internacional. Pressupõe não apenas a autossuficiência nos principais setores demandantes, mas também a inserção competitiva em mercados regionais e globais, com produtos certificados, rastreáveis e tecnologicamente diferenciados (Quadro 6.7).

*Quadro 6.5: Mapa do Caminho Estratégico da cadeia produtiva de catalisadores à base de TR
Horizonte 1: Curto prazo (2026-2030)*

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Estrutura da cadeia e integração a montante	Concluir estudos de viabilidade técnico-econômica para implantação de planta industrial de separação de TR voltada a aplicações catalíticas (capacidade inicial: 1.000-2.000 t/ano de óxidos).	2026-2027	MME, CETEM, BNDES, empresas de mineração (CBMM, Serra Verde, outros), FCC S.A., Petrobras
	Mapear e caracterizar fluxos de TR na cadeia de catalisadores: concentrados disponíveis, precursores importados, catalisadores em uso e exauridos (inventário nacional).	2026-2027	MME, ANM, CETEM, universidades, associações setoriais
	Estruturar Grupo de Trabalho Interministerial (GT-Catalisadores de TR) para articular políticas de mineração, energia, indústria e meio ambiente aplicadas à cadeia.	2026	Casa Civil, MME, MDIC, MMA, MCTI
	Lançar linha de financiamento específica do BNDES (Fundo de Minerais Críticos) para projetos de separação, refino e aplicação de TR em catalisadores.	2027	BNDES, MME, MDIC
Segmentos de aplicação e competências tecnológicas	Ampliar capacidade instalada de produção de catalisadores Bio-FCC e expandir portfólio para novas feedstocks (óleos residuais, bio-óleos lignocelulósicos).	2026-2028	FCC S.A., Petrobras/CENPES, universidades parceiras

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	Desenvolver projeto-piloto de produção nacional de washcoats Ce-Zr-Y para catalisadores automotivos, com participação de ICTs e empresas do setor.	2027-2028	BASF, Umicore, INT, Unicamp, USP, BNDES
	Implantar planta-piloto de reforma catalítica de etanol para produção de H ₂ , utilizando catalisadores Ni-CeO ₂ -La ₂ O ₃ de desenvolvimento nacional.	2027-2028	INT/LACAT, UFRJ/NUCAT, EPE, empresas de energia, startups de H ₂
	Desenvolver rota laboratorial otimizada de recuperação de La e Ce de catalisadores FCC exauridos, com validação em escala de bancada.	2026-2028	CETEM, UFRJ, Unicamp, FCC S.A., Petrobras
P&D, inovação e recursos humanos	Criar Rede Nacional de P,D&I em Catalisadores e TR, articulando os 25+ grupos de pesquisa mapeados, ICTs e empresas em plataforma colaborativa.	2027	MCTI, CNPq, FINEP, EMBRAPPII, Sociedade Brasileira de Catálise
	Lançar Chamada Pública de P&D (R\$ 30-50 milhões) voltada a catalisadores base TR para biorrefino, H ₂ verde e economia circular.	2027	FINEP, CNPq, FAPESP, FAPERJ, empresas (Lei do Bem, Lei de Informática)
	Modernizar infraestrutura laboratorial de caracterização de catalisadores em pelo menos 5 ICTs (microscopia eletrônica, difração, espectroscopia, testes catalíticos).	2026-2028	MCTI, FINEP, universidades, CETEM, INT
	Estabelecer programa de formação de recursos humanos em catálise heterogênea e TR, com bolsas específicas de mestrado/doutorado (meta: 50 bolsas/ano).	2027-2028	CAPES, CNPq, empresas via programas de P&D
	Promover workshop anual de integração universidade-empresa focado em catalisadores e TR (modelo: MATERIA, SBCat).	2027-2028	SBCat, INCT MATERIA, MME, MDIC, empresas
Mercado, inserção internacional e política industrial	Regulamentar e implementar a Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (PNMCE), incluindo TR e catalisadores como itens prioritários.	2026-2027	Congresso Nacional, MME, MDIC, Casa Civil
	Realizar estudo de mercado detalhado sobre demanda atual e projetada de catalisadores base TR no Brasil e América Latina (2026-2040).	2026-2027	MDIC, EPE, BNDES, consultorias especializadas, associações setoriais
	Estabelecer instrumento de preferência em compras públicas para catalisadores e precursores de TR com conteúdo nacional mínimo (piloto: Petrobras).	2027-2028	MDIC, MME, Petrobras, órgãos de controle
	Iniciar negociações para acordos de cooperação técnica com países líderes em	2027-2028	MRE, MCTI, MME, MDIC

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	separação de TR e catalisadores (EUA, Japão, UE, Austrália).		
Regulação, sustentabilidade e economia circular	Elaborar diagnóstico nacional sobre geração, destino e potencial de recuperação de catalisadores exauridos contendo TR (FCC, automotivos).	2026-2028	MMA, ANM, IBAMA, universidades, empresas geradoras
	Revisar e atualizar normas técnicas da ABNT para especificação, uso e descarte de catalisadores industriais e automotivos contendo TR.	2027-2030	ABNT, MMA, MDIC, CONAMA, empresas do setor
	Desenvolver piloto de logística reversa para catalisadores automotivos em duas regiões metropolitanas (São Paulo e Rio de Janeiro).	2027-2030	MMA, SINIR, prefeituras, montadoras, fabricantes de catalisadores
	Estabelecer grupo técnico para alinhamento regulatório entre Proconve e padrões internacionais (Euro 7, China VI), com <i>roadmap</i> de convergência até 2035.	2026-2028	IBAMA, CONAMA, CETESB, MDIC, montadoras, fabricantes de catalisadores
	Capacitar equipes do IBAMA, CETESB e órgãos estaduais de meio ambiente em fiscalização de emissões veiculares e inspeção de catalisadores.	2027-2030	IBAMA, CETESB, órgãos estaduais de meio ambiente, fabricantes

Quadro 6.6: Roadmap Estratégico da cadeia produtiva de catalisadores à base de TR
Horizonte 2: Médio prazo (2031-2035)

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Estrutura da cadeia e integração a montante	Iniciar operação da primeira planta industrial de separação e refino de TR para aplicações catalíticas (capacidade: 1.000-2.000 t/ano de óxidos).	2031-2032	Consórcio empresarial (mineradoras, FCC S.A., investidores), BNDES, MME
	Estabelecer contratos de fornecimento de longo prazo entre produtores de óxidos de TR e fabricantes de catalisadores (take-or-pay).	2031-2032	Produtores de TR, FCC S.A., BASF, Umicore, Petrobras
	Expandir capacidade de separação para 3.000-5.000 t/ano de óxidos, incorporando rotas de menor impacto ambiental (extração com líquidos iônicos, bio-solventes).	2032-2034	Operadores de plantas, CETEM, universidades, BNDES
	Implantar sistema digital de rastreabilidade de TR da mina ao catalisador (blockchain ou equivalente), com certificação de origem e sustentabilidade.	2031-2033	ANM, MME, empresas da cadeia, MCTI, startups de tecnologia

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Segmentos de aplicação e competências tecnológicas	Implantar sistema digital de rastreabilidade de TR da mina ao catalisador (<i>blockchain</i> ou equivalente), com certificação de origem e sustentabilidade.	2031-2033	ANM, MME, empresas da cadeia, MCTI, startups de tecnologia
	Consolidar produção comercial de washcoats Ce-Zr-Y nacionais, atendendo pelo menos 30% da demanda interna de catalisadores automotivos.	2031-2033	BASF, Umicore, startups, ICTs parceiras
	Escalar produção de catalisadores para H ₂ verde: implantar pelo menos 2 plantas industriais de reforma catalítica (etanol/metano) com catalisadores nacionais.	2031-2032	Empresas de energia, startups de H ₂ , INT, UFRJ, EPE, BNDES
	Iniciar operação comercial de rota de recuperação de La e Ce de catalisadores FCC exauridos (capacidade-alvo: recuperação de >500 t/ano de óxidos).	2032-2034	FCC S.A., Petrobras, operadores especializados em reciclagem, CETEM
	Desenvolver e validar catalisadores nacionais para aplicações emergentes: fotocatalise (tratamento de efluentes), redução catalítica seletiva (SCR diesel), células SOFC.	2031-2034	Universidades, ICTs, startups, empresas de saneamento e energia
P&D, inovação e recursos humanos	Implantar Centro de Referência Nacional em Catálise e TR com infraestrutura compartilhada de escala piloto, caracterização avançada e modelagem computacional.	2031-2032	MCTI, FINEP, BNDES, consórcio de universidades e ICTs, empresas
	Aumentar depósitos de patentes brasileiras em catalisadores base TR para >20/ano, com foco em Bio-FCC, H ₂ verde e reciclagem.	2031-2035	Universidades, ICTs, empresas, INPI, escritórios de propriedade intelectual
	Incorporar <i>design</i> computacional e IA para desenvolvimento de catalisadores em pelo menos 5 grupos de pesquisa (DFT, machine learning, <i>screening</i> virtual).	2031-2035	USP, Unicamp, UFRJ, UFSC, INT, empresas de tecnologia
	Formar cumulativamente >150 mestres/doutores especializados em catálise heterogênea, TR e economia circular.	2031-2035	CAPES, CNPq, universidades, programas de pós-graduação
	Apoiar criação e consolidação de pelo menos 3 <i>startups</i> de base tecnológica em catalisadores funcionais, suportes avançados e reciclagem de TR.	2031-2035	FINEP, BNDES (BNDES Garagem), EMBRAPPII, aceleradoras, universidades

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Mercado, inserção internacional e política industrial	Ampliar mercado interno de catalisadores base TR para US\$ 250-350 milhões/ano, com participação crescente de conteúdo nacional.	2031-2035	Empresas do setor, políticas de conteúdo local, compras públicas
	Iniciar exportações regulares de catalisadores sustentáveis (Bio-FCC, H ₂ verde) para países da América Latina (meta: >US\$ 20 mi/ano até 2034).	2032-2034	FCC S.A., empresas nacionais, APEX-Brasil, MDIC
	Atrair pelo menos um grande fabricante global de catalisadores para estabelecer centro de P&D ou unidade produtiva no Brasil.	2032-2034	MDIC, estados (incentivos fiscais), BNDES, empresas-alvo
	Implementar instrumento de financiamento subsidiado para aquisição de catalisadores com conteúdo nacional de TR >40% (linhas BNDES, FINEP).	2031-2033	BNDES, FINEP, MME, MDIC
	Ampliar mercado interno de catalisadores base TR para US\$ 250-350 milhões/ano, com participação crescente de conteúdo nacional.	2031-2035	Empresas do setor, políticas de conteúdo local, compras públicas
Regulação, sustentabilidade e economia circular	Implementar programa nacional de inspeção e manutenção veicular obrigatória (I/M) com foco em catalisadores em pelo menos 10 regiões metropolitanas.	2031-2033	IBAMA, CONAMA, CETESB, Detrans estaduais, prefeituras
	Operacionalizar sistema de logística reversa para catalisadores automotivos em escala nacional, com meta de recuperação de >50% dos catalisadores ao fim de vida.	2031-2034	MMA, SINIR, montadoras, fabricantes de catalisadores, sucateiros credenciados
	Estabelecer acordo setorial para logística reversa de catalisadores FCC exauridos, com meta de recuperação de >80%.	2031-2034	MMA, Petrobras, FCC S.A., empresas de reciclagem
	Desenvolver e publicar metodologia nacional de avaliação de ciclo de vida (LCA) e ciclo de vida social (S-LCA) para catalisadores à base TR.	2031-2033	Universidades, IBICT, ABNT, empresas, MCTI
	Alinhar progressivamente regulação de emissões veiculares (PROCONVE) ao Euro 7,	2032-2034	IBAMA, CONAMA, MDIC, montadoras, fabricantes de catalisadores

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	com <i>roadmap</i> de convergência publicado e consulta pública realizada.		

Quadro 6.7: Mapa do Caminho Estratégico da cadeia produtiva de catalisadores à base de TR
Horizonte 3: Longo prazo (2036-2040)

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Estrutura da cadeia e integração a montante	Alcançar capacidade instalada de separação e refino de TR para usos catalíticos >5.000 t/ano de óxidos, atendendo >60% da demanda nacional.	2036-2040	Consórcios empresariais, operadores de plantas, BNDES
	Consolidar cadeia integrada da mina ao catalisador, com >70% de fornecimento doméstico de precursores para catalisadores FCC, automotivos e H ₂ .	2036-2040	Toda a cadeia produtiva, MME, MDIC
	Estabelecer o Brasil como exportador de óxidos de TR de alta pureza para aplicações catalíticas na América Latina (meta: >US\$ 30 mi/ano).	2037-2040	Produtores de TR, APEX-Brasil, MDIC
	Operar sistema de rastreabilidade digital plenamente funcional, com certificação ESG reconhecida internacionalmente e adotada por >80% da cadeia.	2036-2040	Empresas da cadeia, órgãos reguladores, certificadoras internacionais
Segmentos de aplicação e competências tecnológicas	Consolidar liderança regional em catalisadores para Bio-FCC e biorrefino, com reconhecimento internacional e participação em >50% das novas unidades na América Latina.	2036-2040	FCC S.A., Petrobras, empresas internacionais parceiras
	Produção nacional de washcoats e suportes avançados atende >50% da demanda interna de catalisadores automotivos.	2036-2040	BASF, Umicore, empresas nacionais, startups consolidadas
	Operar pelo menos 3 plantas industriais de H ₂ verde via reforma catalítica com catalisadores nacionais base TR (capacidade total >10.000 t H ₂ /ano).	2036-2040	Empresas de energia, operadores de H ₂ , EPE
	Recuperação de TR de catalisadores exauridos (FCC + automotivos) consolidada como fonte secundária, representando >15% da oferta doméstica de La e Ce.	2036-2040	Operadores de reciclagem, FCC S.A., Petrobras, empresas especializadas
	Desenvolver e comercializar catalisadores nacionais para pelo menos 2 aplicações emergentes de alto valor (exemplo: fotocatalise, células SOFC, processos químicos avançados).	2036-2040	Startups, empresas, universidades, ICTs

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
PD&I, inovação e recursos humanos	Portfólio brasileiro de patentes em catalisadores base TR superior a 200 documentos, com pelo menos 10% de patentes licenciadas ou em uso comercial.	2036-2040	Universidades, ICTs, empresas, INPI
	Centro de Referência Nacional em Catálise operando em regime pleno, com >20 projetos cooperativos empresa-ICT anuais e infraestrutura aberta.	2036-2040	MCTI, consórcio de ICTs e empresas, agências de fomento
	Formação anual de >50 profissionais especializados (mestrado/doutorado) em catálise heterogênea, TR e economia circular.	2036-2040	CAPES, CNPq, universidades, empresas via P&D
	Consolidar pelo menos 5 grupos de pesquisa com competência plena em design computacional de catalisadores (IA, machine learning, DFT), com publicações de alto impacto.	2036-2040	USP, Unicamp, UFRJ, UFSC, INT, empresas de tecnologia
	Pelo menos 5 <i>startups</i> de base tecnológica operando comercialmente em catalisadores funcionais, suportes, reciclagem e serviços especializados.	2036-2040	Ecosistema de inovação, FINEP, BNDES, aceleradoras, universidades
Mercado, inserção internacional e política industrial	Mercado brasileiro de catalisadores base TR superior a US\$ 500 milhões/ano, com >70% de conteúdo nacional em precursores de TR.	2036-2040	Empresas da cadeia, políticas públicas consolidadas
	Brasil figura entre os 10 maiores exportadores globais de catalisadores para biorrefino e H ₂ verde (exportações >US\$ 50 mi/ano).	2037-2040	FCC S.A., empresas nacionais, APEX-Brasil, MDIC
	Hub regional de P&D e produção de catalisadores sustentáveis estabelecido, atraindo investimentos de >US\$ 200 milhões e gerando >500 empregos diretos qualificados.	2036-2040	Governos federal e estaduais, empresas, universidades, investidores
	Instrumentos de política industrial (PNMCE, conteúdo local, compras públicas, financiamento subsidiado) consolidados e em operação regular, com avaliação periódica de impacto.	2036-2040	MME, MDIC, BNDES, órgãos de controle, entidades setoriais

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Regulação, sustentabilidade e economia circular	Instrumentos de política industrial (PNMCE, conteúdo local, compras públicas, financiamento subsidiado) consolidados e em operação regular, com avaliação periódica de impacto.	2036-2040	MME, MDIC, BNDES, órgãos de controle, entidades setoriais
	Regulação brasileira de emissões veiculares convergente ao Euro 7, com limites harmonizados para NOx, CO, MP e testes RDE obrigatórios.	2036-2038	IBAMA, CONAMA, MDIC, montadoras, fabricantes de catalisadores
	Inspeção veicular obrigatória (I/M) implementada em >15 regiões metropolitanas, com controle efetivo de catalisadores e redução mensurável de emissões urbanas.	2036-2040	IBAMA, órgãos estaduais, prefeituras, Detrans
	Sistema de logística reversa operacional para catalisadores automotivos e FCC, recuperando >70% dos automotivos e >90% dos FCC ao fim de vida.	2036-2040	MMA, SINIR, empresas da cadeia, operadores de reciclagem
	Certificação de sustentabilidade e rastreabilidade ESG consolidada como diferencial competitivo da cadeia brasileira, adotada por >90% dos produtores e exportadores.	2037-2040	Empresas, certificadoras, associações setoriais, compradores internacionais
	Publicação de inventário nacional de emissões evitadas e recursos recuperados pela cadeia de catalisadores base TR (métrica de impacto ambiental e circular consolidada).	2038-2040	MCTI, MMA, universidades, empresas, IBGE

Quadro 6.8: Síntese do Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Catalisadores à base de TR: Metas estratégicas por horizonte

Dimensão	Objetivo estratégico	Metas estratégicas		
		H1 – Fundações institucionais e ativação dos primeiros elos da cadeia (2026-2030)	H2 – Escalonamento rumo à consolidação da cadeia de valor (2031-2035)	H3 – Consolidação e inserção internacional (2036-2040)
Estrutura da cadeia e integração a montante	Construir cadeia integrada da mina ao catalisador, com fornecimento doméstico de precursores de TR de alta pureza	Estudos de viabilidade e GT interministerial. Mapeamento de fluxos de TR. Lançamento de financiamento BNDES. Inventário nacional de TR na cadeia de catalisadores.	Operação da 1ª planta industrial de separação (1.000-2.000 t/ano). Contratos de fornecimento de longo prazo. Expansão para 3.000-5.000 t/ano. Rastreabilidade digital (blockchain).	Capacidade >5.000 t/ano de óxidos. Fornecimento doméstico atende >60% da demanda. Exportação de óxidos para América Latina. Certificação ESG reconhecida internacionalmente.
Segmentos de aplicação e competências tecnológicas	Consolidar liderança em Bio-FCC, desenvolver washcoats nacionais, escalar H ₂ verde catalítico, estabelecer reciclagem comercial	Ampliação de Bio-FCC (novas feedstocks). Projeto-piloto washcoats Ce-Zr-Y. Planta-piloto H ₂ (etanol). Rota laboratorial recuperação La/Ce.	Produção comercial washcoats (30% mercado). 2 plantas industriais H ₂ verde. Recuperação comercial La/Ce (>500 t/ano óxidos). Validação catalisadores emergentes (fotocatálise, SCR, SOFC).	Liderança regional Bio-FCC (>50% novas unidades AL). Washcoats nacionais atendem >50% demanda interna. 3+ plantas H ₂ verde (>10.000 t H ₂ /ano). Reciclagem: >15% oferta doméstica La/Ce. 2 aplicações emergentes comercializadas.
P&D, inovação e recursos humanos	Criar ecossistema robusto de inovação com proteção patentária, infraestrutura compartilhada, formação de RH e startups de base tecnológica	Rede Nacional P,D&I (25+ grupos). Chamada pública R\$ 30-50 mi. Modernização de 5 ICTs. 50 bolsas/ano mestrado/doutorado. Workshop anual universidade-empresa.	Centro de Referência Nacional operacional. >20 patentes/ano. Design computacional (IA) em 5 grupos. >150 mestres/doutores formados. 3 startups criadas.	Portfólio >200 patentes (10% licenciadas). Centro em regime pleno (>20 projetos/ano). Formação: >50 profissionais/ano. 5 grupos com design computacional consolidado. 5 startups operando comercialmente.
Mercado, inserção internacional e política industrial	Posicionar Brasil como exportador de catalisadores sustentáveis e hub regional de P&D, com instrumentos de política consolidados	Regulamentação PNMCE. Estudo de mercado 2026-2040. Preferência em compras públicas (piloto Petrobras). Negociação acordos internacionais.	Mercado US\$ 250-350 mi/ano. Exportações >US\$ 20 mi/ano (AL). Atração de 1 fabricante global (P&D). Financiamento subsidiado (conteúdo nacional >40%).	Mercado >US\$ 500 mi/ano (>70% conteúdo nacional). Exportações >US\$ 50 mi/ano. Top 10 exportadores globais (biorrefino/H ₂). Hub regional: >US\$ 200 mi investidos, >500 empregos.
Regulação, sustentabilidade e economia circular	Alinhar regulação a padrões internacionais, implementar logística reversa e certificação ESG como diferencial competitivo	Diagnóstico de catalisadores exauridos. Atualização normas ABNT. Piloto de logística reversa (SP/RJ). GT alinhamento PROCONVE-Euro 7. Capacitação fiscalização.	I/M veicular em 10 regiões metropolitanas. Logística reversa automotivos nacional (>50% recuperação). Acordo setorial FCC (>80% recuperação). Metodologia LCA/S-LCA publicada. Roadmap Proconve-Euro 7 publicado.	Regulação convergente Euro 7 (2036-2038). I/M em >15 regiões. Logística reversa: >70% automotivos, >90% FCC recuperados. Certificação ESG: >90% da cadeia. Inventário nacional de impacto ambiental publicado.

6.8 Considerações

A análise apresentada neste capítulo revela um cenário de oportunidade histórica para o Brasil no desenvolvimento de uma cadeia produtiva de catalisadores à base de TR soberana, competitiva e sustentável. A Petrobras representa um importante demandante e potencial articulador da cadeia, juntamente com outros atores industriais e tecnológicos. O País possui os ativos fundamentais: as segundas maiores reservas mundiais de TR, uma empresa de classe mundial (FCC S.A.) com pleno domínio da tecnologia de catalisadores para FCC e o pioneirismo em biorrefinarias, além de grupos de pesquisa de excelência em catálise e uma demanda interna crescente e diversificada.

Ao mesmo tempo, a situação atual revela fragilidades que, se não superadas com urgência, ameaçam perpetuar o Brasil no papel de exportador de minério bruto e importador de produtos de alto valor agregado. A ausência de plantas industriais de separação e refino de TR é o gargalo mais crítico e urgente a ser endereçado. O investimento necessário para equacioná-lo, estimado entre US\$ 300 e 500 milhões para uma primeira planta industrial de referência, é modesto diante do potencial econômico e estratégico que desbloqueia.

O horizonte de 2040 se aproxima com rapidez. Para que o Brasil consolide uma posição competitiva na cadeia global dos catalisadores à base de TR, é essencial o investimento contínuo em infraestrutura de separação e refino, em pesquisa de ponta e na formação de capital humano. O período entre 2026 e 2028 pode definir a direção e a intensidade dessa trajetória. As decisões tomadas nesse intervalo não representam apenas estratégias industriais, mas o alinhamento do país com uma economia cada vez mais pautada pela inovação e pela descarbonização. O potencial está presente, cabe transformá-lo em resultado por meio de planejamento, coordenação e visão de longo prazo.

Dos catalisadores, segmento de mercado de massa com ancoragem industrial, o documento avança para os fósforos, que reúnem aplicações de iluminação geral (LEDs), *displays*, instrumentação biomédica e segurança documental. A lógica setorial muda: trata-se de mercado fragmentado em subsegmentos de perfis estratégicos heterogêneos, exigindo entrada seletiva em vez de cobertura horizontal.

Capítulo 7

Cadeia produtiva de ligas metálicas portadoras de terras raras no Brasil

Este capítulo apresenta uma análise da cadeia produtiva das ligas metálicas à base de terras raras, com destaque para seus principais usos e para as rotas tecnológicas associadas à sua produção. Em seguida, discute-se o estágio atual desta competência no Brasil como etapa da cadeia produtiva, particularmente a partir da obtenção de óxidos de alta pureza até a fabricação de ligas metálicas para consumo em outras rotas de produção. Com base nesse panorama, são delineados os direcionadores e a visão de futuro para o desenvolvimento da produção de ligas metálicas no país, considerando o horizonte de 2040.

7.1 Importância estratégica da aplicação para o País¹²

As ligas metálicas portadoras de elementos terras raras apresentam diversas aplicações industriais, variando desde usos tradicionais na metalurgia até tecnologias emergentes associadas à transição energética. Entre as aplicações de menor complexidade tecnológica, destaca-se o uso de ligas ricas em terras raras leves, particularmente contendo cério (Ce) e lantânio (La), também denominadas de ligas *mischmetal*. Essas ligas são produzidas a partir da redução eletrolítica de haletos ou óxidos de terras raras e apresentam composição predominantemente formada por cério, lantânio, neodímio e praseodímio.

Historicamente, o *mischmetal* foi amplamente utilizado em ligas pirofóricas empregadas em dispositivos de ignição, como as pedras de isqueiro (Figura 7.1), devido à elevada reatividade do cério. Atualmente, sua utilização concentra-se principalmente como aditivo metalúrgico na produção de ligas ferrosas e não ferrosas. Pequenas adições desses elementos atuam na modificação de inclusões, no refino de grão e na melhoria de propriedades mecânicas e de resistência à oxidação em metais como o ferro fundido, ligas de alumínio, magnésio e níquel. Embora essas aplicações sejam importantes para o aproveitamento de elementos mais abundantes da cadeia, como o cério e o lantânio, elas apresentam menor relevância estratégica e tecnológica quando comparadas a outras aplicações das terras raras.

¹² A metodologia de levantamento patentário na base Derwent Innovations Index é a mesma descrita em detalhe no Capítulo 5 (Seção 5.3). Aqui registramos apenas as adaptações específicas para esta cadeia, quando aplicáveis.



Figura 7.1 Aplicação de Mischmetal em pedras de isqueiro.

Outro campo de aplicação de ligas portadoras desses elementos envolve os compostos intermetálicos capazes de armazenar hidrogênio de forma reversível, permitindo aplicações em dispositivos eletroquímicos e em sistemas de energia renovável. Essas são ligas à base de lantânio e níquel, do sistema LaNi_5 , e são amplamente estudadas e utilizadas em baterias de hidreto metálico de níquel (NiMH) (Figura 2).



Figura 7.2 Bateria automotiva do tipo NiMH

Um dos usos mais comuns dessas baterias era na indústria automotiva e eletrônica, embora tenham perdido parte de sua participação no mercado de aplicações automotivas para baterias de íons de lítio. No entanto, com mudanças recentes na indústria fabril e automotiva, com crescimento das tecnologias elétricas e híbridas, o mercado de baterias de NiMH tem se tornado mais relevante. A receita do mercado global dessas baterias foi avaliada em US\$ 2,5 bilhões em 2024 e estima-se que atinja US\$ 4,5 bilhões até

2033 (VERIFIED MARKET RESEARCH, 2025). Além da adaptação da indústria para tecnologias mais sustentáveis, incluindo sistemas híbridos, há elevada demanda dessas baterias para ampliação de sistemas de armazenamento de energia, com destaque em aplicações estacionárias em sistemas de energia renovável, telecomunicações e em data centers. Embora as baterias NiMH continuem relevantes em aplicações específicas, a dinâmica recente do mercado global tem sido liderada pelas tecnologias baseadas em lítio.

Entre outras aplicações emergentes, destacam-se as ligas magnetocalóricas, utilizadas em tecnologias de refrigeração magnética. Estes sistemas, como à base de La-Fe-Si ou ligas contendo gadolínio, apresentam variações de temperatura quando submetidos a campos magnéticos variáveis. Isto possibilita ciclos de refrigeração potencialmente mais eficientes e ambientalmente sustentáveis do que os sistemas convencionais baseados em gases refrigerantes. Embora ainda se encontrem majoritariamente em fase de desenvolvimento tecnológico, laboratorial ou escala piloto no país, os processos de fabricação e propriedades destas ligas têm sido investigados como alternativas promissoras e estratégicas para aplicações futuras em refrigeração industrial e doméstica.

Já as aplicações mais relevantes do ponto de vista tecnológico e econômico concentram-se nas ligas utilizadas na produção de ímãs permanentes de alto desempenho (Figura 7.3). Somente estes produtos representaram 40–48% do consumo mundial de terras raras em 2023 (NATURAL RESOURCES CANADA, 2024), e compuseram 70–80% da demanda das ligas metálicas de terras raras (Nkiawete et al., 2025). Sistemas compostos de Nd-Fe-B ou Sm-Co constituem atualmente a principal aplicação de terras raras metálicas e suas ligas, sendo amplamente empregados em motores elétricos, geradores, sensores e diversos dispositivos eletromecânicos. Esses ímãs, por seu elevado desempenho, permitem o desenvolvimento de equipamentos mais compactos e eficientes, o que explica sua importância em setores estratégicos como na mobilidade elétrica, geração eólica, automação industrial e em eletrônica avançada.



Figura 7.3 Ímãs à base de Nd-Fe-B.

As recorrentes ações para transição energética, com impactos na economia e na expansão das tecnologias de geração de energia renovável, têm ampliado significativamente a demanda por essas ligas para produção de ímãs, consolidando os ímãs como a aplicação de maior valor estratégico na cadeia produtiva de terras raras. A produção de ligas metálicas portadoras de terras raras constitui um mercado global estimado em cerca de US\$ 19 bilhões em 2025, com projeção de atingir aproximadamente US\$ 36,7

bilhões até 2034, refletindo crescimento anual de aproximadamente 7,6%, impulsionado principalmente pela expansão da mobilidade elétrica e da geração renovável (GLOBAL MARKET INSIGHTS, 2025).

No contexto nacional, é predominante a atividade de importação dessas ligas. Os dados de comércio exterior indicam que as importações brasileiras de metais de terras raras, classificados na NCM 2805.30, atingiram aproximadamente 59 toneladas em 2024, com predominância de fornecedores asiáticos, especialmente da China (Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços, 2026). Estes dados são inferiores se comparados às importações de ímãs de terras raras (aproximadamente 1000 toneladas), reflexo de que o Brasil hoje é majoritariamente importador desses produtos já manufaturados. Assim, o domínio das tecnologias associadas à produção desses metais e ligas portadores de TRs representa um elo central para a expansão da indústria brasileira em segmentos de alto valor agregado e para o fortalecimento da cadeia nacional de terras raras.

7.2 Cadeia produtiva de ligas metálicas portadoras de terras raras

A Figura 7.4 apresenta uma representação esquemática da cadeia produtiva de ligas metálicas portadoras de terras raras. Destacam-se as etapas relevantes da transformação dos óxidos purificados em ligas metálicas destinadas geralmente como insumos para a indústria de manufatura. Entretanto, os processos relativos à fabricação de ligas é o de redução dos compostos de terras raras e da subsequente produção das ligas metálicas ou intermetálicas.

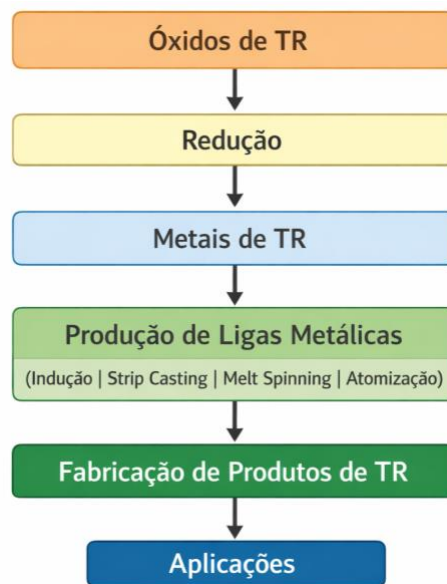


Figura 7.4 Etapas da Cadeia Produtiva para Fabricação de Ligas Metálicas de TRs.

A etapa de redução corresponde à conversão dos óxidos de terras raras em metais, geralmente por processos eletroquímicos em sais fundidos. A partir da obtenção do metal, inicia-se a etapa de produção das ligas metálicas, que consiste na combinação controlada das terras raras com outros elementos como ferro, níquel, alumínio, magnésio, silício ou boro, dependendo da aplicação final. Essa etapa pode ser

realizada por diferentes rotas, incluindo fusão convencional em fornos a indução a vácuo, solidificação rápida por lingotamento em tiras, solidificação rápida por *melt spinning*, além de processos de atomização. Destas, umas das mais relevantes para o atual contexto nacional se refere à solidificação rápida por lingotamento em tiras, por ser o processo hoje mais recomendado na fabricação de ligas com destino relacionado à manufatura de ímãs, além de servir como processo para fabricação de ligas destinadas a outras aplicações (GUTFLEISCH, O. et al., 2011). Esta técnica apresenta entre suas vantagens o resfriamento rápido durante a fase de solidificação, o que impede a formação de fases indesejadas nas ligas portadoras de TRs, otimizando etapas e processos na cadeia de produção de ímãs.

Além das técnicas citadas, rotas metalotérmicas específicas, como de redução calciotérmica, são também destacadas como tecnologias potenciais para indústria de ligas portadoras de TRs. Esta é utilizada para a obtenção de ligas intermetálicas a partir de óxidos dos elementos metálicos precursores. No caso da redução calciotérmica, o cálcio metálico é adicionado para atuar como agente redutor. Os óxidos de terras raras e demais elementos de liga são convertidos em metais por meio de reações em alta temperatura. O resultado é a formação de compostos de terras raras e de óxidos de cálcio como subproduto, sendo posteriormente necessário realizar etapas de separação e purificação para obtenção da liga metálica utilizável para ímãs ou outras aplicações.

Do ponto de vista industrial, a redução calciotérmica tem sido historicamente empregada na produção de determinados metais de terras raras e ligas intermetálicas. Essa rota é particularmente mais relevante em sistemas específicos de ligas, como para ímãs Sm-Co e Sm-Fe, além de outros sistemas de La-Fe-Si usados para refrigeração. Como a redução calciotérmica pode ser conduzida diretamente na presença de outros elementos metálicos, induzindo à formação simultânea de ligas em sua composição final desejada, isto pode simplificar etapas subsequentes do processo produtivo.

Apesar de sua aplicabilidade, a redução calciotérmica apresenta limitações em termos de escalabilidade produtiva, especialmente quando comparada às rotas eletroquímicas que hoje predominam na produção em larga escala de ligas à base de elementos terras-raras. Ainda assim, essa rota mantém relevância tecnológica em nichos específicos, além de representar uma alternativa potencial em contextos em que se busca maior flexibilidade de processos, em projetos de desenvolvimento tecnológico ou integração com etapas de síntese de ligas. Nesse sentido, a redução calciotérmica pode ser considerada uma rota complementar dentro da cadeia produtiva de ligas metálicas portadoras de terras raras, com aplicação mais direcionada e menos difundida em escala industrial global.

No contexto da fabricação de ligas por rotas eletroquímicas ou vias metalotérmicas, a produção de ligas metálicas constitui um elo intermediário de elevada relevância estratégica na cadeia de valor das terras raras, pois representa o primeiro estágio de transformação dos metais em insumos industriais de maior valor agregado. O domínio tecnológico dessa etapa da cadeia permite ampliar significativamente a agregação de valor aos recursos minerais e pode reduzir a dependência em relação à exportação de concentrados ou óxidos de terras raras, abrindo novos mercados internos e externos para insumos e produtos acabados.

Dando continuidade ao panorama acerca das tecnologias de produção de terras raras, focando agora nas ligas metálicas portadoras desses elementos, realizou-se um levantamento de patentes para estas etapas. Buscou-se complementar a análise das etapas subsequentes associadas à produção de ímãs permanentes.

Os objetivos incluem a identificação de tendências, áreas e locais de maior concentração de inovação, além de indicar os principais agentes nessa etapa da cadeia.

Este levantamento foi conduzido a partir da base de patentes Derwent Innovations Index. Adotou-se como estratégia de busca: palavras-chave, códigos de classificação tecnológica e recortes temporais pertinentes ao escopo do estudo. Os dados são apresentados no Quadro 7.1.

Quadro 7.1 Estratégia de busca adotada no levantamento de patentes referentes a ligas portadoras de elementos terras raras

Referência	Busca	Resultados
#1	"rare earth*"	78221
#2	"casting"	345292
#3	"alloy*"	530437
#4	"magnet*"	1282790
#5	"rare earth*" AND "casting"	6025
#6	"rare earth*" AND "alloy*"	16415
#7	"rare earth*" AND "magnet*"	12213
#8	"rare earth casting"	20
#9	"rare earth alloy*"	1705
#10	"rare earth casting" OR "rare earth alloy*" OR ("rare earth*" AND "casting") OR ("rare earth*" AND "alloy*") OR ("rare earth*" AND "magnet*")	27092

Fonte: Estratégia de busca na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 02 de abril de 2026.

Identificaram-se 27092 patentes no período de 2015 a 2025 (#10), que foram classificadas por ano, proprietário e código ICP. A Figura 7.5 mostra a evolução anual das patentes referentes às ligas portadoras de TRs. O Quadro 7.2 mostra os principais proprietários (critério top 20) destas patentes selecionadas.

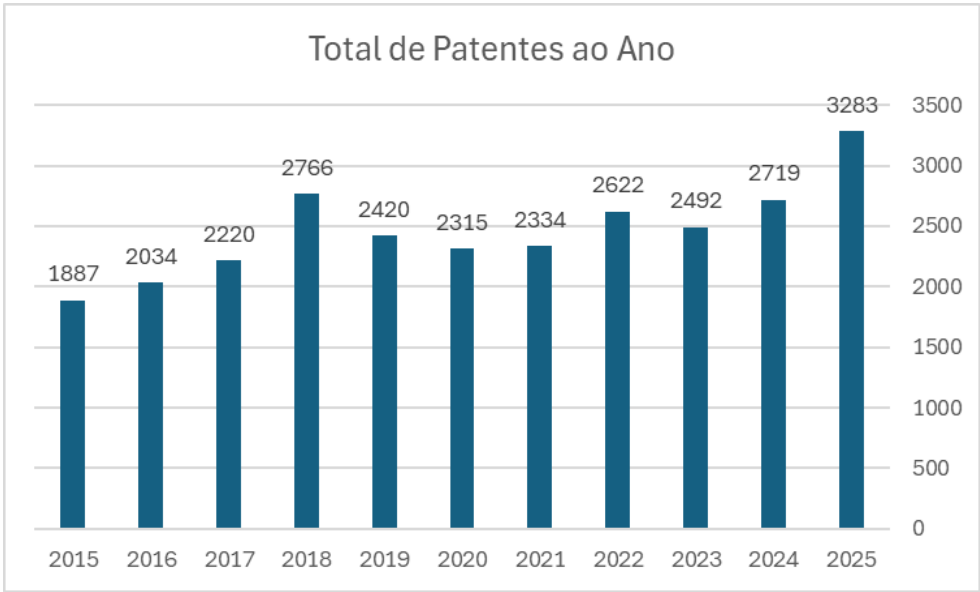


Figura 7.5 Evolução das patentes referentes a ligas portadoras de elementos terras raras

Fonte: Busca direta na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 02 de abril de 2026.

Quadro 7.2. Proprietários de patentes referentes a ligas portadoras de elementos terras raras: 2015-2025

Proprietário	Total
Baotou Iron Steel Group Co Ltd	410
Tdk Corp	302
Nippon Steel Corp	255
Hitachi Metals Ltd	233
Univ Cent South	221
Univ Shanghai Jiaotong	203
Univ Beijing Sci Technology	184
Univ Jiangxi Sci Technology	167
Jfe Steel Corp	162
Ningbo Inst Materials Technology Eng C	161

Proprietário	Total
Proterial Ltd	143
Inst Metal Res Chinese Acad Sci	136
Xiamen Tungsten Co Ltd	127
Baotou Res Inst Rare Earth	126
Univ Beijing Technology	124
Univ Inner Mongolia Sci Technology	123
Cent Iron Steel Res Inst	121
Fujian Changting Golden Dragon Rare Eart	121
Toyota Jidosha Kk	121
Univ Northeastern China	107

O Quadro 7.2 tem como indicativo que a líder em patentes relacionadas às ligas portadoras de TRs é a Baotou Iron Steel Group Co Ltd, sediada na China, com 410 patentes. A maioria das empresas e instituições proprietárias de patentes referentes a ligas portadoras de TRs tem origem na China e no Japão neste período de 2015 a 2025.

Na sequência, o Quadro 7.3 mostra os resultados da análise das 27092 patentes, classificadas segundo as subclasses e respectivos códigos da *International Patent Classification* (ICP), indicando os dez códigos mais registrados para estas patentes.

Quadro 7.3 Patentes referentes a ligas portadoras de terras raras, classificadas por subclasses e respectivos códigos da ICP: 2015-2025 (critério top 10)

TOP 10 classificações	Total	Porcentagem
H01f-041/02	3448	18%
H01f-001/057	2597	14%
C22c-038/02	2018	11%
C22c-001/03	2014	11%

TOP 10 classificações	Total	Porcentagem
C22c-038/00	1860	10%
C22c-038/04	1834	10%
C22c-001/02	1748	9%
C22c-038/06	1435	8%
B22f-001/00	1117	6%
C22c-021/00	975	5%

Na análise das patentes pelo código da ICP, constatou-se que as subclasses ICP de maior representatividade pertencem ao grupo H01F, relativo a ímãs; indutâncias; transformadores; seleção de materiais por suas propriedades magnéticas. O grupo C22C, de ligas também possui alta relevância neste conjunto de patentes. Engenharia foi a área de conhecimento também mais representativa para a temática.

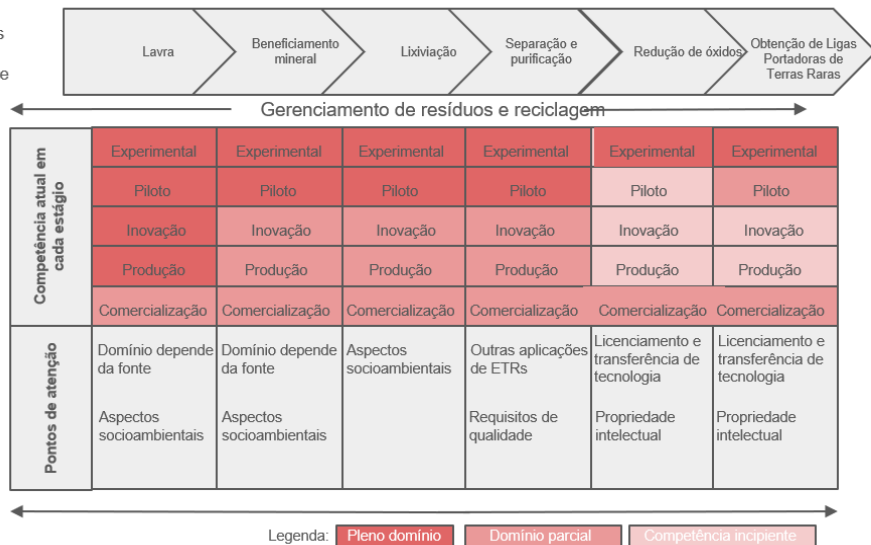
A análise do período de 2015-2025 com as patentes que apresentam o desenvolvimento tecnológico de ligas portadoras de TRs revela o amplo domínio tecnológico da China e do Japão. Esses países são importantes atores da cadeia de ligas, bem como de demais etapas do ciclo de fabricação de produtos de terras raras. No contexto nacional, o domínio dessa etapa mediante patenteamento e atuação da indústria de ligas representaria um importante marco para a cadeia de terras raras, visando ampliar as possibilidades de valorização de recursos nacionais.

7.3 Competência atual associada à cadeia produtiva de ligas metálicas

Na Figura 7.6 são identificadas as atuais competências brasileiras nos processos produtivos associados à cadeia produtiva de ligas metálicas portadoras de TRs. Destacam-se, no esquema a seguir, além do grau de domínio em cada etapa da cadeia, os pontos de atenção que deverão ser considerados na construção do roadmap estratégico da cadeia produtiva de ligas metálicas portadoras de TRs.

Jazidas e Atividade Mineral:

Ocorrências em Poços de Caldas, Araxá, Pitinga, Tapira, Salitre e outras regiões

**Usos Industriais:**

- Indústria aeroespacial
- Geração de energia nuclear
- Geração de energia eólica
- Transmissão de energia elétrica
- Aplicações em defesa
- Indústria automotiva
- Sistema de refrigeração magnética
- Eletrônicos de Consumo

Figura 7.6 Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva para Fabricação de Ligas Metálicas de TRs.

No contexto brasileiro, conforme mostrado, embora a produção industrial de ligas metálicas portadoras de terras raras ainda seja incipiente, o país apresenta condições favoráveis para o desenvolvimento dessa etapa da cadeia produtiva. O Brasil dispõe de indústria mineral e siderúrgica já relevante, com competências científicas consolidadas na área de materiais e metalurgia e de infraestrutura laboratorial e piloto voltada ao desenvolvimento de ligas de terras raras para aplicações estratégicas, como os ímãs.

Destacam-se, nesse contexto, iniciativas de pesquisa, estabelecimento e escalonamento da cadeia produtiva de ligas metálicas conduzidas por instituições científicas e tecnológicas, como o IPT e o SENAI, e por centros de inovação voltados à cadeia de terras raras como o CIT SENAI ITR. O interesse crescente de setores industriais consumidores desses insumos também funciona como impulsionador para identificação dos potenciais mercados internos e externos de fabricantes de motores elétricos, equipamentos eletromecânicos e sistemas de energia.

Do ponto de vista de escala industrial, algumas rotas de produção de ligas metálicas apresentam maior viabilidade de implementação no curto prazo. Tecnologias de resfriamento rápido como *strip casting*, associadas principalmente à cadeia de produção de ímãs de alto desempenho surge como alternativa principal para atender às aplicações de maior valor agregado. Já processos baseados em fusão por indução à vácuo poderiam ser aplicados a partir de infraestrutura metalúrgica já existente no país (como da indústria do titânio), permitindo a produção de ligas ricas em terras raras leves, como do tipo *mischmetal* e ligas intermediárias utilizadas como matéria-prima para etapas subsequentes de processamento.

Nesse sentido, a consolidação da capacidade nacional de produção de ligas metálicas portadoras de terras raras representa um passo fundamental para o fortalecimento da cadeia produtiva no Brasil. Essa etapa não apenas permite ampliar o aproveitamento das terras raras produzidas no país, como também estabelece o elo entre a indústria mineral com a de manufatura, agregando valor ao produto nacional e com a base tecnológica necessária para o desenvolvimento de aplicações estratégicas em setores como

mobilidade elétrica, geração de energia renovável, automação e tecnologias associadas à transição energética.

A existência de competências científicas e laboratoriais representa um ativo importante, mas não implica, por si só, domínio industrial da cadeia. A metalurgia de terras raras é uma das etapas mais difíceis da cadeia e construção gradual de capacidades é fundamental para o seu domínio.

7.4 Visão de futuro e objetivos estratégicos: horizonte 2040

A exemplo da cadeia produtiva de ímãs de terra raras (ITRs), definiram-se para a cadeia de ligas portadoras de TRs a visão de futuro para 2040 e os objetivos estratégicos para alcançar essa visão. A partir dessa visão, definiram-se objetivos que deverão orientar estrategicamente o desenvolvimento da cadeia produtiva de ligas metálicas portadoras de TRs, em conjunto com as demais cadeias de insumos e produtos acabados (Quadro 7.4). A agregação de valor pode ocorrer por diferentes arranjos industriais e comerciais, e a internalização de etapas adicionais da cadeia constitui uma das alternativas estratégicas possíveis. A produção nacional de ligas representa uma alternativa para ampliar a agregação de valor e fortalecer determinadas cadeias industriais estratégicas.

Visão de futuro da cadeia produtiva de ligas metálicas de TRs Brasil: horizonte 2040

Fabricação de ligas de TRs em escala industrial, agregando valor a matérias-primas nacionais, obedecendo aos preceitos de sustentabilidade.

Quadro 7.4 Objetivos estratégicos para alcance da visão de futuro 2040.

Dimensão	Situação atual	Objetivos estratégicos	Situação 2040
ME – Mercado de ligas portadoras de TRs para a fabricação de ímãs	A China produz cerca de 90% das ligas para ITRs do mundo, dificultando a exportação por meio de cotas e impostos. Aumento da demanda e preocupação da indústria mundial com a disponibilidade de matéria-prima para a fabricação vêm aumentando a demanda por projetos de P&D com objetivo escalonar a produção de ligas, conjuntamente com o escalonamento dos demais insumos da cadeia produtiva.	Ampliar a escala de produção industrial de ligas portadoras de TRs com uso de TRs a preços competitivos e incentivo ao fornecimento de fontes nacionais. Focar no abastecimento da cadeia de ímãs induzida pelo mercado a partir da ponta da cadeia produtiva (usos industriais). Estruturar e fortalecer a participação dos fabricantes e usuários na cadeia de fabricação de ligas.	Com o aumento crescente das novas tecnologias para realização da transição energética, existe uma demanda crescente por ITRs, principalmente para os carros híbridos e elétricos e geradores eólicos. Além das perspectivas de aumento na demanda de ligas de TRs para ímãs e outras aplicações nas tecnologias de baixo carbono.
RP – Reservas e produção de TRs no Brasil	Mineradoras como o grupo Viridis tiveram a inauguração recente para produção de TRs. Atualmente, outras mineradoras anunciaram projetos para a exploração e produção de TRs. No Brasil há registros de ocorrências de TRs em Araxá, Poços de Caldas, Catalão e Pitinga, Tapira, Salitre e em outras regiões, com potencial para exploração mineral. Globalmente, há um movimento em busca das TRs por serem considerados estratégicos para os próximos anos.	Garantir o escalonamento de produção de TRs de origem nacional. Fontes de matéria-prima potenciais seriam, por exemplo, as argilas iônicas de Poços de Caldas, além da monazita estocada pela empresa Indústrias Nucleares do Brasil (INB) e os rejeitos de Catalão/Fosfertil e Araxá. Viabilizar novas fontes de exploração de TRs. Colocar o Brasil como grande player na exploração de ETRs.	Reservas minerais de TRs conhecidas. A disponibilidade de TRs no país é satisfatoriamente conhecida, e a produção é realizada de maneira rentável e sustentável, atendendo à demanda nacional de uso de ímãs em todas as etapas da cadeia. Inserção competitiva em mercados externos.
PO – Política nacional para TRs: foco na cadeia produtiva de ligas portadoras de TRs	Priorização dos minerais estratégicos nas políticas do governo federal: ENCTI 2012-2015, PBM-2012 2014, PAC CPRM 2010-2014 e PNM-2030. Além disso, acordos recentes junto a países como EUA, Austrália, países da união europeia mediante acordo com Mercosul, e Índia.	Criar incentivos fiscais para uso de TRs de origem nacional, de natureza tributária, para a integração a montante da cadeia produtiva de ligas metálicas à base de TRs, em especial para viabilização da indústria nacional de ímãs. Criar programas de incentivos para estados e municípios atuarem no mercado como	Continuidade das políticas públicas voltadas para o desenvolvimento da cadeia produtiva de ligas para ímãs com foco na proteção nacional, revisadas em função das prioridades estratégicas do país e dos avanços tecnológicos alcançados. Ampliação da indústria nacional de ligas

Dimensão	Situação atual	Objetivos estratégicos	Situação 2040
		demandante de produtos que utilizem tecnologias baseadas em ITRs, por exemplo, ônibus elétricos, trens magnéticos, geradores elétricos, dentre outros usos.	metálicas portadoras de TRs e suas aplicações com foco em ímãs.
MR – Marco regulatório: foco na cadeia produtiva de ITRs	A legislação vigente ainda não enfatiza a produção de TRs de forma competitiva, sustentável, com agregação de valor.	Encaminhar e aprovar o novo marco regulatório mineral, explicitando e direcionando aspectos referentes ao desenvolvimento da cadeia produtiva de TRs como produtos estratégicos para o contexto nacional.	Novo marco regulatório estimula os investimentos produtivos e prioriza a produção de TRs de forma competitiva, com importância estratégica e sustentável.
INV – Investimentos na cadeia produtiva de ITRs	No Brasil, não há um fornecedor chave para atendimento às demandas nacionais de fabricação de ligas de TRs. Não há investimento diretamente ligado à produção de ligas para ITRs em escala industrial, tanto pela indústria pública ou pela iniciativa privada. Existem investimentos para estabelecimento da cadeia em escala piloto, mostrando o potencial do setor industrial brasileiro para o mercado.	Atrair mais investimentos de forma escalonada (busca de domínio tecnológico em escalas científica, piloto e industrial); Consolidar capacidade de produção em nível industrial de ligas metálicas para ITRs; Integrar os processos produtivos de fabricação de ligas às etapas de fabricação de ITRs nacionais e suas aplicações.	Investimentos consolidados em função do aumento da demanda pelos requisitos legais de controle de emissões pelo aumento da frota de veículos elétricos e híbridos no mercado interno e externo e pela necessidade de produção de energia limpa.
NF – Infraestrutura física para a cadeia produtiva de ligas portadoras de TRs	Existência de infraestrutura básica laboratorial e piloto para PD&I e para ligas portadoras de TRs para posterior fabricação de ímãs, mas sem uma perspectiva clara sobre escalonamento para escala industrial.	Consolidar e expandir a infraestrutura de laboratórios de PD&I com foco em produção piloto e avançando para escala industrial; Integrar e expandir as infraestruturas das ICTs para temáticas voltadas à transição energética, formando um elo para ampliação de trabalhos de PD&I. Implementar programas de PD&I com apoio a projetos cooperativos ICT/empresa, facilidades de pesquisa,	Infraestrutura laboratorial modernizada em instituições acadêmicas, ICTIs e empresas. ICTs integradas a temáticas da transição energética e sustentabilidade. Laboratórios-fábrica estruturados para produção de ligas para ímãs, atuando mais próximas às indústrias e empresas produtoras e consumidoras de ITRs.

Dimensão	Situação atual	Objetivos estratégicos	Situação 2040
		expansão mediante patentes e suporte técnico e logístico ao desenvolvimento da cadeia produtiva de ligas postadoras de TRs.	Indústria de fabricação de ligas portadoras de TRs em crescimento e expansão. Cadeia produtiva estruturada atendendo o mercado nacional e internacional.
RH – Recursos humanos para o desenvolvimento tecnológico e operações da cadeia produtiva de ITRs	Existência de grupos de pesquisa e especialistas dedicados à temática em alguns centros de pesquisa em diferentes regiões do Brasil, majoritariamente no IPT e no LabFab ITR.	Expandir esforços na capacitação e retenção de recursos humanos em todos os níveis para fazer frente aos novos desafios da cadeia produtiva de ímãs. Incentivar/apoiar programas de cursos de pós-graduação com objetivo de formar mestres e doutores com foco na produção e utilização de ligas contendo elementos de TRs, além de pesquisadores e pós-doutores para atuação em projetos de PD&I e em empresas para a ampliação de escala produtiva.	Competência tecnológica faz frente aos desafios da cadeia produtiva de ligas de TRs. Nas temáticas de transição energética, os recursos humanos são voltados para PD&I de novas composições e processos com o objetivo de inovar e reduzir custos de produção, aliados aos objetivos estratégicos nacionais e gerando novas tecnologias para aplicação no setor, em especial para fabricação de ímãs.
TE – Tecnologias para a cadeia produtiva de ligas portadoras de TRs	Há interesse de empresas nacionais e internacionais de terem maior domínio sobre a tecnologia de fabricação de ligas para ímãs, mas sem ação concreta para escala fabril. Associado à disponibilidade de TRs no Brasil e aos anúncios recentes de projetos e acordos nesta área, emerge um cenário adequado para parcerias de desenvolvimento tecnológico da cadeia como um todo e ações para escalonamento.	Promover e expandir o desenvolvimento de novas tecnologias de processos e produtos com tecnologia nacional, registro de propriedade intelectual no sentido de expandir a escala de produção para escala piloto e industrial, garantindo competitividade e soberania tecnológica.	Domínio tecnológico da cadeia produtiva de ligas de TRs e empresas instaladas no Brasil produzindo essas ligas, principalmente para atividades ligadas à fabricação de ímãs. Novos produtos especialmente desenvolvidos com tecnologia nacional, integrando processos, produtos, aplicação e de forma circular.

Encerrada a análise das ligas metálicas — do mischmetal de menor complexidade aos compostos intermetálicos armazenadores de hidrogênio e às ligas que alimentam a cadeia de ímãs permanentes —, o capítulo seguinte trata de um segmento em que as terras raras deixam de atuar como componente

estrutural ou magnético para operar como agente óptico: os fósforos. Aqui, propriedades como rendimento quântico, pureza de cor e estabilidade térmica determinam o desempenho de dispositivos que vão da iluminação de estado sólido aos displays de próxima geração e às aplicações médicas de imagem. É um segmento de alta densidade tecnológica e baixa intensidade de massa, no qual a competitividade se decide menos pelo volume de óxido disponível e mais pelo domínio fino da síntese e da formulação — deslocamento de eixo que o capítulo a seguir examina em detalhe.

Capítulo 8

Cadeia produtiva de fósforos de terras raras no Brasil

A cadeia produtiva de fósforos à base de terras raras (TR) é caracterizada em suas etapas constitutivas e no estágio de competência associado a cada uma delas, com ênfase nos seguintes segmentos de uso industrial:

- i. iluminação de estado sólido (LEDs brancos e de alta eficiência);
- ii. *displays* optoeletrônicos e painéis emissivos (OLEDs, mini-LEDs, micro LEDs);
- iii. aplicações médicas e biomédicas (cintiladores, sondas ópticas, diagnóstico por imagem e fotodinâmica);
- iv. marcadores luminescentes de segurança e autenticação; e
- v. aplicações emergentes em fotônica, sensoriamento remoto e fotovoltaica avançada.

Adicionalmente, esta cadeia tecnológica evoluiu significativamente para além das aplicações tradicionais em lâmpadas fluorescentes e tubos de imagem, diversificando enormemente suas aplicações. Assim, os fósforos representam uma cadeia especializada, de elevado conteúdo tecnológico e potencial de agregação de valor, embora em menor escala relativa quando comparada a outros segmentos das terras raras. Com base nessa análise, define-se a visão de futuro para a cadeia produtiva de fósforos à base de TR no horizonte de 2040. Ao final, apresenta-se o Mapa do Caminho Estratégico desta cadeia, estruturado em três horizontes temporais e contemplando objetivos estratégicos, ações, prazos e atores responsáveis pela consecução da visão proposta.

8.1 Metodologia adotada¹³

O primeiro instrumento organiza os fósforos à base de TR em cinco grupos funcionais — iluminação de estado sólido por LEDs brancos de alta eficiência; *displays* optoeletrônicos e painéis emissivos; aplicações médicas e biomédicas; marcadores luminescentes de segurança e autenticação; e aplicações emergentes em fotônica, sensoriamento remoto e fotovoltaica avançada — e classifica cada segmento segundo o ciclo de vida do produto em quatro estágios: introdução, crescimento, maturidade e declínio (Quadro 8.2). O posicionamento foi determinado com base em três critérios combinados: o grau de adoção comercial documentado na literatura técnica e em relatórios de mercado especializados, o volume de investimento

¹³ A metodologia de levantamento patentário na base Derwent Innovations Index é a mesma descrita em detalhe no Capítulo 5 (Seção 5.3). Aqui registramos apenas as adaptações específicas para esta cadeia, quando aplicáveis.

em pesquisa e desenvolvimento por segmento e o nível de prontidão tecnológica medido pelo Technology Readiness Level (TRL) (Mankins, 2009). A especificidade dos fósforos como materiais de precisão, nos quais parâmetros como rendimento quântico, pureza de cor, estabilidade térmica e largura de banda espectral (Full Width at Half Maximum — FWHM), definem diretamente a competitividade dos dispositivos finais — exigiu que o mapeamento considerasse não apenas a maturidade do segmento, mas a trajetória de diferenciação técnica requerida para cada aplicação, em particular nos segmentos de displays de próxima geração e de aplicações médicas de alta exigência.

O segundo instrumento é o mapa de competências da cadeia produtiva nacional, que avalia, para cada elo, desde a separação e obtenção de precursores de alta pureza à síntese de fósforos, formulação de dispositivos até a reciclagem de resíduos luminescentes, o domínio tecnológico efetivo, a capacidade produtiva instalada, a inserção em redes internacionais de pesquisa, desenvolvimento e inovação e o acesso a insumos críticos de TR. Esse mapeamento foi elaborado com base em revisão da literatura técnica especializada e em consultas a especialistas do setor realizadas entre 2025 e 2026 e orienta diretamente a definição das prioridades e da sequência de ações do *roadmap* desta cadeia.

O quarto e último instrumento, o *roadmapping* estratégico organiza as ações em cinco dimensões analíticas para três horizontes temporais: (i) estrutura da cadeia e integração a montante; (ii) segmentos de aplicação e competências tecnológicas; (iii) P&D, inovação e recursos humanos; (iv) mercado, inserção internacional e política industrial; e (v) regulação, sustentabilidade e economia circular. Para cada ação, identificaram-se os atores principais responsáveis pela sua execução, os prazos-alvo e os marcos de acompanhamento por horizonte, permitindo o monitoramento contínuo da trajetória estratégica e a avaliação de resultados nas janelas de revisão previstas.

Complementarmente, realizou-se um levantamento dos grupos de pesquisa nacionais associados à cadeia produtiva de fósforos à base de TR, a partir de consulta à Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa do MCTI e ao Diretório de Grupos de Pesquisa no Brasil do CNPq. Os grupos identificados foram analisados quanto à distribuição geográfica e institucional e às linhas de pesquisa por temática, com o objetivo de caracterizar a base científica nacional e identificar tanto as assimetrias estruturais quanto às oportunidades de articulação entre competência acadêmica e desenvolvimento industrial no horizonte 2040.

8.2 Importância estratégica da aplicação para o País

Os fósforos à base de TR constituem uma classe de materiais inorgânicos e organo-inorgânicos de alta tecnologia, cujas propriedades luminescentes únicas decorrentes das transições eletrônicas intraconfiguracionais 4f dos lantanídeos os tornam insubstituíveis em uma ampla gama de aplicações de alto valor agregado (Blasse e Grabmaier, 1994; Bünzli e Eliseeva, 2011; 2013). Diferentemente dos catalisadores, que atuam em processos industriais de massa, os fósforos de TR são incorporados em dispositivos de precisão, nos quais o desempenho óptico, expresso pelo rendimento quântico, pureza de cor, estabilidade térmica e fotoquímica, define diretamente a qualidade e a competitividade dos produtos finais.

O mercado global de fósforos à base de TR foi estimado em aproximadamente US\$ 3,2 bilhões em 2024, com projeção de alcançar US\$ 5,8 bilhões até 2033, crescendo a uma taxa composta anual (CAGR) de 7,5%. Esse crescimento é impulsionado principalmente pela expansão do mercado de iluminação LED, pelo avanço das tecnologias de display OLED e pela crescente demanda por materiais luminescentes em aplicações médicas, de segurança e em energias renováveis. A Tabela 8.1 sintetiza as projeções de mercado para os principais segmentos.

Tabela 8.1 Projeções do mercado global e brasileiro para fósforos à base de TR por segmento (2024-2033/2035)

Segmento de mercado	Valor 2024 (US\$)	Projeção 2033–2035 (US\$)	CAGR (%)	Fontes
Fósforos para LEDs de iluminação (global)	US\$ 1,46 bilhões (2024)	US\$ 8,77 bilhões (2033)	22%	Straits Research, 2025
Fósforos para <i>displays</i> (OLED, mini-LED, global)	US\$ 0,9 bilhões	US\$ 2,4 bilhões (2035)	9,3%	Grand View Research, 2024b
Fósforos para aplicações médicas/cintiladores (global)	US\$ 0,5 bilhões	US\$ 1,1 bilhões (2035)	7,4%	Grand View Research, 2024c
Fósforos para marcadores de segurança (global)	US\$ 0,2 bilhões	US\$ 0,4 bilhões (2035)	5,8%	Global Growth Insights, 2025
Mercado global de fósforos à base de TR (total)	US\$ 3,2 bilhões (2024)	US\$ 5,8 bilhões (2033)	7,5%	Verified Market Reports (2025)
Mercado brasileiro de fósforos à base de TR (estimado)	US\$ 65-90 milhões	US\$ 120-180 milhões (2033)	~5,5%	Estimativa*

Nota 1: Valores de CAGR (%) conforme metodologias das fontes.

Nota 2: O mercado brasileiro é uma estimativa derivada da participação da América Latina no total global (~7%, segundo Verified Market Reports, 2025), com participação do Brasil estimada em 40–50% do total regional. Não há dados diretamente publicados para o Brasil.

Os valores desta tabela referem-se ao mercado ampliado de fósforos à base de terras raras (TR) para aplicações em estado sólido como iluminação LED, *displays* de alta resolução, imageamento médico e marcadores de segurança, conforme definição adotada por Verified Market Reports (2025). Esse conceito de mercado difere do segmento restrito de fósforos para lâmpadas fluorescentes (mercado em contração, CAGR –1,3% segundo Global Growth Insights, 2025), que representa menos de 15% do total ampliado.

Para o Brasil, a importância estratégica da cadeia de fósforos à base de TR projeta-se em pelo menos quatro dimensões principais até 2040:

- I. **Eficiência energética e descarbonização:** A substituição progressiva de lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas (LFCs) por sistemas LED de alta eficiência constitui uma das mais relevantes alavancas de conservação de energia disponíveis no País. A

iluminação responde por cerca de 15% do consumo elétrico residencial e comercial no Brasil (EPE, 2025). LEDs brancos de alta qualidade cromática dependem criticamente de fósforos à base de Ce^{3+} em matriz YAG ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$) e de nitretos e oxinitretos de TR para emissão nas faixas do vermelho e do laranja (McKittrick; Shea-Rohwer, 2014). O domínio nacional dessas tecnologias é condição necessária para ampliar a competitividade da indústria de iluminação instalada no País.

- II. **Soberania tecnológica e agregação de valor mineral:** O Brasil detém reservas superiores a 1 Mt de TREO em Araxá — com teores de óxidos de TR entre 0,4% e 1,2% — além de depósitos de argilas iônicas na Bacia do Parnaíba, base mineral que permite reduzir a dependência em relação à China, responsável por aproximadamente 85% da oferta global e que impõe restrições às exportações no período 2023–2025 (CPRM, 2025; USGS, 2026). O aproveitamento estratégico dessas reservas abre frentes concretas à neindustrialização verde: (i) produção e exportação de fósforos de alto valor agregado, com potencial estimado em R\$ 2 bilhões/ano; (ii) reciclagem de lâmpadas e LEDs ao fim de vida útil, com recuperação estimada em 80 t/ano de TR; e (iii) inserção em cadeias globais de fornecimento de alta exigência tecnológica, como as de fabricantes de *displays* de consumo de massa. O desenvolvimento de uma cadeia produtiva nacional de fósforos de TR — da separação de óxidos à síntese e formulação de compostos de alto desempenho — representaria ganho expressivo de valor agregado e reduziria a dependência de importações de compostos funcionais, atualmente provenientes de forma majoritária da China (KfW, 2024; IBRAM, 2025).
- III. **Inovação em saúde, diagnóstico e segurança:** Fósforos e complexos luminescentes de TR têm papel crescente em aplicações médicas de alta tecnologia, incluindo: (i) cintiladores para tomografia computadorizada (TC) e detectores de raios X ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$, $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$); (ii) sondas fluorescentes para bioimagem celular e molecular baseadas em nanopartículas de upconversion ($\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$); e (iii) sistemas para terapia fotodinâmica (PDT) (Bünzli e Eliseeva, 2011; 2013; Bharat e Bharat, 2024). No campo da segurança documental, o Brasil dispõe de competência acumulada no desenvolvimento de complexos de TR para marcação de cédulas e documentos oficiais (Casa da Moeda do Brasil), ativo estratégico de elevada barreira à replicação.
- IV. **Posicionamento na fronteira de aplicações fotônicas emergentes:** Fósforos e materiais fotoluminescentes de TR situam-se na fronteira de aplicações de alto impacto tecnológico que balizarão o horizonte 2040: micro-LEDs para *displays* de próxima geração, conversores espectrais para fotovoltaica de alta eficiência (upconversion e downconversion), amplificadores e lasers de fibra óptica dopada com Er^{3+} para comunicações de alta capacidade, e sensores quânticos (Auzel, 2004; Shen et al., 2022). A participação brasileira nessas cadeias de valor requer a consolidação de uma base científica e industrial própria em síntese, processamento e caracterização de materiais luminescentes de TR.

A importância desta cadeia para o País não se limita ao suprimento de materiais luminescentes, mas alcança a capacidade de o Brasil gerar tecnologia própria, reduzir dependências críticas em insumos de

alta tecnologia e consolidar posição de liderança em segmentos associados a iluminação eficiente, saúde diagnóstica, segurança pública e fotônica avançada até 2040.

8.3 Principais usos industriais: Ciclo de vida dos fósforos à base de TR

O Quadro 8.1 sintetiza os usos industriais de fósforos de TR, indicando a funcionalidade habilitadora e os elementos TR requeridos em cada aplicação.

Quadro 8.1 Terras raras em fósforos: Usos industriais, funcionalidades habilitadoras e elementos TR

Uso industrial	Funcionalidade habilitadora	Elementos TR
LEDs brancos para iluminação geral (WLED)	Conversão espectral de luz azul/UV em luz branca de alta eficiência e índice de reprodução de cores (CRI)	Ce, Y, Eu, Tb, Gd
Mini-LEDs e micro-LEDs para <i>displays</i>	Emissão estreita em RGB pura; alta estabilidade térmica; resposta ultrarrápida	Ce, Eu, Tb, Mn, Y
OLEDs para iluminação e <i>displays</i>	Eletroluminescência de íons lantanídeos em complexos moleculares orgânicos; emissão de RGB pura	Eu, Tb, Er, Tm, Nd, Yb
Cintiladores para imagem médica (TC, PET, raios X)	Alta densidade, eficiência de parada, emissão rápida para detecção de radiação ionizante	Gd, Lu, Y, Ce, Tb, La
Sondas e nanopartículas para bioimagem e PDT	Luminescência de upconversion (NIR→Vis), emissão de oxigênio singlete para terapia fotodinâmica	Er, Yb, Ho, Tm, Nd
Marcadores de segurança e autenticação de documentos	Luminescência persistente e multimodo (UV, NIR, raios X); dificuldade de reprodução não autorizada	Eu, Tb, Dy, Nd, Yb
Amplificadores de fibra óptica e lasers (telecomunicações)	Emissão de Er ³⁺ em 1,55 μm (janela de telecomunicações); alta eficiência de bombeio	Er, Yb, Nd, Pr
Conversores espectrais para células fotovoltaicas	<i>Upconversion</i> (NIR→Vis) e <i>downconversion</i> (UV→Vis) para ampliar a faixa espectral aproveitada	Er, Yb, Ho, Eu, Nd, Tb
Sinalização e materiais de emergência (fosforescência)	Persistência luminosa de longa duração (>10h) após excitação; emissão no verde e azul	Eu, Dy, Nd, Yb
Detectores de nêutrons e dosímetros	Resposta seletiva a radiação de baixa energia; leitura por termoluminescência	Gd, Eu, Ce, Dy

O Quadro 8.2 indica o posicionamento em nível mundial de cada uso industrial de fósforos à base de TR, segundo os estágios do ciclo de vida dos produtos.

Quadro 8.2 Estágio do ciclo de vida dos produtos que utilizam fósforos à base de TR (nível mundial)

Usos industriais de fósforos à base de TR	Estágio do ciclo de vida (nível mundial)			
	Introdução	Crescimento	Maturidade	Declínio
LEDs brancos para iluminação geral (WLED)				
Mini-LEDs para backlighting e <i>displays</i>				
Micro-LEDs para <i>displays</i> de próxima geração				
OLEDs para iluminação				
OLEDs para <i>displays</i> (<i>smartphones</i> , TVs)				
Cintiladores para imagem médica (TC/PET)				
Sondas de upconversion para bioimagem				
Marcadores de segurança e autenticação				
Amplificadores de fibra óptica (EDFA)				
Conversores espectrais para fotovoltaica				

Nota: O estágio do ciclo de vida (nível mundial) foi determinado com base em três critérios combinados: (i) grau de adoção comercial documentado na literatura técnica e em relatórios industriais; (ii) volume de investimento em pesquisa e desenvolvimento por segmento; e (iii) nível de prontidão tecnológica medido pelo Technology Readiness Level (TRL) (Mankins, 2009).

8.3.1 Iluminação de estado sólido (LEDs)

A iluminação de estado sólido baseada em diodos emissores de luz (LEDs brancos de alta eficiência consolidou-se como a tecnologia dominante global em iluminação geral, com participação superior a 55% do mercado de fontes de luz em 2024, em trajetória de expansão para 75% até 2030 (IEA, 2023). A arquitetura mais difundida — chip LED azul de InGaN recoberto por fósforo de YAG:Ce³⁺ — deve sua eficiência ao alto rendimento quântico interno do Ce³⁺ na matriz garnet e à estabilidade térmica e fotoquímica superior da estrutura cristalina (McKittrick; Shea-Rohwer, 2014). A Nichia Corporation, empresa japonesa, detém a posição dominante no desenvolvimento de fósforos de alta eficiência para LEDs, com mais de 1.800 patentes ativas na área (WIPO, 2024).

A agenda tecnológica dos LEDs de iluminação no horizonte 2025-2040 concentra-se em três frentes: (i) aumento da eficiência luminosa para além de 250 lm/W (eficiência prática) mediante o desenvolvimento de novos fósforos de emissão vermelha estreita à base de nitretos e fluoretos (K₂SiF₆:Mn⁴⁺, β-sialon:Eu²⁺, CaAlSiN₃:Eu²⁺) que minimizem perdas por reabsorção espectral; (ii) melhoria do índice de reprodução de

cores (CRI > 95) para aplicações de conforto visual e horticultura; e (iii) desenvolvimento de LEDs de espectro tunável (*tunable white*) para aplicações de iluminação circadiana e agrícola (*human-centric lighting*) (Shang et al., 2014; US DOE, 2023). O Brasil importa a totalidade dos fósforos empregados na indústria nacional de luminárias LED — estimada em mais de R\$ 18 bilhões anuais — sendo este um gargalo crítico a ser endereçado no horizonte 2040 (ABNT, 2023; ABILUX, 2024).

8.3.2 Displays e painéis emissivos (OLEDs, mini-LEDs e micro-LEDs)

Os *displays* baseados em OLEDs (*Organic Light Emitting Diodes*) utilizam complexos moleculares de lantanídeos como camadas emissoras de luz vermelha (Eu^{3+}) e verde (Tb^{3+}), além de compostos de Ir^{3+} para emissão azul eficiente. O mercado global de painéis OLED foi estimado em US\$ 48 bilhões em 2024 e deve alcançar US\$ 96 bilhões até 2032, crescendo a CAGR de 9,1% (DSCC, 2024). Os principais fabricantes — Samsung Display, LG Display, BOE (China) — investem intensivamente em complexos de Eu e Tb de alto desempenho e em matrizes hospedeiras avançadas para maximizar a eficiência eletroluminescente.

Os micro-LEDs emergiram como a tecnologia de *displays* de próxima geração para aplicações de alto desempenho (realidade aumentada/virtual, telas premium, *smartwatches*), utilizando fósforos de TR de emissão estreita para converter a emissão primária UV/azul em RGB puro.

O desafio central é o desenvolvimento de fósforos com largura de banda controlada (FWHM). A largura à meia altura (*Full Width at Half Maximum* — FWHM) é o parâmetro central para caracterizar a qualidade espectral de fósforos, expressando a largura do pico de emissão luminosa no ponto em que a intensidade corresponde à metade do valor máximo (Samsung Research, 2023; Shen et al., 2022). Fósforos com FWHM estreita (tipicamente abaixo de 20–30 nm) produzem emissões altamente monocromáticas, essenciais para *displays* de alta fidelidade de cor, como os painéis QLED e Micro-LED de última geração, enquanto fósforos com FWHM mais larga (acima de 50–80 nm) são preferidos em aplicações de iluminação geral, onde a cobertura espectral ampla favorece o índice de reprodução de cor (CRI) elevado.

O desenvolvimento desses fósforos mobiliza intensamente os elementos de TR, dada a estrutura eletrônica 4f desses elementos, que confere transições radiativas com características espectrais únicas e altamente sintonizáveis. Entre os materiais mais relevantes destacam-se:

- Fósforos de emissão verde estreita — compostos à base de $\beta\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$ apresentam FWHM da ordem de 55 nm, sendo amplamente utilizados em retroiluminação de *displays*. Avanços recentes com matrizes de fluoreto, como $\text{K}_2\text{SiF}_6:\text{Mn}^{4+}$ para o vermelho e compostos de nitreto para o verde, têm permitido atingir FWHM inferiores a 10 nm em determinadas condições, aproximando o desempenho dos pontos quânticos (*quantum dots*) sem os passivos ambientais associados ao cádmio.
- Fósforos de emissão vermelha — compostos de európio trivalente (Eu^{3+}) em matrizes de óxido, como $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ e $\text{YVO}_4:\text{Eu}^{3+}$, exibem emissões com FWHM extremamente estreitas (< 5 nm), resultantes das transições proibidas por paridade $^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$ características do íon Eu^{3+} . Esses fósforos permanecem referência tecnológica em tubos de raios catódicos e lâmpadas de descarga, e estão sendo reexaminados para aplicações em lasers de estado sólido e biossensores.

- Fósforos de emissão azul — compostos de európio divalente (Eu^{2+}), como $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ (BAM), são a base das lâmpadas fluorescentes compactas de alta eficiência e dos LEDs de conversão de fósforo (*pc-LED*). A transição permitida por paridade $4f^65d \rightarrow 4f^7$ do Eu^{2+} resulta em bandas de emissão mais largas (FWHM tipicamente entre 40 e 70 nm), mas com rendimento quântico elevado.

A engenharia dos FWHM envolve a manipulação do campo cristalino ao redor do íon ativador — por meio da escolha da matriz hospedeira, dopagem com cátions modificadores e controle do tamanho de partícula — para ajustar a divisão do campo cristalino e, consequentemente, a posição e largura da banda de emissão. Técnicas de síntese como coprecipitação, sol-gel, combustão de solução e síntese hidrotermal têm sido otimizadas para produzir fósforos com morfologia controlada e distribuição de tamanho de partícula estreita, fatores que impactam diretamente a homogeneidade espectral e o FWHM resultante. Nesse contexto, os pontos quânticos de semicondutores (*quantum dots*) de InP e CdSe competem com os fósforos tradicionais de TR, mas apresentam limitações de estabilidade e toxicidade que mantêm os fósforos de lantanídeos como alternativa competitiva no horizonte 2040.

8.3.3 Aplicações médicas e biomédicas

Os cintiladores à base de TR — materiais que convertem radiação ionizante em luz visível detectável — são componentes essenciais em equipamentos de diagnóstico por imagem, especialmente em tomógrafos computadorizados (TC) e detectores de raios X digitais. Os materiais mais utilizados incluem $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$ (GOS:Tb), $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ (LSO:Ce), $\text{LuAlO}_3:\text{Ce}$ e $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$, escolhidos por sua alta eficiência de conversão, densidade e tempo de decaimento compatível com as exigências dos sistemas de aquisição modernos (Niki; Yoshikawa, 2015). O mercado global de cintiladores para aplicações médicas foi estimado em US\$ 490 milhões em 2024 (Bharat e Bharat, 2024).

O segmento mais dinâmico é o das nanopartículas luminescentes de TR para aplicações biomédicas, incluindo: (i) nanopartículas de upconversion (UCNPs) baseadas em $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ para bioimagem de tecidos profundos por excitação NIR, com menor fototoxicidade e maior penetração que os fluoróforos orgânicos convencionais; (ii) complexos de Eu^{3+} e Tb^{3+} de alta luminescência para imunoenaios resolvidos no tempo (TRFIA/DELFA), com resolução de detecção na faixa de femtomolar (fM); e (iii) sistemas fotossensibilizadores à base de TR para terapia fotodinâmica (PDT) e radiação próxima ao infravermelho (NIR-PDT) (Bünzli e Eliseeva, 2011; 2013; Bharat e Bharat, 2024). O Brasil possui grupos de pesquisa de excelência nessas áreas, notadamente na USP, UNICAMP e UFRJ, com publicações de alto impacto e registro de patentes em número crescente.

8.3.4 Aplicações emergentes em fotônica e energias renováveis

Fósforos e materiais fotônicos de TR situam-se na fronteira de aplicações emergentes que definirão a demanda do horizonte 2040. Destacam-se: (i) os conversores espectrais para células fotovoltaicas de alta eficiência, que utilizam camadas de downconversion ($\text{UV} \rightarrow \text{Vis}$, Ex.: Eu^{3+} , Tb^{3+} em matrizes de fluoretos) e upconversion ($\text{NIR} \rightarrow \text{Vis}$, $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$) para ampliar o espectro solar aproveitado, com potencial de aumentar a eficiência dos módulos de silício em até 2-3 pontos percentuais absolutos (Shen et al., 2022); (ii) os amplificadores de fibra óptica dopada com érbio (EDFAs), componente crítico das redes de comunicação de alta capacidade (>100 Gbps), cuja demanda cresce com a expansão das redes 5G e 6G; e (iii) os sensores

quânticos baseados em centros de NV em diamante co-dopados com íons TR para magnetometria e termometria de alta resolução espacial (Wolfowicz et al., 2021).

8.4 Cadeia produtiva de fósforos à base de TR e análise de patentes

A Figura 8.1 representa esquematicamente a cadeia produtiva de fósforos à base de TR, destacando-se as etapas a jusante, uma vez que as etapas a montante são comuns a todas as cadeias focalizadas neste estudo.

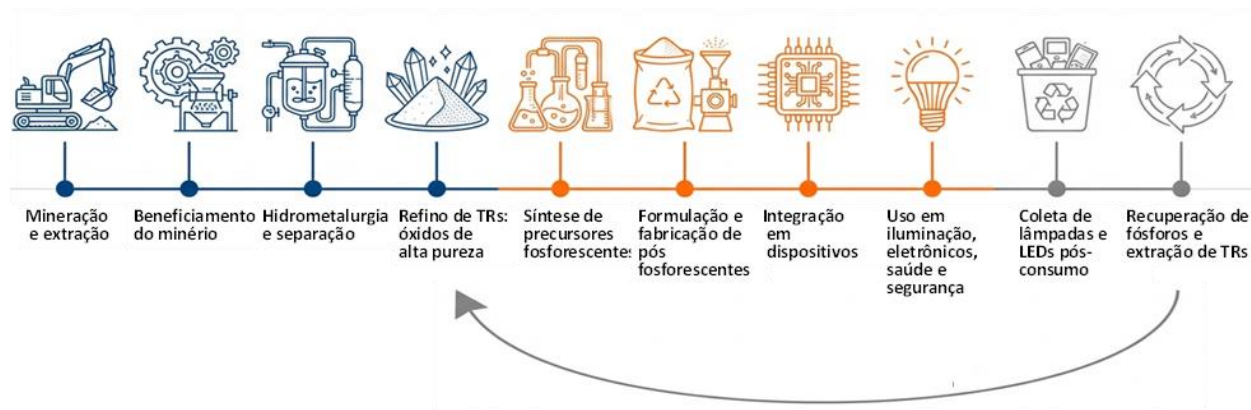


Figura 8.1 Cadeia produtiva de fósforos à base de TR

Essa cadeia é intensiva em conhecimento, capital e regulação, e sua governança envolve um conjunto diversificado de atores: empresas mineradoras, refinarias de terras raras, indústrias de materiais luminescentes, fabricantes de dispositivos LED e lâmpadas fluorescentes, montadoras de equipamentos eletrônicos e de iluminação, operadores logísticos, coletores de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), instituições científicas e tecnológicas e órgãos reguladores. Estrutura-se em dez etapas interdependentes. As duas primeiras compreendem a mineração e beneficiamento dos minérios hospedeiros, etapas fortemente concentradas na China, que responde por mais de 70% da produção global de fósforos de TR, valendo-se de suas vastas reservas de terras raras e de cadeias de suprimento consolidadas (PW Consulting, 2024).

A terceira e quarta etapas envolvem a separação e o refino dos elementos individuais — predominantemente ítrio (Y), európio (Eu), térbio (Tb), cério (Ce), lantânio (La) e gadolínio (Gd) — por extração líquido-líquido ou troca iônica, processos intensivos em reagentes químicos que representam a principal barreira técnica à diversificação geográfica da cadeia. A China refina atualmente mais de 80% dos materiais de terras raras em escala global, de modo que seu controle tanto sobre os insumos brutos, quanto sobre os produtos processados impõe às indústrias fabricantes de fósforos — especialmente nos EUA, no Japão e na Europa — maior risco de prazos mais longos e custos mais elevados (Lightnow, 2025).

Os quatro elementos TR mais críticos para a produção de fósforos — európio, térbio, cério e lantânio — possuem propriedades luminescentes únicas que permitem a geração precisa de cores e a manipulação da luz (SFA Oxford, 2024), tornando sua disponibilidade estratégica para toda a cadeia.

A quinta etapa é a síntese de precursores fosforescentes, que são compostos como o óxido de ítrio dopado com európio ($\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$, denominado YOX, responsável pela emissão vermelha), o aluminato de bário e magnésio dopado com európio ($\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$, BAM, para emissão azul) e o fosfato de lantânio ativado com cério e térbio ($\text{LaPO}_4:\text{Ce}^{3+},\text{Tb}^{3+}$, LAP, para emissão verde), além de nitretos e silicatos dopados com cério para aplicações em LED branco de alta eficiência. Fósforos com elevado teor de térbio, como os compostos LAP, CBT e CAT, apresentam maior paramagnetismo, característica que pode ser explorada em etapas de separação física durante o processamento (Chen et al., 2014), o que confere a esses precursores singularidade tecnológica em relação aos demais fósforos comerciais.

A sexta etapa corresponde à formulação e fabricação dos fósforos acabados, com pós luminescentes de alta pureza para revestimento de *chips* LED (conversão de luz azul em branca), misturas tricromáticas para lâmpadas fluorescentes compactas (CFL) e lineares (LFL) e compostos especializados para *displays*, imageamento médico e iluminação automotiva. Neste segmento, a Nichia detém aproximadamente 18% do mercado global em razão de sua liderança tecnológica em materiais fosforescentes e de seu processamento avançado de terras raras, enquanto a Mitsubishi Chemical Corporation responde por cerca de 14% do mercado com portfólios diversificados de alto desempenho (Global Growth Insights, 2025a). Completam o grupo de líderes globais empresas como Intematix Corporation, ams^{OSRAM}, Dow Electronic Materials, Tokyo Kagaku Kenkyusho, Nemoto Lumi^{Materials} e Toshiba Materials, que atuam de forma integrada no desenvolvimento, formulação e fornecimento de fósforos de TR para as etapas de integração em dispositivos e uso em LEDs, *displays* e aplicações especializadas (MRA, 2025).

As duas últimas etapas envolvem coleta de lâmpadas fluorescentes e LEDs, recuperação dos elementos TR a partir de fósforos exauridos e reciclagem em escala comercial. A taxa de reciclagem de TR nesta cadeia permanece em torno de 1%, a despeito das significativas incertezas relacionadas à oferta e à demanda futuras, em contraste com metais como ferro e aço, que atingem índices de reciclagem próximos a 90% (IEA, 2024).

A coleta e reciclagem em escala comercial de lâmpadas fluorescentes e LEDs são hoje realizadas principalmente para a separação do mercúrio para descarte seguro. Contudo, o processamento do pó fosforescente rico em compostos de TR ainda se encontra em fase de desenvolvimento. Do ponto de vista técnico, as lâmpadas residuais podem ser separadas, por meio de processos físicos como trituração, peneiramento e classificação, em diferentes frações secundárias — fósforos tricromáticos, alumínio, vidro e mercúrio — e os fósforos recuperados submetidos a ataques químicos para extração das TR, com destaque para rotas hidrometalúrgicas combinadas a pré-tratamentos térmicos ou mecânicos.

A concentração de TR no pó fosforescente de lâmpadas fluorescentes é cerca de 15 vezes superior à dos minérios primários, o que torna esse fluxo de resíduos um candidato prioritário à mineração urbana (Shahabuddin et al., 2023). Fósforos de iluminação, juntamente com ímãs permanentes e baterias de NiMH, figuram entre as fontes secundárias com maior potencial para a extração sustentável de TR em escala, reforçando o caráter estratégico desse segmento no contexto da transição energética global.

A partir dessa caracterização da cadeia produtiva, apresentam-se, a seguir, as tendências tecnológicas, avanços e desafios associados ao desenvolvimento de fósforos à base de TR com base no levantamento patentário conduzido na base Derwent Innovations Index, abrangendo o período de 2015 a 2025 e fundamentado na estratégia de busca detalhada na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 Estratégia de busca adotada no levantamento de patentes referentes a fósforos à base de terras raras: 2015-2025

Item	Estratégia de busca	Nº de patentes
#1	TS= ("rare earth" OR "rare-earth" OR "rare earths" OR "rare-earths" OR lanthanide* OR lanthanoid* OR europium OR terbium OR cerium OR yttrium OR "Eu3+" OR "Eu2+" OR "Tb3+" OR "Ce3+")	193.645
#2	TS = (phosphor* OR luminescen* OR luminescing OR "white LED*" OR "pc-LED*" OR "pcLED*" OR "light emitting diode*" OR "fluorescent lamp*" OR scintillat* OR "down-conversion" OR "downconversion" OR "up-conversion" OR "upconversion" OR "wavelength conversion*" OR "YAG" OR "garnet" OR "aluminate*" OR "silicate*" OR "nitride*" OR "oxynitride*" OR "sialon*" OR "fluoride*" OR "phosphate*" OR "quantum dot*")	1.313.738
#3	IP= (C09K-011/77* OR C09K-011/62* OR C09K-011/56* OR C09K-011/08 OR C09K-011/79* OR C01F* OR C03C-003/253 OR H01L-033/50* OR H10H-020/00* OR C04B-035/505*)	54.666
#4	#1 AND #2	78.266
#5	#3 AND #4	6.098

Fonte: Busca direta na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 20 mar. 2026.

Os códigos da Classificação Internacional de Patentes (CIP) indicados no item #3 combinam deliberadamente três camadas da cadeia produtiva de fósforos de TR:

- C09K-011/08, 011/56*, 011/62*, 011/77* e 011/79* — cobrem o núcleo tecnológico dos fósforos: desde materiais luminescentes inorgânicos de base ampla (011/08) até composições específicas de alto desempenho, como sulfetos (011/56*), nitretos e oxinitretos (011/62*), granadas do tipo YAG:Ce³⁺ (011/77*) e outros fósforos à base de TR para emissão em múltiplas faixas espectrais (011/79*);
- C01F* — captura a etapa de precursores, abrangendo compostos inorgânicos de metais alcalinos, alcalinoterrosos e, criticamente, de terras raras — óxidos, hidróxidos, sais e complexos — que constituem a matéria-prima funcional para a síntese de fósforos de alta pureza;
- C03C-003/253, C04B-035/505*, H01L-033/50* e H10H-020/00* — cobrem as aplicações e plataformas de uso final: vidros ópticos dopados com TR (C03C), cerâmicas luminescentes à base de óxidos de TR (C04B), elementos de conversão espectral em dispositivos LED (H01L-033/50*) e LEDs de estado sólido na nomenclatura revisada da CIP (H10H-020/00*), segmento central da demanda por fósforos de Ce³⁺, Eu²⁺ e Tb³⁺.

Como pode ser observado na Tabela 8.2, identificaram-se 6.098 patentes (item #5), que foram classificadas por código CIP, depositante e área de conhecimento.

A análise por código da CIP revelou que a inovação em fósforos à base de TR se organiza em torno de cinco eixos interdependentes: (i) composição química e síntese — centrada nas formulações de aluminatos, nitretos, oxi-nitretos e óxidos ativados por TR; (ii) matrizes hospedeiras cerâmicas e processamento — com forte ênfase em cerâmicas de nitreto de silício, alumina e vidros luminescentes como suportes estruturais dos centros emissores; (iii) dispositivos de iluminação, optoeletrônica e nanotecnologia — dominada pelos LEDs de conversão por fósforo (PC-LED), nanofósforos e quantum dots para iluminação e displays; (iv) aplicações em displays, óptica, detecção e imageamento — voltadas a retroiluminação de

LCD, cintiladores para detecção de radiação ionizante, projetores laser-fósforo e imageamento médico; e (v) recuperação, reciclagem e valorização de terras raras — abrangendo processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos de extração de TR a partir de lâmpadas e LEDs pós-consumo, com destaque para extração por solvente, troca iônica e recuperação de pó de polimento de CeO_2 (Tabela 8.3).

Tabela 8.3 Distribuição dos principais códigos CIP por eixo temático da inovação em fósforos à base de terras raras (2015–2025)

Eixo Temático	Código CIP	Descrição	Nº de Patentes
Eixo I Composição química e síntese de fósforos	C09K-011/77	Fósforos de aluminato ativados por TR (ex: YAG:Ce ; $\text{BaMgAl}_{10}\text{O}_{17}:\text{Eu}^{2+}$ — azul)	1.732
	C09K-011/08	Materiais luminescentes inorgânicos — sulfetos e óxidos (classe geral)	1.163
	C09K-011/64	Fósforos de óxidos de ítrio e lantânio ($\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ — YOX vermelho)	797
	C09K-011/02	Materiais luminescentes inorgânicos (geral, não subclassificados)	770
	C09K-011/80	Fósforos de nitreto de silício tipo Salon ($\beta\text{-SiAlON}:\text{Eu}^{2+}$ — verde)	770
	C09K-011/79	Fósforos de nitretos e oxi-nitretos (ex: $\text{CaAlSiN}_3:\text{Eu}^{2+}$ — vermelho)	459
	C01F-017/00	Compostos de terras raras (geral — precursores de fósforos)	453
	C01F-017/10	Compostos de cério (CeO_2 , Ce_2O_3 — ativadores de luminescência)	448
	C09K-011/59	Fósforos de aluminato com longa persistência ($\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu,Dy}$ — verde)	357
	C09K-011/78	Fósforos de compostos nitrogenados (nitretos mistos — nitreto-oxi-silicatos)	340
Eixo II Matrizes hospedeiras e processamento de cerâmicas	C04B-035/505	Cerâmicas de nitreto de silício (matriz hospedeira de nitreto-fósforos)	381
	C04B-035/622	Composições densas de Si_3N_4 — sinterização de matrizes nitretadas	312
	C04B-035/44	Cerâmicas de alumina (Al_2O_3 como matriz hospedeira de TR)	234
	C04B-035/50	Cerâmicas de espinélio e aluminato (MgAl_2O_4 — matrizes ópticas)	192
	C04B-035/64	Cerâmicas de boreto (matrizes para fósforos de alta temperatura)	167
	C04B-035/626	Cerâmicas de carbeto de silício (SiC — substrato e encapsulante)	166
	C03C-004/12	Vidros e vitrocerâmicas luminescentes dopados com TR	100
	C04B-035/645	Cerâmicas de carboneto de boro (B_4C — matriz de alta dureza)	93
	C04B-035/10	Cerâmicas de MgO e compostos de magnésio (matrizes hospedeiras)	92
	C23C-004/134	Revestimentos fosforescentes por aspersão térmica (<i>thermal spray</i>)	49
Eixo III	H01L-033/50	LED com conversão de comprimento de onda por fósforo (PC-LED)	2.463

Eixo Temático	Código CIP	Descrição	Nº de Patentes
Dispositivos de iluminação, optoeletrônica e nanotecnologia	B82Y-040/00	Nanobiotecnologia — quantum dots e nanopartículas de TR	387
	B82Y-030/00	Aplicações de nanotecnologia em materiais — nanofósforos e QDs	311
	B82Y-020/00	Nanoeletrônica — quantum dots em <i>displays</i> e iluminação	246
	H10H-020/851	Dispositivos LED de alta eficiência (nova subclasse IPC 2023)	250
	H01L-033/00	Dispositivos semicondutores emissores de luz — LED (geral)	222
	F21Y-115/10	Fontes de luz LED para luminárias e sistemas de iluminação	193
	H01L-033/56	LED com camadas ativas de composição química específica	159
	H01L-033/48	LED com encapsulamento e proteção óptica	157
	H01L-025/075	Arranjos de múltiplos LEDs (módulos, painéis e <i>arrays</i>)	149
Eixo IV Aplicações em <i>displays</i> , óptica, detecção e imageamento	G02B-005/20	Elementos ópticos de conversão espectral (filtros e lâminas difratoras)	294
	G01N-021/64	Espectroscopia de fluorescência e fosforescência (análise de fósforos)	144
	G01T-001/20	Detetores de radiação por cintilação (cintiladores de TR)	126
	G01T-001/202	Cintiladores para detecção de raios X e radiação gama	112
	G02F-001/13357	<i>Displays</i> de cristal líquido com retroiluminação por fósforo (LCD-WLED)	100
	G02F-001/1335	Módulos de retroiluminação para <i>displays</i> LCD com fósforo	78
	G21K-004/00	Materiais cintiladores para aplicações nucleares e de imagem	73
	G03B-021/20	Projetores de imagem com fonte LED-fósforo (<i>laser phosphor projectors</i>)	61
	A61K-049/00	Agentes de contraste luminescentes com TR para imageamento médico	48
Eixo V Recuperação, reciclagem e valorização de terras raras	G03B-021/14	Sistemas de projeção com conversão espectral por fósforo	47
	C22B-059/00	Obtenção e recuperação de metais de TR por metalurgia extrativa	187
	C22B-007/00	Tratamento de resíduos e sucata para recuperação de TR	80
	C09G-001/02	Composições de polimento à base de CeO ₂ (recuperação de pó de polimento)	69
	C01G-053/00	Compostos de níquel com TR (processamento/reciclagem de baterias NiMH)	56
	C01G-015/00	Compostos de manganês com TR (subprodutos do processamento de fósforos)	51
	C01G-025/00	Compostos de zircônio com TR (cozircônia — coprecipitação de TR)	45

Eixo Temático	Código CIP	Descrição	Nº de Patentes
	C01G-025/02	Oxido de zircônio com dopagem de TR (separação por coprecipitação)	43
	C22B-003/44	Extração por solvente orgânico (hidrometalurgia de TR)	38
	C22B-003/10	Tratamento por troca iônica (purificação de TR)	37
	C22B-003/38	Extração líquido-líquido (separação de TR de fósforos exauridos)	31

A distribuição dos 6.098 registros de patentes pelos cinco eixos temáticos revela uma estrutura de inovação marcada por forte polarização entre a síntese de materiais fosforescentes e a integração em dispositivos optoeletrônicos, com participação incipiente nos segmentos de matrizes cerâmicas avançadas e de recuperação de terras raras (TR) exauridas. Essa configuração reflete a lógica de criação de valor do setor: os maiores incentivos à proteção intelectual concentram-se nos elos de maior margem da cadeia, enquanto os processos de reciclagem e a engenharia de matrizes hospedeiras permanecem subrepresentados no portfólio patentário global.

O Eixo I (Composição química e síntese de fósforos) reúne a maior densidade patentária, com os dez principais códigos somando aproximadamente 8.100 ocorrências. O código C09K-011/77 (1.732 patentes) lidera o eixo, agrupando os aluminatos dopados por TR — classe que inclui o YAG:Ce³⁺, referência tecnológica para LEDs brancos de alta eficiência desde os anos 1990, em razão de sua elevada eficiência quântica e boa estabilidade térmica. Os códigos C09K-011/80 e C09K-011/79, relativos a nitretos e oxinitretos, confirmam o deslocamento da inovação para materiais com maior resistência térmica, indispensáveis para LEDs de alta potência em iluminação hortícola e automotiva. A presença dos códigos relativos a compostos de cério revela que a inovação permeia ativamente os precursores de alta pureza, etapa crítica onde a pureza do lantanídeo ativador determina diretamente a eficiência quântica do produto final.

O Eixo II (Matrizes hospedeiras cerâmicas e processamento) reflete uma tendência de convergência entre cerâmica estrutural e fotônica funcional: ao controlar a microestrutura e a fase cristalina da matriz, é possível modular a posição espectral e a estabilidade térmica da emissão luminescente de forma independente da composição do ativador. A presença de patentes em vitrocerâmicas dopadas com TR sinaliza a emergência de plataformas híbridas como alternativa às matrizes cristalinas convencionais, com vantagens de processabilidade para aplicações em fósforos remotos e sistemas de conversão espectral fotovoltaica.

O Eixo III (Dispositivos de iluminação, optoeletrônica e nanotecnologia) é dominado pelo código H01L-033/50 (2.463 patentes), que agrupa LEDs com conversão de comprimento de onda por fósforo — o maior volume individual de toda a base. Os códigos do grupo B82Y evidenciam a crescente interpenetração entre fósforos e nanotecnologia: *quantum dots* e nanofósforos dopados por lantanídeos posicionam-se como substitutos ou complementos dos fósforos convencionais, com emissão mais estreita e ajustabilidade espectral essencial para *displays* de ultra-alta definição.

O Eixo IV (Aplicações em *displays*, óptica, detecção e imageamento) demonstra diversidade de usos finais: retroiluminação de *displays* LCD, detectores de radiação por cintilação, sistemas de projeção laser-fósforo e agentes de contraste para imageamento médico. O segmento de cintiladores para imageamento nuclear sublinha a relevância estratégica dos fósforos de TR em aplicações de segurança e saúde pública, onde margens e barreiras de entrada são substancialmente mais elevadas do que no segmento de iluminação geral.

O Eixo V (Recuperação, reciclagem e valorização de TR) exhibe o menor volume patentário, mas concentra os códigos de maior relevância estratégica prospectiva. O código C22B-059/00 (187 patentes) representa o núcleo do esforço inovativo em economia circular aplicada à recuperação de TR de fósforos exauridos. A baixa densidade patentária reflete tanto a emergência do campo quanto sua elevada dependência de *know-how* tácito, dado que a concentração de TR no pó fosforescente de lâmpadas exauridas é cerca de quinze vezes superior à dos minérios primários. Para o Brasil, que importa a totalidade dos fósforos de TR utilizados em iluminação e *displays* e dispõe de reservas expressivas de cério e lantânio ainda não integradas a cadeias de valor de alta tecnologia, este eixo representa a janela de oportunidade mais imediata para internalização de valor via PD&I orientada à mineração urbana e à síntese de precursores fosforescentes nacionais.

A Tabela 8.4 apresenta os principais depositantes de patentes no período 2015–2025 (critério “top 30”), extraídos de um total de 200 titulares identificados na base consultada.

Tabela 8.4 Principais depositantes de patentes em fósforos à base de terras raras: Ranking consolidado por grupo econômico e institucional (2015–2025)

Grupo / Entidades	País	Nº patentes	% do total
Grupo Nichia (2 entidades)	Japão	345	5,6%
Grupo Panasonic (2 entidades)	Japão	157	2,5%
Denka Co Ltd	Japão	144	2,3%
Grupo Toshiba (3 entidades)	Japão	75	1,2%
Grupo Shin-Etsu Chemical (2 entidades)	Japão	68	1,1%
Mitsubishi Chemical Corp	Japão	49	0,8%
NIMS – National Institute for Materials Science	Japão	51	0,8%
Outros japoneses (11 entidades)	Japão	233	3,8%
Grupo OSRAM / ams-OSRAM (4 entidades)	Alemanha	160	2,6%
Grupo Signify / Philips / Lumileds (4 entidades)	Países Baixos / EUA	101	1,6%
Merck Patent GmbH	Alemanha	36	0,6%
Rhodia Operations / Solvay	França	21	0,3%

Grupo / Entidades	País	Nº patentes	% do total
CNRS – Centre National de la Recherche Scientifique	França	20	0,3%
Saint-Gobain Ceramics & Plastics	França / EUA	17	0,3%
Grupo Samsung (2 entidades)	Coreia do Sul	86	1,4%
Grupo LG (2 entidades)	Coreia do Sul	46	0,7%
Hyosung Corp	Coreia do Sul	40	0,6%
Institutos públicos (KIST; KICET)	Coreia do Sul	45	0,7%
Seoul Semiconductor / Univ Sungkyunkwan	Coreia do Sul	31	0,5%
Grupo Oceans King Lighting (3 entidades)	China	104	1,7%
Grirem Group (2 entidades)	China	84	1,4%
Baotou Research Institute of Rare Earths	China	40	0,6%
Outros chineses (Jiangsu Bree, Xuyu, TCL Group)	China	81	1,3%
Universidades chinesas independentes (15 entidades)	China	413	6,7%
CAS – Academia Sinica (6 institutos)	China	151	2,4%
General Electric / Current Lighting Solutions (2 entidades)	EUA	67	1,1%
Intematix Corp	EUA	22	0,4%
Applied Materials Inc	EUA	24	0,4%
Radiation Monitoring Devices Inc	EUA	16	0,3%
Total consolidado (grupos "top 30")		2.727	44,7%

A análise dos principais depositantes de patentes em fósforos à base de TR (critério "top 30") revelou uma estrutura de mercado marcada por dois padrões simultâneos: a concentração do domínio industrial em poucos conglomerados japoneses e europeus de longa tradição; e a ascensão acelerada e numericamente expressiva da China, distribuída entre empresas industriais, institutos da Academia Sinica (CAS) e universidades independentes.

O Japão consolida a posição de maior potência tecnológica do setor, com 1.122 patentes estimadas (18,4% do total), concentradas em grupos de alta especialização. O Grupo Nichia (345 patentes, 5,6%) ocupa isoladamente a liderança mundial, detendo patentes fundamentais sobre fósforos YAG:Ce³⁺ e nitretos de Eu²⁺ que estruturam o mercado global de LEDs brancos. O Grupo Panasonic (157 patentes) e a Denka (144 patentes) completam o núcleo industrial japonês. A presença do NIMS (51 patentes) revela o modelo japonês de inovação: pesquisa pública de fronteira em colaboração estreita com a indústria privada.

Os países europeus aparecem em segundo lugar (355 patentes, 5,8%), liderada pelo Grupo OSRAM/ams-OSRAM (160 patentes) e pelo Grupo Signify/Philips/Lumileds (101 patentes), ambos com portfólios reorientados de lâmpadas fluorescentes para LEDs de alta potência e iluminação automotiva. A presença de Rhodia/Solvay (21 patentes) é estrategicamente relevante por representar o único ator europeu com integração vertical simultânea na produção de precursores de TR de alta pureza e em aplicações de fósforos funcionais.

A Coreia do Sul (248 patentes, 4,0%) combina grandes conglomerados — Samsung (86 patentes) e LG (46 patentes) — com institutos públicos de pesquisa (KIST, KICET) e empresas especializadas, configurando um ecossistema verticalmente integrado e orientado à cadeia de *displays* e eletrônica de consumo.

A China apresenta o perfil mais diversificado e de crescimento mais acelerado, alcançando aproximadamente 873 patentes consolidadas (14,3% do total), com crescimento concentrado no período pós-2015, impulsionado pelas políticas do Made in China 2025. O Griem Group (84 patentes), o Grupo Oceans King (104 patentes) e 15 universidades independentes sinalizam uma estratégia deliberada de construção de capacidade científica distribuída, com forte alinhamento entre agendas universitárias e prioridades de política industrial.

Três ausências são analiticamente reveladoras: a ausência do Brasil no *ranking*, a despeito de suas reservas nacionais de TR e da competência científica acumulada em grupos de pesquisa; a exclusão de toda a América Latina, África e Sudeste Asiático, evidenciando a concentração geográfica da cadeia em quatro blocos; e o recuo relativo dos EUA (129 patentes, 2,1%), que perdeu protagonismo industrial para o bloco asiático ao longo das duas últimas décadas.

Se o mapeamento por depositantes revela quem inova, a distribuição por área de conhecimento responde a uma questão igualmente relevante: em quais fronteiras científicas as inovações em fósforos à base de TR se apoiam. A Tabela 8.5 apresenta o conjunto de 6098 patentes classificadas por área de conhecimento, adotando-se o critério “top 10”.

Tabela 8.5 Patentes referentes a fósforos à base de terras raras, classificadas por área do conhecimento: 2015-2025 (critério: “top 10”)

Áreas	Nº de patentes
Química	5.933
Engenharia	4.704
Ciência dos Materiais	4.384
Instrumentação e Instrumentos	3.891
Eletroquímica	3.621
Ciência dos Polímeros	1.464
Ciência da Imagem e Tecnologia Fotográfica	841

Áreas	Nº de patentes
Energia e Combustíveis	377
Metalurgia e Engenharia Metalúrgica	348
Óptica	289

Fonte: Estratégia de busca na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 20 mar. 2026.

A distribuição das 6.098 patentes por áreas do conhecimento revela o caráter marcadamente multidisciplinar da tecnologia de fósforos contendo TR, reflexo direto da complexidade da cadeia de valor que conecta síntese química, engenharia de dispositivos e aplicações de uso final. Como uma patente pode ser classificada em mais de uma área, os totais por categoria são complementares e não excludentes.

As áreas de ‘Química’ (5.933 patentes) e ‘Engenharia’ (4.704) lideram o *ranking*, correspondendo a 97,3% e 77,1% do portfólio total, respectivamente, e evidenciam que o domínio tecnológico nesse campo se assenta, simultaneamente, sobre o controle da síntese e formulação dos materiais e sobre a engenharia dos processos e dispositivos que os incorporam. ‘Ciência dos Materiais’ (4.384 patentes) completa o núcleo central dessa tríade, sinalizando que a busca por fósforos de alto desempenho, com maior eficiência quântica, estabilidade térmica e reprodutibilidade espectral, é conduzida em estreita interface com o desenvolvimento de novas matrizes cristalinas e técnicas de caracterização avançada.

A expressiva presença de ‘Instrumentação e Instrumentos’ (3.891) e ‘Eletroquímica’ (3.621) confirma a relevância dos fósforos de TR em aplicações que demandam controle rigoroso de emissão espectral e integração com sistemas elétricos e optoeletrônicos, como detectores de radiação, fontes de luz de estado sólido e dispositivos de conversão de energia. Esses números reforçam que a cadeia produtiva não se encerra na síntese do fósforo, estendendo-se até a engenharia de integração em plataformas funcionais.

‘Ciência dos Polímeros’ (1.464) e ‘Ciência da Imagem e Tecnologia Fotográfica’ (841) apontam para aplicações em matrizes poliméricas luminescentes e em sistemas de *displays* e imageamento, segmentos de crescente relevância para a indústria de eletrônicos de consumo. As participações menores de ‘Energia e Combustíveis’ (377), ‘Metalurgia e Engenharia Metalúrgica’ (348) e ‘Óptica’ (289) indicam nichos emergentes associados à fotovoltáica de alta eficiência, à recuperação de TR de resíduos de fósforos e à fotonica integrada, sugerindo que a fronteira tecnológica do campo avança progressivamente em direção a aplicações de maior complexidade sistêmica e constituem uma oportunidade complementar de agregação de valor baseada em competências químicas e ópticas, exatamente o espaço em que o Brasil tem potencial de inserção estratégica.

Em síntese, a projeção das tendências observadas até 2040 aponta para quatro vetores estruturantes de inovação em fósforos de TR, sendo o primeiro vetor o crescimento acelerado de patentes em aplicações médicas e de bioimagem, impulsionado pela expansão das tecnologias de diagnóstico de precisão e pela demanda crescente por marcadores luminescentes de alta seletividade biológica, campo ainda em intensa expansão no portfólio global de propriedade intelectual.

O segundo vetor corresponde à consolidação do portfólio de patentes em micro-LEDs e *displays* de próxima geração. Nesse sentido, a IEA (2023) documenta que a tecnologia LED já respondia por parcela

majoritária das vendas globais de iluminação em 2023, com projeções de eficácia luminosa chegando a 142 lm/W até 2030, desempenho esse que depende criticamente da qualidade dos fósforos de terras raras empregados na conversão espectral. A aceleração regulatória global, com múltiplos países elevando exigências mínimas de eficiência energética para luminárias, reforça a demanda tecnológica por fósforos de TR de alto desempenho e, consequentemente, a pressão sobre as atividades de P&D e depósito de patentes nesse segmento.

O terceiro vetor refere-se à emergência de famílias de patentes em conversores espectrais para fotovoltaica e em sensores quânticos, sinalizando a convergência entre fotônica, captação de energia solar e instrumentação de precisão. Essa fronteira tecnológica aponta para aplicações ainda incipientes no portfólio de patentes atual, mas de elevado potencial estratégico no horizonte 2030–2040.

O quarto vetor e talvez o mais crítico sob a perspectiva da segurança de suprimento é o crescimento expressivo de patentes relacionadas à recuperação e reciclagem de dispositivos contendo TR ao final de sua vida útil.

O estudo do Banco KfW da Alemanha destaca que a transição para o net zero e a digitalização da economia ampliarão substancialmente a demanda global por metais especiais, incluindo as TR, em um contexto de elevada concentração geográfica da extração e do processamento com a China dominando mais de 85% da capacidade mundial de refino de TR (KfW, 2024). Esse estudo destaca que o avanço da economia circular, a expansão da extração doméstica europeia e a diversificação das fontes de *procurement* internacional são instrumentos essenciais para ampliar a resiliência do suprimento. Nesse cenário, as patentes em recuperação e reciclagem de dispositivos contendo TR emergem não apenas como resposta a uma agenda ambiental, mas como vetor de soberania tecnológica e redução de vulnerabilidade geopolítica.

8.5 Competência atual associada à cadeia produtiva de fósforos de TR no Brasil

O Quadro 8.3 apresenta o mapa de competências da cadeia produtiva de fósforos à base de TR no Brasil (2025-2026).

Quadro 8.3 Mapa de competências da cadeia produtiva de fósforos à base de TR no Brasil (2025-2026)

Competência	Nível	Descrição do domínio em 2025	Evolução nas últimas décadas
Separação e obtenção de precursores de alta pureza (Y ₂ O ₃ , Eu ₂ O ₃ , Gd ₂ O ₃ , CeO ₂ , Tb ₄ O ₇)	Crítico	Sem planta industrial nacional; CETEM detém <i>know-how</i> em escala piloto por extração por solvente, sem conversão à escala produtiva. Importação como único suprimento corrente.	Estagnação industrial. Avanço tecnológico isolado no CETEM, sem correspondência em investimento produtivo
Síntese de fósforos para LEDs (YAG:Ce, nitretos, sialons)	Parcial	Competência laboratorial consolidada em universidades; produção industrial nacional ausente. Dependência de	Avanço científico relevante nas últimas duas décadas; gap tecnológico-industrial persiste sem

Competência	Nível	Descrição do domínio em 2025	Evolução nas últimas décadas
		importação de fósforos formulados.	iniciativas de transferência identificadas.
Síntese de complexos luminescentes para OLEDs	Incipiente	P&D universitário de alto nível (de Sá et al., USP–UFRN); sem escala industrial ou transferência tecnológica em curso.	Publicações de alto impacto e reconhecimento internacional; distância crítica entre laboratório e aplicação industrial.
Cintiladores para imagem médica (TC, detectores de raios X)	Parcial	IPEN com competência estabelecida em CsI:TI e materiais similares; <i>gap</i> relevante em LSO:Ce e Gd ₂ O ₂ S:Tb de grau médico.	Avanço contínuo em dosimetria e materiais para radiodiagnóstico; limitado a nichos específicos sem escala industrial.
Nanopartículas luminescentes para bioimagem e PDT	Emergente	Grupos de pesquisa ativos na USP, UNICAMP, UFRJ e UFMG; produção científica crescente; patentes em número ainda limitado.	Novo segmento em formação; crescimento acelerado de publicações a partir de 2015; ausência de plataforma de escalonamento.
Marcadores de segurança documental (cédulas, documentos oficiais)	Pleno	Domínio técnico consolidado na Casa da Moeda do Brasil e grupos parceiros; ativo estratégico de elevada barreira à replicação.	Competência histórica acumulada; oportunidade de expansão para autenticação de documentos digitais e rastreabilidade de produtos.
Amplificadores de fibra óptica dopada com Er³⁺ (EDFA)	Incipiente	Pesquisa em algumas universidades; sem produção nacional de fibras ou componentes EDFA. Dependência integral de importações asiáticas.	Estagnação tecnológica-industrial; crescimento da demanda por comunicações de alta capacidade não induziu resposta produtiva doméstica.
Conversores espectrais para fotovoltaica (<i>upconversion/downconversion</i>)	Incipiente	Grupos de pesquisa ativos na UFPE e UFRGS; novo segmento sem infraestrutura de escalonamento.	Crescente interesse alinhado à agenda solar nacional; potencial estratégico elevado, mas inserção industrial inexistente
Recuperação e reciclagem de TR de dispositivos ao final de vida útil	Incipiente	Projetos de pesquisa emergentes; sem infraestrutura industrial ou cadeia logística reversa estruturada para lâmpadas e LEDs.	Novo campo impulsionado pela PNRS e pela agenda de minerais críticos; janela estratégica aberta, demandando ação coordenada.

Legenda: Níveis de competência: *Pleno* — domínio tecnológico e industrial estabelecido; capacidade de PD&I e produção em escala comercial; *Parcial* — produção nacional existente, mas com dependência tecnológica externa em componentes críticos; *Emergente* — escala piloto ou demonstração; competência tecnológica consolidada, industrialização em curso; *Incipiente* — pesquisa laboratorial ativa; sem transferência tecnológica ou produção em escala relevante; *Crítico* — ausência de capacidade produtiva nacional; dependência integral de importação ou de insumo externo.

Fonte: Revisão da literatura técnica e consultas a especialistas (2025–2026).

A análise da competência atual da cadeia produtiva de fósforos à base de TR no Brasil considerou de forma diferenciada as etapas de separação e obtenção de precursores de alta pureza, síntese e formulação de fósforos, as aplicações em iluminação e *displays*, medicina e biomedicina e a recuperação e reciclagem de dispositivos contendo TR, ao final de sua vida útil. Em cada um desses eixos, o País apresenta graus distintos de domínio tecnológico, capacidade produtiva, inserção em redes globais de PD&I e acesso a insumos críticos, incluindo TR de alta pureza.

O padrão geral que emerge dessa análise é de uma cadeia com robustez tecnológica acumulada, especialmente em síntese de materiais luminescentes, bioimagem e segurança documental, mas com severa descontinuidade entre as escalas laboratorial e industrial. A ausência de planta nacional de separação e purificação de TR constitui o gargalo estrutural que limita todos os demais elos (ver Capítulo 11 para análise consolidada deste gargalo): sem precursores de alta pureza disponíveis domesticamente, a transição de qualquer segmento do nível incipiente ou parcial para o nível pleno permanece dependente de insumos importados, majoritariamente da China.

8.5.1 Separação e obtenção de precursores de alta pureza — Nível: Crítico

A obtenção de óxidos de terras raras de alta pureza — Y_2O_3 , Eu_2O_3 , Gd_2O_3 , CeO_2 e Tb_4O_7 — constitui o gargalo estrutural mais crítico da cadeia de fósforos contendo TR no Brasil. O País não dispõe de planta industrial nacional capaz de produzir esses compostos nas especificações exigidas pela indústria de iluminação e dispositivos eletrônicos (pureza $\geq 99,99\%$). O CETEM acumulou *know-how* relevante em processos de extração por solvente e precipitação seletiva em escala piloto, mas esse conhecimento não foi convertido em capacidade produtiva. A dependência de importações — majoritariamente da China, responsável por cerca de 85% da oferta global de compostos de TR processados — expõe todos os elos a jusante a riscos de abastecimento e volatilidade de preços (USGS, 2026; IEA, 2024). A resolução desse gargalo é condição *sine qua non* para o avanço autônomo de todos os demais elos da cadeia.

8.5.2 Síntese de fósforos para LEDs (YAG:Ce, nitretos, sialons) — Nível: Parcial

O Brasil possui competência científica consolidada na síntese laboratorial de fósforos para LEDs, com grupos de pesquisa em universidades como USP, UFRJ e UFMG produzindo resultados de alto nível em YAG:Ce³⁺, nitretos e oxinitretos dopados com Eu²⁺ e Ce³⁺ (Pires; Heer; Güdel, 2006; Felipe et al., 2020). Contudo, a transição dessa competência científica para a produção industrial permanece bloqueada pela ausência de precursores de alta pureza disponíveis domesticamente e pela inexistência de plantas de síntese em escala. A indústria de iluminação instalada no País — concentrada na Zona Franca de Manaus — opera com fósforos integralmente importados, principalmente da China e da Alemanha (Nichia; Intematix). Esse hiato entre P&D e industrialização representa uma perda expressiva de valor agregado e vulnerabilidade estratégica diante da crescente demanda por LEDs de alta eficiência cromática no mercado nacional (EPE, 2025; McKittrick; Shea-Rohwer, 2014).

8.5.3 Síntese de complexos luminescentes de TR para OLEDs — Nível: Incipiente

A síntese de complexos luminescentes de lantanídeos para aplicações em OLEDs representa uma das áreas de maior excelência científica do Brasil nesse campo. O grupo liderado por Gilberto de Sá, com colaborações entre USP e UFRN, produziu contribuições reconhecidas internacionalmente em complexos

de Eu^{3+} , Tb^{3+} e Sm^{3+} com ligantes β -dicetonatos e polipiridínicos, com publicações em periódicos de alto fator de impacto (de Sá et al., 2000; Bünzli e Eliseeva, 2011). Contudo, essa excelência não se converteu em transferência tecnológica, registros patentários expressivos ou parcerias com a indústria de *displays*. O segmento de OLEDs é dominado por empresas sul-coreanas (Samsung, LG) e japonesas, com cadeias de fornecimento fechadas e altamente integradas. Para o Brasil, a janela de oportunidade reside no licenciamento de complexos proprietários e na parceria com fabricantes de materiais funcionais, estratégia que requer política ativa de proteção intelectual (INPI, 2024).

8.5.4 Cintiladores para imagem médica (TC, detectores de raios X) — Nível: Parcial

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) detém competência estabelecida no desenvolvimento de materiais cintiladores, com histórico relevante em CsI:Tl , LiF:Mg,Ti e compostos para dosimetria termoluminescente (Yukihara e McKeever, 2011; IPEN, 2024). Contudo, o domínio tecnológico em cintiladores de alto desempenho baseados em TR — como $\text{Lu}_2\text{SiO}_5\text{:Ce}$ (LSO:Ce), utilizado em tomografia por emissão de pósitrons (PET), e $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ (GOS:Tb), aplicado em detectores de raios X para TC — permanece parcial, restrito à escala laboratorial e a nichos específicos. A produção industrial desses materiais é controlada por poucos fabricantes globais, como Saint-Gobain Crystals e Hitachi Metals, com tecnologia protegida por patentes robustas (Niki; Yoshikawa, 2015). A demanda crescente do sistema de saúde brasileiro por equipamentos de diagnóstico por imagem configura mercado cativo que poderia justificar investimento nacional nesse segmento (ANS, 2024).

8.5.5 Nanopartículas luminescentes para bioimagem e PDT — Nível: Emergente

O Brasil possui grupos de pesquisa ativos e produtivos no desenvolvimento de nanopartículas luminescentes de TR para aplicações biomédicas, com destaque para as áreas de bioimagem celular e molecular por upconversion ($\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$, $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$) e terapia fotodinâmica (PDT) assistida por nanopartículas (Idris et al., 2012; Bharat e Bharat, 2024). Grupos na USP, UNICAMP, UFRJ e UFMG publicam regularmente em periódicos internacionais de alto impacto, com crescente incorporação de abordagens de funcionalização superficial e conjugação com biomoléculas-alvo. O número de patentes depositadas por instituições brasileiras nesse segmento ainda é limitado, sinalizando que a competência científica não foi acompanhada de estratégia sistemática de proteção intelectual (INPI, 2024). A consolidação desse segmento como plataforma tecnológica com potencial de mercado requer infraestrutura de escalonamento, acesso a precursores de alta pureza e parcerias com a indústria farmacêutica e de equipamentos médicos.

8.5.6 Marcadores de segurança documental — Nível: Pleno

Este é o único segmento da cadeia de fósforos de TR em que o Brasil alcançou domínio tecnológico pleno, com capacidade de P&D e produção estabelecidas. A Casa da Moeda do Brasil (CMB) desenvolveu, ao longo de décadas, competência própria na formulação de tintas e compostos luminescentes à base de TR para autenticação de cédulas, passaportes e documentos oficiais, explorando as propriedades de emissão espectral específica de complexos de Eu^{3+} , Tb^{3+} e Dy^{3+} sob excitação UV (CMB, 2023; Bünzli e Eliseeva, 2013). Esse ativo estratégico apresenta elevada barreira à replicação, combinando *know-how* tácito, infraestrutura dedicada e sigilo tecnológico institucional. A fronteira de expansão natural desse domínio

reside na autenticação de documentos digitais, rastreabilidade de produtos de alto valor e certificação de insumos críticos — segmentos em expansão acelerada com o avanço da economia digital brasileira.

8.5.7 Amplificadores de fibra óptica dopada com Er^{3+} (EDFA) — Nível: Incipiente

Os amplificadores de fibra óptica dopada com érbio (EDFA — *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*) constituem componente essencial das redes de comunicações de alta capacidade, operando na janela espectral de 1.550 nm com base na emissão característica do Er^{3+} (Desurvire, 1994). O Brasil não possui produção nacional de fibras ópticas dopadas com Er^{3+} nem de módulos EDFA, dependendo integralmente de importações da Ásia e da Europa. A pesquisa universitária no tema está presente em algumas instituições com trabalhos em vidros e fibras especiais, mas sem articulação com demanda industrial ou programa de substituição de importações. O crescimento acelerado do tráfego de dados no Brasil, impulsionado pela expansão da internet de alta velocidade e dos data centers, amplia progressivamente a dependência de componentes fotônicos importados. Este segmento representa uma janela estratégica não explorada, com interface direta com a política industrial de semicondutores e fotônica.

8.5.8 Conversores espectrais para fotovoltaica (upconversion/downconversion) — Nível: Incipiente

A aplicação de materiais fotoluminescentes de TR como conversores espectrais em células fotovoltaicas — por meio dos processos de upconversion (UC) e downconversion (DC) — representa uma das fronteiras mais promissoras para o aumento da eficiência de painéis solares além do limite de Shockley-Queisser (de Wild et al., 2011; Shen et al., 2022). No Brasil, grupos de pesquisa na UFPE e na UFRGS têm investigado materiais UC baseados em $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ e $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ com potencial de integração em células de silício e perovskita, com publicações em periódicos internacionais especializados. A relevância estratégica desse segmento é amplificada pela posição do Brasil como um dos maiores mercados solares do mundo, com capacidade instalada superior a 40 GW em 2025 (ABSOLAR, 2025; IRENA, 2025). A ausência de iniciativas de escalonamento e de programas de financiamento direcionados mantém o campo na fronteira científica sem conversão em vantagem industrial.

8.5.9 Recuperação e reciclagem de dispositivos ao final de vida útil — Nível: Incipiente

A recuperação de TR a partir de lâmpadas fluorescentes e LEDs ao final de vida útil — notadamente Y, Eu, Tb, Ce e La presentes nos fósforos — é reconhecida internacionalmente como fonte secundária estratégica de minerais críticos (IEA, 2024; Binnemans et al., 2013).

No Brasil, esse segmento permanece incipiente: inexistem plantas industriais de recuperação de fósforos de TR e a cadeia logística reversa de lâmpadas, embora prevista na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei 12.305/2010), opera de forma fragmentada e com baixas taxas de coleta efetiva. No entanto, grupos de pesquisa têm investigado rotas alternativas para recuperação de óxidos de TR a partir de pós de lâmpadas fluorescentes pós-consumo, com resultados promissores em escala laboratorial (por exemplo, CETEM, FFCLRP/USP; IQ/USP; Escola Politécnica/USP). Destaca-se o processo de recuperação e reciclagem de fósforos de lâmpadas fluorescentes descartadas desenvolvido pelo Laboratório de Terras Raras do Departamento de Química da FFCLRP/USP, que oferece rota ambientalmente mais segura e operacionalmente mais eficiente em comparação às vias convencionais — aspecto de relevância

estratégica dado que o pó fosfórico presente nessas lâmpadas pode atingir até 25% em massa de TR nas formulações trifósforo.

A janela estratégica é real, mas requer coordenação entre política de resíduos, financiamento industrial e desenvolvimento tecnológico. Nesse contexto, o mapeamento dos grupos de pesquisa ativos no Brasil constitui etapa essencial para identificar as competências disponíveis, as lacunas a suprir e as parcerias estratégicas a construir. A partir de levantamento realizado junto à Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa do MCTI e ao Diretório de Grupos de Pesquisa no Brasil do CNPq, foi possível identificar 36 grupos que desenvolvem linhas de pesquisa relacionadas à cadeia produtiva de fósforos à base de TR (Tabela 8.6).

8.5.10 Grupos de pesquisa nacionais ativos em fósforos à base de TR

Tabela 8.6 Principais grupos de pesquisa brasileiros em síntese e aplicações de fósforos à base de TR no Brasil (2025)

Grupo de pesquisa	Instituição	Linhas de pesquisa em fósforos à base de TR	Potencial de aplicação industrial
LLUMES – Laboratório de Luminescência em Materiais e Sensores	FCT / Universidade Estadual Paulista (Unesp)	Complexos de lantanídeos e metais de transição; materiais luminescentes contendo lantanídeos para sensores ópticos e fósforos.	Fósforos para iluminação e <i>displays</i> , sensores ópticos e dispositivos de leitura óptica.
Grupo de Defeitos em Semicondutores e Dielétricos	Depto. de Física e Meteorologia da FC/Unesp Bauru	Semicondutores e óxidos dopados com terras raras; defeitos e centros luminescentes para aplicações em fósforos e dispositivos ópticos.	Dispositivos optoeletrônicos, LEDs, detectores, componentes semicondutores para telecomunicações e sensores.
LaCCeF – Grupo de Compósitos e Cerâmicas Funcionais	FCT / Universidade Estadual Paulista (Unesp)	Nanomarcadores e sondas luminescentes; nanomateriais com íons terras raras para marcação biológica, sensores químicos e dispositivos ópticos.	Sondas biomédicas, sensores químicos, dispositivos para diagnóstico e rastreabilidade industrial.
SupraMMat – Laboratório de Materiais Supramoleculares	Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)	Síntese de marcadores luminescentes e MOFs contendo terras raras para aplicações em fotônica, sensores e marcação biológica.	Marcadores para diagnósticos clínicos, sensores químicos e de gases, materiais para armazenamento/controle de luz.
BSTR – Laboratório de Terras Raras	Depto. de Química Fundamental (DQF) / UFPE	Química de coordenação, engenharia e caracterização de materiais termossensíveis, fotônica para química forense, fototeragnóstica e liberação controlada de fármacos para tratamento de câncer de mama.	Marcadores luminescentes lantanídicos para diagnóstico de câncer, autenticação forense, rastreabilidade balística, sensores ambientais e revestimentos aeroespaciais funcionais.
Grupo de Arquitetura de Nanodispositivos Fotônicos e Bioinspirados	Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)	Complexos de coordenação com lantanídeos; nanodispositivos fotônicos e optoeletrônicos dopados com terras raras.	Guias de onda, dispositivos fotônicos integrados, componentes optoeletrônicos para telecomunicações e sensores.
Grupo de Fotônica Aplicada	Depto. de Eletrônica e Sistemas (DES) / UFPE	Conversores espectrais para fotovoltaica; fibras ópticas dopadas com Er e outros lantanídeos; dispositivos fotônicos baseados em terras raras.	Aumento de eficiência de células solares, amplificadores ópticos de telecomunicações, fibras especiais e componentes para redes ópticas.
LFM – Laboratório de Materiais Fotônicos	Instituto de Química / USP	Síntese e caracterização de fósforos inorgânicos dopados com íons lantanídicos; luminescência persistente; conversão espectral por	Conversores espectrais para LEDs e OLEDs de luz branca; marcadores luminescentes para bioimagem e diagnóstico médico;

Grupo de pesquisa	Instituição	Linhas de pesquisa em fósforos à base de TR	Potencial de aplicação industrial
		up- e down-conversion em matrizes óxidas e oxissulfetos; transferência de energia em materiais fotônicos; filmes e vidros transparentes luminescentes.	nanopartículas para terapia fotodinâmica; pigmentos persistentes para sinalização de segurança; amplificadores ópticos para telecomunicações.
Laboratório de Elementos do Bloco f	IQ / Universidade de São Paulo (USP)	Dispositivos eletro/fotoluminescentes à base de terras raras; espectroscopia de lanthanídeos; polímeros e materiais híbridos luminescentes com terras raras.	OLEDs, LEDs, dispositivos de exibição, materiais de segurança anti-falsificação e marcadores industriais.
CePOF – Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica	USP – São Carlos	Materiais híbridos luminescentes com lanthanídeos; materiais fotônicos micro/mesoporosos; estudos espectroscópicos de sólidos com propriedades ópticas e magnéticas.	Fibras e componentes fotônicos, lasers de estado sólido, sensores ópticos especializados.
LTR – Laboratório de Terras Raras	Depto. de Química da FFCLRP / USP	Materiais luminescentes contendo terras raras; LEDs; fósforos para iluminação e reciclagem de terras raras de lâmpadas fluorescentes.	Fósforos para lâmpadas e LEDs; processos industriais de reciclagem de TR de resíduos de iluminação.
LQES – Laboratório de Química do Estado Sólido	Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)	Química de coordenação e sólido-estado de terras raras para materiais luminescentes; síntese de fosfatos para uso como fósforos em dispositivos luminosos; obtenção de terras raras a partir de pó fosfórico de lâmpadas fluorescentes.	OLEDs, displays de alta eficiência, iluminação de estado sólido e dispositivos emissores finos.
LMF-Unicamp – Laboratório de Materiais Funcionais	Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)	Materiais luminescentes e para fotônica; sistemas multicomponentes nanoestruturados dopados com terras raras.	Fósforos para LEDs, materiais para lasers, sensores, catalisadores luminescentes e dispositivos fotônicos integrados.
Grupo de Materiais Nanoestruturados Funcionais	Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)	Nanomateriais luminescentes e supermoléculas contendo terras raras para biodiagnóstico, diagnóstico ambiental e aplicações fotônicas.	Kits de diagnóstico, biossensores ópticos, marcadores para imagem biomédica e sensores ambientais.
Química Supramolecular e Nanotecnologia de Elementos f	Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)	Polímeros e supermoléculas com íons de terras raras; materiais de persistência luminescente; nanopartículas magnéticas/luminescentes; separação de elementos f.	Fármacos e marcadores luminescentes, materiais de segurança (marcas ocultas), sensores, processos de separação de TR para a cadeia produtiva.
LPCM – Laboratório de Preparação e Caracterização de Materiais	Universidade Federal de Sergipe (UFS)	Propriedades ópticas de materiais e filmes, incluindo óxidos e vidros dopados com terras raras.	Revestimentos ópticos, vidros especiais e filmes para sensores e dispositivos fotônicos.
LLUMIN – Laboratório de Luminescência	Grupo de Física de Materiais / Universidade Federal de Goiás (UFG)	Síntese e caracterização de materiais luminescentes, com foco em fósforos dopados com terras raras.	Iluminação e telas (LEDs/OLEDs), conversão de energia solar, sensores biológicos e marcação; tintas luminescentes invisíveis sob UV para segurança e anti-falsificação.
Compostos Inorgânicos e Organometálicos das Terras Raras	Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)	Síntese e caracterização de compostos inorgânicos e organometálicos de lanthanídeos; propriedades fotoluminescentes de matrizes dopadas com Eu^{3+} , Tb^{3+} , Er^{3+} , Sm^{3+} , Yb^{3+} .	Marcadores luminescentes, fósforos para LEDs e displays, materiais para sensores e dispositivos de segurança.

Grupo de pesquisa	Instituição	Linhas de pesquisa em fósforos à base de TR	Potencial de aplicação industrial
Complexos Inorgânicos com Íons Lantanídeos(III)	Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)	Complexos inorgânicos de lantanídeos(III) com propriedades emissoras.	Sondas luminescentes, materiais para sensores, tintas de segurança e componentes de dispositivos ópticos.
LOEM – Laboratório de Espectroscopia Óptica e Optoeletrônica Molecular	PUC-Rio	Dispositivos optoeletrônicos orgânicos baseados em complexos de Eu^{3+} e Tb^{3+} ; filmes finos e dispositivos eletroluminescentes; espectroscopia óptica de materiais lantanídicos.	Diodos emissores orgânicos (OLEDs com complexos de TR), <i>displays</i> , guias de onda, filmes para dispositivos optoeletrônicos.
Espalhamento de Luz e Medidas Elétricas / Fotônica	Universidade Federal do Ceará (UFC)	Propriedades luminescentes de íons terras raras em matrizes amorfas e cristalinas; espectroscopia em vidros e cristais.	Amplificadores ópticos, dispositivos de comunicação óptica, sensores em fibras e vidros especiais.
Grupo de Lasers e Óptica Biomédica Aplicada	Universidade Federal de São Paulo (Unifesp)	Moléculas e filmes luminescentes para fluoróforos e filmes eletroluminescentes; fluorimetria óptica e resolvida no tempo.	Dispositivos de diagnóstico óptico, fluoróforos clínicos, filmes para biossensores e dispositivos emissores.
Estudo e Desenvolvimento de Materiais	Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS)	Síntese e caracterização de materiais luminescentes dopados com terras raras.	Fósforos para iluminação, marcadores luminescentes e materiais para sensores.
Termoquímica de Materiais	Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)	Vidros luminescentes via sol-gel; nanocomplexos lantanídicos; lentes oftálmicas com propriedades espectroscópicas.	Lentes ópticas especiais (oftálmicas e técnicas), vidros para lasers e dispositivos fotônicos, revestimentos luminescentes.
GMF – Grupo de Pesquisa em Materiais Fotônicos	Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)	Marcadores ópticos luminescentes e dispositivos moleculares para ensaios clínicos com lantanídeos.	Ensaio clínicos, testes diagnósticos, marcadores para biotecnologia e rastreabilidade de produtos.
Grupo de Fotônica	Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)	Espectroscopia de íons terras raras em vidros especiais; vidros para dispositivos fotônicos e amplificadores ópticos.	Amplificadores ópticos, fibras e componentes para telecomunicações, sensores ópticos.
Grupo de Pesquisa Sol-Gel	Universidade de Franca (UNIFRAN)	Síntese sol-gel de nanomateriais luminescentes; vidros e filmes ópticos dopados com Ce, Eu, Tb e outros lantanídeos.	Vidros e filmes para lasers, guias de onda, LEDs, dispositivos fotônicos e materiais de marcação de segurança.
LNMI – Novos Materiais Isolantes e Semicondutores	Universidade Federal de Uberlândia (UFU)	Dispositivos fotônicos planares; vidros e cristais dopados com terras raras; luminescência e óptica não linear em vidros nanoestruturados.	Dispositivos fotônicos integrados, amplificadores ópticos, componentes para telecomunicações e sensores avançados.
Metrologia de Materiais e Nanotecnologia	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro)	Metrologia em difração e espectroscopia óptica; padrões de luminescência em materiais dopados com TR.	Certificação de LEDs, lâmpadas, <i>displays</i> , vidros e fósforos; calibração de equipamentos e criação de padrões metrológicos para a cadeia de TR.
GPQF – Grupo de Pesquisa em Química de Fluoretos	Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)	Fluoretos de terras raras; processos de upconversion; sondas biomédicas e fósforos fluoretados de TR.	Fósforos fluoretados para LEDs e lasers, sondas biomédicas, dispositivos de upconversion para sensores e fotônica.
LaMi – Laboratório de Materiais e Interfaces	Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)	Nanopartículas de terras raras; síntese por rotas úmidas/sol-gel; aplicações biomédicas e fotônicas.	Nanopartículas para imagem médica, sensores ópticos, dispositivos fotônicos e materiais de contraste avançados.

Grupo de pesquisa	Instituição	Linhas de pesquisa em fósforos à base de TR	Potencial de aplicação industrial
LAQUIS – Laboratório de Química de Superfícies	IQ / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)	Fotoabsorção e fotoemissão de compostos orgânicos eletroluminescentes com complexos de lantanídeos (Eu^{3+} , Tb^{3+}); fotodegradação de materiais orgânicos e estudos de superfícies.	<i>Displays</i> e iluminação OLED com complexos de TR; telas flexíveis, painéis de iluminação de design e wearables.
LMF – Laboratório de Materiais Fotossensíveis	Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)	Modificações estruturais para alterar propriedades ópticas; complexos de Eu^{3+} e Tb^{3+} ; materiais luminescentes para segurança, marcação anticópia e bioimagem.	Materiais luminescentes para segurança, marcação anticópia e bioimagem.
LABSOL – Laboratório de Energia Solar	Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)	Conversores espectrais para energia fotovoltaica ($\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$) e fósforos para LEDs	Concentradores solares luminescentes (LCSs), estabilização de células de perovskitas de próxima geração, fósforos para LEDs.
Centro de Metrologia das Radiações Ionizantes (CMRI)	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)	Desenvolvimento de materiais cintiladores, com histórico relevante em CsI:Tl , LiF:Mg,Ti e compostos para dosimetria termoluminescente.	Proteção radiologia ocupacional, segurança de fronteiras e aeroportos, sistemas de medicação e controle de processos industriais.
LQMM – Laboratório de Química de Materiais Magnéticos	Universidade Federal do Pará (UFPA)	Nanopartículas multifuncionais de terras raras com propriedades magneto-ópticas.	Agentes de contraste magneto-ópticos, sistemas para imagem e terapia guiada, sensores magneto-ópticos avançados.

Fontes: Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa do MCTI; Diretório de Grupos de Pesquisa no Brasil do CNPq e sites institucionais.

O Brasil dispõe de uma rede expressiva e geograficamente distribuída de grupos de pesquisa dedicados à síntese e às aplicações de fósforos à base de terras raras (TR), abrangendo instituições públicas de ensino superior, centros de pesquisa nuclear e institutos de metrologia. O mapeamento realizado identificou 36 grupos ativos em 2025, concentrados principalmente nas regiões Sudeste e Nordeste, com presença crescente no Centro-Oeste, Sul e Norte do país.

A maior densidade de grupos encontra-se no estado de São Paulo, onde se destacam laboratórios vinculados à USP, à Unesp e à Unicamp. O Laboratório de Materiais Fotônicos (LMF) do Instituto de Química da USP sobressai pela abrangência temática, atuando em luminescência persistente, conversão espectral por *up-* e *down-conversion*, fósforos para LEDs e OLEDs, além de nanopartículas para terapia fotodinâmica. O Laboratório de Química do Estado Sólido (LQES) da Unicamp complementa esse ecossistema com foco em síntese de fosfatos luminescentes e recuperação de TR a partir de resíduos de lâmpadas fluorescentes — linha estratégica para a circularidade da cadeia produtiva nacional.

Em Pernambuco, a Universidade Federal (UFPE) abriga ao menos quatro grupos relevantes com abordagens complementares: o SupraMMat, dedicado a MOFs luminescentes e fotônica; o BSTR, com atuação pioneira em química forense, fototeragnóstica e liberação controlada de fármacos; o Grupo de Fotônica Aplicada, focado em conversores espectrais para células solares e amplificadores ópticos; e o Grupo de Arquitetura de Nanodispositivos Fotônicos, voltado a componentes optoeletrônicos para telecomunicações.

Instituições federais de outras regiões também contribuem significativamente. A Universidade Federal de Goiás (UFG) mantém o LLUMIN, com atuação em iluminação, conversão de energia solar e tintas luminescentes para segurança. A UFRN desenvolve pesquisa em fluoretos de TR e processos de upconversion com aplicações em LEDs, lasers e sondas biomédicas. A UFPA explora nanopartículas magneto-ópticas multifuncionais com potencial em imageamento para aplicações médicas e terapia guiada — frente ainda incipiente no país, mas de alto valor estratégico.

Dois atores institucionais merecem atenção especial. O Inmetro, por meio do grupo de Metrologia de Materiais e Nanotecnologia, desempenha papel estruturante ao desenvolver padrões de luminescência e certificar LEDs, lâmpadas, *displays* e fósforos — atividade essencial para a consolidação de uma cadeia produtiva nacional com qualidade assegurada. O IPEN, por sua vez, por meio do Centro de Metrologia das Radiações Ionizantes (CMRI), atua no desenvolvimento de materiais cintiladores e dosímetros termoluminescentes, com aplicações em proteção radiológica e segurança de fronteiras.

Do ponto de vista das trajetórias tecnológicas, os grupos brasileiros cobrem um espectro amplo: iluminação de estado sólido (LEDs/OLEDs), fotovoltaica, diagnóstico biomédico, segurança e autenticação de documentos, telecomunicações ópticas e materiais funcionais avançados. Essa pluralidade reflete tanto a versatilidade intrínseca dos lantanídeos quanto a maturidade crescente da pesquisa nacional em fotônica e materiais luminescentes.

O desafio que se coloca, contudo, é a transição desse conhecimento acumulado para aplicações industriais. A maioria dos grupos opera predominantemente em escala laboratorial, com alguns mecanismos de interface com o setor produtivo. Fortalecer essa ponte — por meio de programas de inovação orientada a missões, parcerias com empresas e incentivos à escala-piloto — representa a próxima fronteira estratégica para o ecossistema brasileiro de fósforos à base de terras raras.

8.6 Visão de futuro da cadeia produtiva de fósforos à base de TR no Brasil – horizonte 2040

8.6.1 Enunciado da Visão

“Em 2040, o Brasil consolida uma cadeia produtiva competitiva e sustentável de fósforos à base de TR, integrando produção nacional de precursores de alta pureza, síntese e formulação de fósforos de desempenho internacional e aplicação industrial em iluminação eficiente, saúde diagnóstica e segurança pública, com inserção crescente nos mercados global e regional e contribuição mensurada à descarbonização e à soberania tecnológica do País.”

Esse enunciado posiciona o Brasil não apenas como fornecedor de matérias-primas, mas como ator integrado ao longo de toda a cadeia de valor — da lavra e separação de TR à formulação de fósforos de alto desempenho e sua inserção em mercados tecnológicos de fronteira. Os fósforos representam uma rota de agregação de valor intensiva em conhecimento, compatível com competências científicas já existentes no país.

8.6.2 Dimensões estratégicas e objetivos para 2040

A partir desse referencial, foram estabelecidas cinco dimensões fundamentais que articulam, simultaneamente, a lógica da cadeia produtiva (montante–jusante), a base de competências tecnológicas e industriais, e os vetores de política pública e sustentabilidade. Para cada dimensão, o Quadro 8.4 apresenta o diagnóstico da situação atual, os objetivos estratégicos prioritários e a situação-alvo projetada para 2040.

Quadro 8.4 Objetivos estratégicos para alcance da visão de futuro 2040 da cadeia produtiva de fósforos à base de TR

Dimensão	Situação atual	Objetivos estratégicos	Situação 2040
Estrutura da cadeia e integração a montante (recursos e precursores fosforescentes)	– Ausência de plantas industriais de separação de TR voltadas a aplicações em fósforos. – Dependência integral de importação de óxidos de alta pureza (Y_2O_3, Eu_2O_3, Tb_4O_7, Gd_2O_3, Ce_2O_3). <i>Know-how</i> de separação e síntese de precursores fosforescentes limitado a escala laboratorial (universidades, Casa da Moeda). – Exportação de concentrado para refino externo. Baixíssima integração entre mineração e indústria de dispositivos luminescentes.	Construir cadeia integrada da mina ao dispositivo luminescente, com fornecimento doméstico de precursores fosforescentes de alta pureza.	– Capacidade instalada de separação e refino de TR para usos em fósforos superior a 2.000 t/ano de óxidos. – Fornecimento doméstico atende >50% da demanda nacional de precursores fosforescentes. – Produção nacional de pelo menos 3 famílias de fósforos comerciais (YAG:Ce, nitretos, fósforos vermelhos Eu^{3+}). – Cadeia integrada da mina ao dispositivo luminescente em operação, com rastreabilidade e certificação de origem.
Segmentos de aplicação e competências tecnológicas	– LEDs e <i>displays</i>: competência científica robusta (USP, Unicamp, UFRJ, UFPE), sem transferência para escala industrial. – Aplicações médicas/bioimagem: grupos de excelência com publicações de alto impacto, poucos produtos comerciais. – Marcadores de segurança: competência única da Casa da Moeda, restrita a aplicações oficiais. – Fotônica emergente: pesquisa de fronteira, sem aplicações comerciais.	– Consolidar produção nacional de fósforos para LEDs, aplicações médicas e marcadores de segurança – Estabelecer reciclagem comercial – Desenvolver aplicações fotônicas emergentes.	– Brasil reconhecido como produtor regional de fósforos para LEDs de alta eficiência e iluminação sustentável. – Produção nacional de fósforos para aplicações médicas consolidada, atendendo >30% da demanda interna. – Marcadores luminescentes nacionais adotados em pelo menos 3 setores industriais (farmacêutico, automotivo, agroindustrial). – Recuperação de TR de fósforos exauridos consolidada como fonte secundária, representando >10% da oferta doméstica de Y, Eu e Tb.

Dimensão	Situação atual	Objetivos estratégicos	Situação 2040
	– Reciclagem de fósforos: projetos-piloto, sem operação comercial.		– Pelo menos 2 aplicações fotônicas emergentes (conversores PV, sensores) em fase de comercialização.
P&D, inovação e recursos humanos	• Aproximadamente 35 grupos de pesquisa ativos em luminescência e fósforos de TR, concentrados no eixo SP-RJ-MG-Sul. • Competência científica sólida em síntese, caracterização e aplicações. Ausência de proteção patentária expressiva (Brasil ausente do top 30 global em fósforos). • Infraestrutura laboratorial dispersa, sem plataformas integradas de síntese em escala piloto. • Formação de RH concentrada em pós-graduação (Química, Física, Engenharia de Materiais), com baixa articulação com demandas industriais.	Criar ecossistema robusto de inovação com proteção patentária, infraestrutura compartilhada, formação de RH e startups de base tecnológica.	• Portfólio brasileiro de patentes em fósforos base TR superior a 180 documentos, com pelo menos 8% de patentes licenciadas ou em uso comercial. • Plataforma nacional de P,D&I operacional, com infraestrutura de síntese piloto, caracterização fotônica avançada e modelagem computacional. • Formação anual de >40 profissionais especializados (mestrado/doutorado) em luminescência e fósforos. • Pelo menos 4 <i>startups</i> de base tecnológica atuando em fósforos funcionais, dispositivos luminescentes e reciclagem de TR.

Dimensão	Situação atual	Objetivos estratégicos	Situação 2040
Mercado, inserção internacional e política industrial	- Demanda interna estimada em US\$ 90-120 milhões/ano, atendida integralmente por importações (China, Japão, Coreia do Sul, Europa). - Participação brasileira em exportações de fósforos nula. - Instrumentos de política industrial em construção (PNMCE, Fundo BNDES de Minerais Críticos, NIB 2024-2033). - Ausência de mecanismos de preferência para TR e fósforos nacionais em compras públicas. - Indústria nacional de iluminação LED (R\$ 18 bilhões/ano) totalmente dependente de fósforos importados.	Posicionar o Brasil como fornecedor regional de fósforos sustentáveis e hub regional de produção de fósforos e materiais luminescentes estabelecido, com instrumentos de política consolidados.	- Mercado brasileiro de fósforos base TR superior a US\$ 300 milhões/ano, com >40% de conteúdo nacional em precursores e produtos selecionados. - Brasil figura entre os fornecedores regionais relevantes de fósforos para iluminação sustentável e aplicações de alto valor. - Instrumentos de política industrial consolidados e em operação regular. - Hub regional de produção de fósforos e materiais luminescentes estabelecido, com investimentos >US\$ 150 milhões.
Regulação, sustentabilidade e economia circular	- Marco regulatório de eficiência energética em iluminação estabelecido (INMETRO, Procel), mas com lacunas em rastreabilidade de componentes críticos. - Regulação mineral em revisão (PNMCE em tramitação). - Ausência de padrões específicos de circularidade para fósforos e dispositivos luminescentes. - Iniciativas de reciclagem de TR de lâmpadas/LEDs em estágio experimental (IPT, CETEM). - PNRS estabelecida, com baixa implementação para resíduos de equipamentos de iluminação contendo TR.	Alinhar regulação a padrões internacionais, implementar logística reversa, certificação de sustentabilidade e rastreabilidade consolidada como diferencial competitivo da cadeia.	- Regulação brasileira de eficiência energética e rotulagem convergente com padrões IEA e UE. PNMCE plenamente operacional, com instrumentos de incentivo e controle efetivos. - Sistema de logística reversa operacional para lâmpadas e LEDs, recuperando >60% dos dispositivos ao fim de vida. - Recuperação de TR de fósforos exauridos atinge >50% do potencial técnico. - Certificação de sustentabilidade e rastreabilidade consolidada como diferencial competitivo da cadeia.

8.7 Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Fósforos de Terras Raras: 2026-2040

O Mapa do Caminho Estratégico organiza a trajetória de evolução da cadeia produtiva de fósforos à base de TR ao longo de quinze anos, articulando, de forma sequenciada e interdependente, marcos regulatórios, investimentos produtivos, desenvolvimento tecnológico e formação de capacidades, em alinhamento com os direcionadores estabelecidos no Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de Terras Raras no Brasil: 2026–2040 (Capítulo 3). A lógica subjacente é a de que cada período prepara as condições de viabilidade do período seguinte, razão pela qual as decisões tomadas no curto prazo têm peso desproporcional sobre o resultado final.

A trajetória estratégica 2026–2040 estrutura-se em três horizontes temporais complementares:

- **Horizonte 1 (H1) – Fundações institucionais e ativação dos primeiros elos da cadeia (2026–2030):** Consolidação da infraestrutura científica e regulatória, lançamento dos primeiros investimentos produtivos e mapeamento sistemático de lacunas tecnológicas e de mercado.
- **Horizonte 2 (H2) – Escalonamento rumo à consolidação da cadeia de valor (2031–2035):** Transição da escala laboratorial para plantas-piloto e produção industrial, integração vertical entre produtores de precursores, formuladores de fósforos e usuários finais e fortalecimento de consórcios empresa–ICT, acompanhados por revisões periódicas do *Roadmap* para ajuste de diretrizes e metas.
- **Horizonte 3 (H3) – Consolidação industrial e maior protagonismo internacional (2036–2040):** Operação plena da cadeia integrada, com exportação de produtos de alto valor agregado, conformidade a normas internacionais de sustentabilidade e posicionamento competitivo nos mercados regional e global.

O horizonte 1 (2026–2030) é decisivo para a cadeia de fósforos, pois define, por meio de investimentos, regulação e capacitação, a possibilidade de avanço em valor agregado. Nesse período, o suprimento de precursores de alta pureza — incluindo materiais como YAG:Ce e nitretos dopados — permanecerá dependente de importações, uma vez que a capacidade nacional de refino e produção integrada ainda não estará plenamente estabelecida. Essa condição configura uma vulnerabilidade estrutural que deve ser considerada explicitamente no desenho das estratégias e instrumentos de política pública (Quadro 8.5).

O horizonte 2 (H2) representa a conversão das bases construídas anteriormente em capacidade produtiva real. A ênfase migra da estruturação para a operacionalização: trata-se de fechar os elos da cadeia, superar os gargalos de escalonamento que tipicamente paralisam a transição piloto–indústria e consolidar as condições para uma competitividade técnica e econômica sustentável (Quadro 8.6).

O horizonte 3 (H3) representa a maturação da posição estratégica do Brasil na cadeia global de fósforos de TR. O país deverá, nesse horizonte, não apenas suprir sua demanda interna com produção nacional de alto desempenho, mas também projetar-se como fornecedor regional e global de produtos de maior valor agregado, com rastreabilidade e desempenho ambiental mensuráveis (Quadro 8.7).

Quadro 8.5 Mapa do Caminho Estratégico da cadeia produtiva de fósforos à base de TR – Horizonte 1 (H1): Curto prazo (2026-2030)

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Estrutura da cadeia e integração a montante	Concluir estudos de viabilidade técnico-econômica para implantação de planta industrial de separação de TR voltada a aplicações em fósforos (capacidade inicial: 500-1.000 t/ano de óxidos de alta pureza Y, Eu, Tb, Gd, Ce).	2026-2027	MME, CETEM, BNDES, empresas de mineração (CBMM, Serra Verde, outros), universidades parceiras
	Mapear e caracterizar fluxos de TR na cadeia de fósforos: concentrados disponíveis, precursores importados, fósforos em uso (iluminação, <i>displays</i> , equipamentos médicos) e resíduos pós-consumo (inventário nacional).	2026-2027	MME, ANM, CETEM, INMETRO, Universidades, IPT, associações setoriais (ABILUX, ABINEE)
	Estruturar Grupo de Trabalho Interministerial (GT-TR Fósforos) para articular políticas de mineração, energia, ciência e tecnologia, indústria e saúde aplicadas à cadeia.	2026	Casa Civil, MME, MCTI, MDIC, MS, MMA
	Lançar linha de financiamento específica do BNDES (Fundo de Minerais Críticos) para projetos de separação, síntese de precursores fosforescentes e reciclagem de TR de dispositivos luminescentes.	2027	BNDES, MME, MCTI, MDIC
	Realizar projeto-piloto de síntese de precursores YAG:Ce e nitretos dopados em escala de quilogramas (validação técnica para futura escala industrial).	2027-2028	Unicamp, USP, UFRJ, CETEM, Casa da Moeda, empresas interessadas
Segmentos de aplicação e competências tecnológicas	Desenvolver projeto cooperativo universidade-empresa para produção de fósforos YAG:Ce para LEDs brancos em escala piloto (kg/mês).	2027-2028	USP, Unicamp, UFRJ, UFPE, empresas de iluminação (nacionais ou subsidiárias), EMBRAPPI
	Ampliar portfólio de marcadores luminescentes de segurança da Casa da Moeda para aplicações industriais (rastreadibilidade de produtos, antifalsificação).	2026-2028	Casa da Moeda, MCTI, empresas parceiras (farmacêutico, automotivo, agroindustrial)
	Desenvolver rota laboratorial otimizada de recuperação de Y, Eu e Tb de lâmpadas	2026-2028	IPT, CETEM, USP, Unicamp, UFRJ, empresas de gestão de resíduos

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	fluorescentes e LEDs pós-consumo, com validação em escala de bancada.		
	Criar programa cooperativo para desenvolvimento de cintiladores e sondas luminescentes nacionais para aplicações médicas (TC, raios X, bioimagem).	2027-2028	USP, Unicamp, UFRJ, IPEN, hospitais de referência, empresas de equipamentos médicos
	Mapear oportunidades de aplicação de fósforos de TR em conversores espectrais para fotovoltaica (<i>upconversion</i> , <i>downconversion</i>) e realizar provas de conceito.	2027-2028	Unicamp, UFSC, USP, centros de energia solar, empresas de PV
P&D, inovação e recursos humanos	Criar Rede Nacional de PD&I em Fósforos e Materiais Luminescentes de TR, articulando os 30+ grupos de pesquisa mapeados, ICTs, Casa da Moeda e empresas em plataforma colaborativa.	2027	MCTI, CNPq, FINEP, EMBRAPPII, Sociedade Brasileira de Química, Sociedade Brasileira de Física
	Lançar Chamada Pública de P&D (R\$ 25-40 milhões) voltada a fósforos base TR para iluminação sustentável, <i>displays</i> , aplicações médicas e reciclagem.	2027	FINEP, CNPq, FAPESP, FAPERJ, FAPEMIG, empresas (Lei do Bem)
	Modernizar infraestrutura laboratorial de síntese e caracterização de fósforos em pelo menos 5 ICTs (fornos de alta temperatura, espectroscopia resolvida no tempo, microscopia eletrônica, difração de raios X).	2026-2028	MCTI, FINEP, universidades, CETEM, IPT, IPEN
	Estabelecer programa de formação de recursos humanos em fotoluminescência, síntese de fósforos e aplicações optoeletrônicas, com bolsas específicas de mestrado/doutorado (meta: 40 bolsas/ano).	2027-2028	CAPES, CNPq, empresas via programas de P&D
	Promover workshop anual de integração universidade-empresa-governo focado em fósforos, materiais luminescentes e TR (modelo: SBQ, SBF, eventos temáticos).	2027-2028	MCTI, SBQ, SBF, MME, MDIC, empresas, universidades
Mercado, inserção	Regulamentar e implementar a Política Nacional de Minerais Críticos e	2026-2027	Congresso Nacional, MME, MCTI, MDIC, Casa Civil

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
internacional e política industrial	Estratégicos (PNMCE), incluindo TR e fósforos como itens prioritários.		
	Realizar estudo de mercado detalhado sobre demanda atual e projetada de fósforos base TR no Brasil e América Latina (2026-2040), por segmento (LEDs, <i>displays</i> , médico, segurança, fotônica).	2026-2027	MDIC, MCTI, BNDES, consultorias especializadas, associações setoriais (ABILUX, ABINEE, ABIMO)
	Estabelecer instrumento piloto de preferência em compras públicas para dispositivos luminescentes (iluminação pública LED) com conteúdo tecnológico nacional demonstrável.	2027-2028	MDIC, MME, MCTI, prefeituras parceiras, empresas de iluminação
	Iniciar negociações para acordos de cooperação técnica com países líderes em fósforos e separação de TR (Japão, Coreia do Sul, UE, EUA).	2027-2028	MRE, MCTI, MME, MDIC, universidades
	Mapear e prospectar fabricantes globais de fósforos, LEDs e <i>displays</i> para potencial atração de investimentos e parcerias no Brasil.	2027-2028	MDIC, APEX-Brasil, estados (agências de desenvolvimento), BNDES
Regulação, sustentabilidade e economia circular	Elaborar diagnóstico nacional sobre geração, destino e potencial de recuperação de fósforos exauridos em lâmpadas fluorescentes, LEDs e equipamentos médicos.	2026-2027	MMA, ANM, IBAMA, INMETRO, universidades, IPT, CETEM, empresas geradoras
	Revisar e atualizar normas técnicas da ABNT e regulamentos do INMETRO para especificação, rotulagem e descarte de dispositivos luminescentes contendo fósforos de TR.	2027-2028	ABNT, INMETRO, MMA, MDIC, universidades, empresas do setor
	Desenvolver piloto de logística reversa para lâmpadas fluorescentes e LEDs com foco em recuperação de TR em duas regiões metropolitanas (São Paulo e Belo Horizonte).	2027-2028	MMA, SINIR, prefeituras, fabricantes de lâmpadas/LEDs, cooperativas de catadores, IPT, CETEM
	Estabelecer grupo técnico para elaboração de metodologia nacional de avaliação de	2027-2028	Universidades, IBICT, ABNT, INMETRO, empresas, MCTI

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	ciclo de vida (LCA) de fósforos e dispositivos luminiscentes base TR.		
	Capacitar equipes de órgãos ambientais estaduais e municipais em gestão de resíduos de equipamentos de iluminação contendo TR e mercúrio.	2027-2028	MMA, IBAMA, órgãos estaduais de meio ambiente, IPT, CETEM

Quadro 8.6 Mapa do Caminho Estratégico da cadeia produtiva de fósforos à base de TR — Horizonte 2 (H2): Médio prazo (2031-2035)

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Estrutura da cadeia e integração a montante	Iniciar a operação da primeira planta industrial de separação e refino de TR para aplicações em fósforos (capacidade: 500-1.000 t/ano de óxidos de alta pureza).	2031-2033	Consórcio empresarial (mineradoras, empresas de materiais, investidores), BNDES, MME, MCTI
	Estabelecer contratos de fornecimento de longo prazo entre produtores de óxidos de TR e fabricantes de fósforos/dispositivos luminescentes (<i>take-or-pay</i>).	2031-2033	Produtores de TR, empresas de iluminação/ <i>displays</i> , Casa da Moeda, empresas médicas
	Implantar linha piloto de síntese de fósforos YAG:Ce e nitretos dopados (capacidade: dezenas de kg/mês), com validação de especificações técnicas para uso em LEDs comerciais.	2031-2033	Consórcio universidade-empresa, EMBRAPPII, BNDES, empresas de iluminação
	Expandir capacidade de separação para 1.500-2.000 t/ano de óxidos, incorporando rotas de menor impacto ambiental (extração com líquidos iônicos, processos bio-assistidos).	2032-2034	Operadores de plantas, CETEM, universidades, BNDES
	Implantar sistema digital de rastreabilidade de TR da mina ao dispositivo luminescente (blockchain ou equivalente), com certificação de origem sustentável.	2031-2033	ANM, MME, MCTI, empresas da cadeia, startups de tecnologia
Segmentos de aplicação e competências tecnológicas	Iniciar produção comercial de fósforos YAG:Ce nacionais para LEDs de iluminação, atendendo pelo menos 15% da demanda interna de dispositivos de iluminação pública.	2031-2033	Empresas nacionais ou joint-ventures, universidades parceiras, EMBRAPPII
	Desenvolver e comercializar pelo menos 1 família de fósforos para aplicações médicas (cintiladores GOS:Tb ou LSO:Ce para TC/raios X, ou sondas de bioimagem).	2032-2034	USP, Unicamp, UFRJ, IPEN, empresas de equipamentos médicos, FINEP, BNDES

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	Ampliar portfólio de marcadores luminescentes da Casa da Moeda para aplicações industriais em pelo menos 2 setores (farmacêutico, automotivo ou agroindustrial).	2031-2033	Casa da Moeda, MCTI, empresas parceiras dos setores-alvo
	Iniciar operação comercial de rota de recuperação de Y, Eu e Tb de lâmpadas fluorescentes e LEDs pós-consumo (capacidade-alvo: recuperação de >100 t/ano de óxidos).	2032-2034	IPT, CETEM, operadores especializados em reciclagem, empresas de gestão de resíduos, BNDES
	Desenvolver protótipos funcionais de conversores espectrais para fotovoltaica (upconversion/downconversion) com fósforos de TR, com testes em células solares comerciais.	2032-2034	Unicamp, UFSC, USP, centros de energia solar, empresas de PV, EMBRAPPII
	Validar em escala piloto pelo menos 1 aplicação fotônica emergente (amplificadores de fibra óptica Er ³⁺ , sensores, fósforos para mini-LEDs/micro-LEDs).	2033-2034	Universidades, ICTs, startups, empresas de telecomunicações/ <i>displays</i>
P&D, inovação e recursos humanos	Implantar Centro de Referência Nacional em Materiais Fotoluminescentes e Fósforos de TR com infraestrutura compartilhada de síntese piloto, caracterização fotônica avançada e prototipagem de dispositivos.	2031-2033	MCTI, FINEP, BNDES, consórcio de universidades (USP, Unicamp, UFRJ, UFPE, UFSC), ICTs, empresas
	Aumentar depósitos de patentes brasileiras em fósforos base TR para >15/ano, com foco em síntese, processamento, aplicações em LEDs/ <i>displays</i> /médico e reciclagem.	2031-2034	Universidades, ICTs, Casa da Moeda, empresas, INPI, escritórios de propriedade intelectual
	Incorporar design computacional (DFT, machine learning) para descoberta e otimização de novos fósforos em pelo menos 5 grupos de pesquisa.	2031-2034	USP, Unicamp, UFRJ, UFSC, UFPE, empresas de tecnologia, MCTI
	Formar cumulativamente >100 mestres/doutores especializados em fotoluminescência, síntese de fósforos de TR e aplicações optoeletrônicas.	2031-2034	CAPES, CNPq, universidades, programas de pós-graduação em Química, Física, Eng. de Materiais
	Apoiar criação e consolidação de pelo menos 3 startups de base tecnológica em fósforos funcionais, dispositivos	2031-2034	FINEP, BNDES (BNDES Garagem), EMBRAPPII, aceleradoras, universidades, parques tecnológicos

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	luminescentes sustentáveis e reciclagem de TR.		
Mercado, inserção internacional e política industrial	Ampliar mercado interno de fósforos base TR para US\$ 150-200 milhões/ano, com participação crescente de produção nacional em segmentos selecionados (iluminação, segurança).	2031-2034	Empresas do setor, políticas de conteúdo tecnológico nacional, compras públicas
	Iniciar exportações regulares de fósforos e marcadores luminescentes especializados para países da América Latina (meta: >US\$ 10 mi/ano até 2034).	2031-2034	Empresas nacionais, Casa da Moeda, APEX-Brasil, MDIC, MRE
	Atrair pelo menos um fabricante global de fósforos, LEDs ou <i>displays</i> para estabelecer centro de P&D ou linha de produção no Brasil.	2031-2033	MDIC, estados (incentivos fiscais), BNDES, MCTI, empresas-alvo
	Implementar instrumento de financiamento subsidiado para aquisição de dispositivos luminescentes com conteúdo nacional de fósforos >25% (linhas BNDES, FINEP).	2031-2032	BNDES, FINEP, MME, MCTI, MDIC
	Estabelecer pelo menos 2 acordos de cooperação técnica ou joint-ventures com empresas/institutos líderes (Nichia, NIMS, Osram, Signify, Samsung, LG) para transferência de tecnologia.	2031-2034	MRE, MCTI, MDIC, universidades, empresas brasileiras
Regulação, sustentabilidade e economia circular	Implementar instrumento de financiamento subsidiado para aquisição de dispositivos luminescentes com conteúdo nacional de fósforos >25% (linhas BNDES, FINEP).	2031-2033	BNDES, FINEP, MME, MCTI, MDIC
	Estabelecer pelo menos 2 acordos de cooperação técnica ou joint-ventures com empresas/institutos líderes (Nichia, NIMS, Osram, Signify, Samsung, LG) para transferência de tecnologia.	2031-2034	MRE, MCTI, MDIC, universidades, empresas brasileiras
	Operacionalizar sistema de logística reversa para lâmpadas fluorescentes e LEDs em escala nacional, com meta de	2031-2034	MMA, SINIR, fabricantes de lâmpadas/LEDs, importadores, distribuidores, cooperativas

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	recuperação de >40% dos dispositivos ao fim de vida.		
	Estabelecer acordo setorial para recuperação de TR de resíduos de fósforos, com participação de fabricantes, importadores e recicladores.	2031-2034	MMA, empresas da cadeia de iluminação/ <i>displays</i> , operadores de reciclagem, IPT, CETEM
	Publicar metodologia nacional de avaliação de ciclo de vida (LCA) para fósforos e dispositivos luminescentes contendo TR, com banco de dados brasileiro de inventários.	2031-2033	Universidades, IBICT, ABNT, INMETRO, empresas, MCTI
	Desenvolver e publicar padrões de certificação de origem e qualidade para fósforos nacionais (normas ABNT/INMETRO), com reconhecimento por órgãos internacionais.	2031-2033	ABNT, INMETRO, universidades, empresas, organismos internacionais de normalização
	Alinhar progressivamente regulação de eficiência energética e rotulagem de dispositivos luminescentes aos padrões IEA e UE, com consulta pública e <i>roadmap</i> publicado.	2032-2034	INMETRO, MME, MCTI, MDIC, fabricantes, importadores, associações setoriais

Quadro 8.7: Roadmap Estratégico da cadeia produtiva de fósforos à base de TR — Horizonte 3 (H3): Longo prazo (2036-2040)

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Estrutura da cadeia e integração a montante	Alcançar capacidade instalada de separação e refino de TR para usos em fósforos >2.000 t/ano de óxidos, atendendo >50% da demanda nacional de precursores fosforescentes.	2036-2040	Consórcios empresariais, operadores de plantas, BNDES
	Consolidar produção nacional de pelo menos 3 famílias de fósforos comerciais (YAG:Ce, nitretos dopados Eu/Ce, fósforos vermelhos YOX:Eu ou nitratos) em escala industrial (toneladas/ano).	2036-2040	Empresas produtoras, universidades parceiras, EMBRAPPI
	Estabelecer o Brasil como exportador regional de precursores fosforescentes de alta pureza e fósforos selecionados para América Latina (meta: >US\$ 20 mi/ano).	2037-2040	Produtores de TR e fósforos, APEX-Brasil, MDIC, MRE

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	Operar sistema de rastreabilidade digital plenamente funcional, com certificação de origem sustentável reconhecida internacionalmente e adotada por >70% da cadeia.	2036-2040	Empresas da cadeia, órgãos reguladores, certificadoras internacionais, MCTI
Segmentos de aplicação e competências tecnológicas	Produção nacional de fósforos para LEDs de iluminação atende >30% da demanda interna de dispositivos de iluminação pública e comercial.	2036-2040	Empresas de fósforos e iluminação, políticas de conteúdo nacional
	Consolidar produção e comercialização de fósforos para aplicações médicas (cintiladores, sondas), atendendo >30% da demanda interna e iniciando exportações.	2036-2040	Empresas de materiais médicos, universidades, IPEN, hospitais
	Marcadores luminescentes nacionais adotados em pelo menos 3 setores industriais (farmacêutico, automotivo, agroindustrial) além de aplicações oficiais.	2036-2038	Casa da Moeda, empresas parceiras dos setores, MCTI
	Recuperação de TR de fósforos exauridos (lâmpadas, LEDs) consolidada como fonte secundária, representando >10% da oferta doméstica de Y, Eu e Tb.	2036-2040	Operadores de reciclagem, IPT, CETEM, empresas da cadeia
	Comercializar pelo menos 2 aplicações fotônicas emergentes com fósforos de TR (conversores espectrais para PV, amplificadores de fibra, fósforos para micro-LEDs/ <i>displays</i> avançados).	2036-2040	Startups consolidadas, empresas de tecnologia, universidades, ICTs
	Desenvolver e validar fósforos de nova geração com controle de FWHM <20 nm para <i>displays</i> de altíssima fidelidade cromática (<i>quantum-dot competitors</i>).	2037-2040	Grupos de pesquisa de fronteira, empresas de <i>displays</i> , EMBRAPA
P&D, inovação e recursos humanos	Portfólio brasileiro de patentes em fósforos base TR superior a 180 documentos, com pelo menos 8% de patentes licenciadas ou em uso comercial.	2036-2040	Universidades, ICTs, Casa da Moeda, empresas, INPI
	Centro de Referência Nacional em Materiais Fotoluminescentes operando em regime pleno, com >15 projetos cooperativos empresa-ICT anuais e infraestrutura aberta.	2036-2040	MCTI, consórcio de ICTs, universidades e empresas, agências de fomento
	Formação anual de >40 profissionais especializados (mestrado/doutorado) em fotoluminescência, síntese de fósforos de TR e dispositivos optoeletrônicos.	2036-2040	CAPES, CNPq, universidades, empresas via P&D

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	Consolidar pelo menos 5 grupos de pesquisa com competência plena em design computacional de fósforos (DFT, machine learning, <i>screening</i> virtual), com publicações de alto impacto.	2036-2040	USP, Unicamp, UFRJ, UFSC, UFPE, empresas de tecnologia, MCTI
	Pelo menos 4 startups de base tecnológica operando comercialmente em fósforos funcionais, dispositivos luminescentes sustentáveis, reciclagem e serviços especializados.	2036-2040	Ecosistema de inovação, FINEP, BNDES, aceleradoras, parques tecnológicos
	Pelo menos 2 <i>spin-offs</i> acadêmicos ou <i>joint-ventures</i> com empresas globais consolidadas e gerando receita (licenciamento, produtos, serviços).	2037-2040	Universidades, empresas, escritórios de transferência de tecnologia, investidores
Mercado, inserção internacional e política industrial	Mercado brasileiro de fósforos base TR superior a US\$ 300 milhões/ano, com >40% de conteúdo nacional em precursores e produtos selecionados.	2036-2040	Empresas da cadeia, políticas públicas consolidadas
	Brasil figura entre os fornecedores regionais relevantes de fósforos para iluminação sustentável, aplicações médicas e marcadores de segurança (exportações >US\$ 30 mi/ano).	2037-2040	Empresas nacionais, Casa da Moeda, APEX-Brasil, MDIC, MRE
	Hub regional de P&D e produção de fósforos e materiais luminescentes estabelecido, atraindo investimentos de >US\$ 150 milhões e gerando >400 empregos diretos qualificados.	2036-2040	Governos federal e estaduais, empresas, universidades, investidores
	Instrumentos de política industrial (PNMCE, conteúdo tecnológico nacional, compras públicas, financiamento subsidiado) consolidados e em operação regular, com avaliação periódica de impacto.	2036-2040	MME, MCTI, MDIC, BNDES, órgãos de controle, entidades setoriais
	Pelo menos 3 acordos de cooperação técnica ou <i>joint-ventures</i> com líderes globais em operação, com transferência efetiva de tecnologia e co-desenvolvimento de produtos.	2036-2040	MRE, MCTI, MDIC, empresas brasileiras, parceiros internacionais

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Regulação, sustentabilidade e economia circular	Regulação brasileira de eficiência energética e rotulagem de dispositivos luminescentes alinhada com padrões IEA e UE, com harmonização de requisitos.	2036-2038	INMETRO, MME, MCTI, MDIC, organismos internacionais
	Sistema de logística reversa operacional para lâmpadas e LEDs em escala nacional, recuperando >60% dos dispositivos ao fim de vida.	2036-2040	MMA, SINIR, empresas da cadeia de iluminação, cooperativas, operadores de reciclagem
	Recuperação de TR de fósforos exauridos atinge >50% do potencial técnico (taxa de recuperação relativa ao conteúdo disponível nos resíduos coletados).	2037-2040	IPT, CETEM, operadores de reciclagem, empresas
	Certificação de sustentabilidade (LCA, pegada de carbono, rastreabilidade) consolidada como diferencial competitivo da cadeia brasileira, adotada por >80% dos produtores e exportadores.	2037-2040	Empresas, certificadoras, associações setoriais, compradores internacionais, ABNT, INMETRO
	Publicação de inventário nacional de impacto ambiental e circular da cadeia de fósforos base TR (emissões evitadas, recursos recuperados, eficiência energética alcançada).	2038-2040	MCTI, MMA, universidades, empresas, IBGE, INMETRO
	Normas ABNT/INMETRO para fósforos nacionais reconhecidas por organismos internacionais de normalização (ISO, IEC), facilitando exportações.	2037-2040	ABNT, INMETRO, ISO, IEC, empresas, universidades
	Regulação brasileira de eficiência energética e rotulagem de dispositivos luminescentes alinhada com padrões IEA e UE, com harmonização de requisitos.	2036-2038	INMETRO, MME, MCTI, MDIC, organismos internacionais

O Quadro 8.8 apresenta a síntese do Mapa do Caminho Estratégico em perspectiva temporal comparativa, permitindo visualizar a trajetória de evolução esperada para cada dimensão estratégica ao longo do horizonte 2026-2040.

Quadro 8.8: Síntese do Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Fósforos à Base de TR: Metas estratégicas por horizonte

Dimensão	Objetivo estratégico	Metas estratégicas		
		H1 – Fundações institucionais e ativação dos primeiros elos da cadeia (2026-2030)	H2 – Escalonamento rumo à consolidação da cadeia de valor (2031-2035)	H3 – Consolidação industrial e maior protagonismo internacional
Estrutura da cadeia e integração a montante	Construir cadeia integrada da mina ao dispositivo luminescente, com fornecimento doméstico de precursores fosforescentes de alta pureza	Estudos de viabilidade e GT interministerial. Mapeamento de fluxos de TR. Lançamento de financiamento BNDES. Inventário nacional. Projeto-piloto síntese YAG:Ce e nitretos (kg).	Operação da 1ª planta industrial de separação (500-1.000 t/ano óxidos). Contratos de fornecimento de longo prazo. Linha piloto síntese YAG:Ce/nitretos (dezenas kg/mês). Expansão para 1.500-2.000 t/ano. Rastreabilidade digital (blockchain).	Capacidade >2.000 t/ano de óxidos. Fornecimento doméstico atende >50% da demanda. Produção nacional de 3 famílias de fósforos (t/ano). Exportação de precursores para AL (>US\$ 20 mi/ano). Certificação de origem reconhecida internacionalmente.
Segmentos de aplicação e competências tecnológicas	Consolidar produção nacional de fósforos para LEDs, aplicações médicas e marcadores de segurança; estabelecer reciclagem comercial; desenvolver aplicações fotônicas emergentes	Projeto cooperativo YAG:Ce piloto (kg/mês). Ampliação portfólio marcadores (Casa da Moeda). Rota laboratorial recuperação Y/Eu/Tb. Programa cintiladores/sondas médicos. Provas de conceito conversores PV.	Produção comercial YAG:Ce (15% demanda iluminação pública). 1 família fósforos médicos comercializada. Marcadores em 2 setores industriais. Recuperação comercial Y/Eu/Tb (>100 t/ano óxidos). Protótipos conversores PV funcionais. 1 aplicação fotônica validada (piloto).	Fósforos nacionais para LEDs atendem >30% demanda interna. Fósforos médicos atendem >30% demanda + exportações. Marcadores em 3 setores industriais. Reciclagem: >10% oferta doméstica Y/Eu/Tb. 2 aplicações fotônicas comercializadas. Fósforos FWHM <20 nm desenvolvidos.

P&D, inovação e recursos humanos	Criar ecossistema robusto de inovação com proteção patentária, infraestrutura compartilhada, formação de RH e startups de base tecnológica	Rede Nacional P,D&I (30+ grupos). Chamada pública R\$ 25-40 mi. Modernização de 5 ICTs. 40 bolsas/ano mestrado/doutorado. Workshop anual universidade-empresa-governo.	Centro de Referência Nacional operacional. >15 patentes/ano. Design computacional (DFT, ML) em 5 grupos. >100 mestres/doutores formados. 3 startups criadas.	Portfólio >180 patentes (8% licenciadas). Centro em regime pleno (>15 projetos/ano). Formação: >40 profissionais/ano. 5 grupos com design computacional consolidado. 4 startups operando comercialmente. 2 spin-offs/JVs consolidados.
Mercado, inserção internacional e política industrial	Posicionar Brasil como fornecedor regional de fósforos sustentáveis e hub de P&D, com instrumentos de política consolidados	Regulamentação PNMCE. Estudo de mercado 2026-2040. Preferência em compras públicas (piloto). Negociação de acordos internacionais. Mapeamento/prospecção de fabricantes globais.	Mercado US\$ 150-200 mi/ano. Exportações >US\$ 10 mi/ano (AL). Atração de 1 fabricante global (P&D/produção). Financiamento subsidiado (conteúdo nacional >25%). 2 acordos cooperação/JVs com líderes globais.	Mercado >US\$ 300 mi/ano (>40% conteúdo nacional). Exportações >US\$ 30 mi/ano (iluminação, médico, segurança). Hub regional: >US\$ 150 mi investidos, >400 empregos. 3 acordos cooperação/JVs operacionais. Instrumentos de política consolidados.
Regulação, sustentabilidade e economia circular	Alinhar regulação a padrões internacionais, implementar logística reversa e certificação de sustentabilidade como diferencial competitivo	Diagnóstico de fósforos exauridos. Atualização normas ABNT/INMETRO. Piloto logística reversa (SP/BH). GT metodologia LCA. Capacitação órgãos ambientais.	Logística reversa nacional operacional (>40% recuperação). Acordo setorial recuperação TR de fósforos. Metodologia LCA publicada. Padrões certificação ABNT/INMETRO publicados. Roadmap alinhamento eficiência energética IEA/UE.	Regulação convergente IEA/UE (2036-2038). Logística reversa: >60% dispositivos recuperados. Recuperação TR: >50% potencial técnico. Certificação sustentabilidade: >80% da cadeia. Inventário nacional de impacto publicado. Normas reconhecidas ISO/IEC.

8.8 Considerações

A análise apresentada neste capítulo revelou que a cadeia produtiva de fósforos à base de TR no Brasil configura um cenário de oportunidade estratégica histórica, ainda amplamente inexplorada. O País combina ativos únicos, as segundas maiores reservas mundiais de TR, base científica de nível mundial em luminescência de lantanídeos, mercado interno expressivo em iluminação, saúde diagnóstica e segurança pública, com fragilidades estruturais que, se não superadas, consolidarão a dependência tecnológica e econômica nesse setor de alto valor agregado.

O elemento mais crítico (e mais urgente) dessa lacuna estrutural é a inexistência de plantas industriais de separação e refino de TR de alta pureza no Brasil. O País exporta exclusivamente concentrado misto de TR para a China, sem separação elementar e sem qualquer etapa de processamento que agregue valor.

Para o segmento de fósforos à base de TR, as consequências são diretas e imediatas: sem óxidos de alta pureza produzidos domesticamente, como Eu_2O_3 , Y_2O_3 , Tb_4O_7 e CeO_2 hoje importados da China, não há cadeia produtiva de fósforos viável no País, por mais robusto que seja o ecossistema de pesquisa acadêmica identificado neste capítulo. Superar esse gargalo é, portanto, condição necessária, ainda que não suficiente, para que o Brasil transite de exportador de *commodity* mineral para produtor de materiais luminescentes de alto valor agregado com inserção competitiva nos mercados globais de iluminação, *displays* e tecnologias da transição energética. A demanda por fósforos dependerá da evolução das arquiteturas de iluminação e *displays* atualmente em desenvolvimento.

A segunda prioridade é a criação de mecanismos que viabilizem a transferência dos resultados acumulados pelos grupos de pesquisa universitários em síntese de materiais luminescentes para a escala industrial. Estima-se que o Brasil possua mais de 200 especialistas em luminescência de TR com produção científica internacionalmente reconhecida, mas o ecossistema de inovação carece de mecanismos eficazes de transferência tecnológica, financiamento de risco e parcerias industriais que convertam esse conhecimento em produtos industrializáveis e patenteáveis no País. O desenvolvimento da cadeia provavelmente envolverá cooperação tecnológica, licenciamento e integração a redes globais de inovação.

O horizonte 2040 não é distante, porém demanda ação coordenada e imediata. As transformações tecnológicas em curso, como a revolução dos micro-LEDs, expansão dos OLEDs, crescimento da biofotônica e da fotovoltaica avançada e economia circular, redesenham continuamente o mapa de valor da cadeia de fósforos de TR.

O Brasil que chegar a 2040 sem ter resolvido o gargalo da separação industrial de precursores e sem ter construído competência industrial em síntese de fósforos de desempenho estará irremediavelmente à margem dessas cadeias de valor. O país possui competências científicas relevantes em materiais luminescentes, que podem servir de base para iniciativas de desenvolvimento tecnológico e industrial. O País que resolver esses desafios até 2030, em contrapartida, estará posicionado para capturar parte crescente do mercado regional e global, contribuir para a segurança energética, a soberania em saúde e a segurança pública nacional, e exportar tecnologia e produtos de alto valor agregado a partir de suas abundantes reservas de TR. O momento de agir é agora.

O Capítulo 9, último capítulo do Bloco II, trata dos pós para polimento óptico de precisão e dos vidros e lentes especiais à base de cério, lantânio e outros elementos. O capítulo identifica o gancho mais concreto para a indústria brasileira nessas cadeias: a substituição de importações em segmentos ópticos de precisão e vidreiros, onde a demanda doméstica é estável e a produção nacional é praticamente inexistente. A leitura do conjunto do Bloco II prepara o terreno para o desenho estratégico que o Bloco III articula, a partir do Capítulo 10.

Capítulo 9

Cadeia produtiva de materiais para aplicações ópticas avançadas no Brasil

Este capítulo apresenta as principais aplicações ópticas avançadas baseadas em terras raras (TR), com destaque para pós de polimento de alta precisão (óxido de cério) e vidros e lentes dopados ou magneto-ópticos. Em seguida, caracteriza a cadeia produtiva de materiais para essas aplicações e apresenta um levantamento de patentes atualizado para o período de 2012 a 2025. Na sequência, identifica as competências existentes no Brasil ao longo das diferentes etapas da cadeia, com ênfase nos pontos críticos e nas janelas de oportunidade no horizonte 2026–2040. Por fim, o capítulo apresenta uma visão de futuro para a cadeia produtiva, bem como um roadmap estratégico estruturado em três horizontes temporais, em alinhamento com os direcionadores estabelecidos no Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Integrada de Terras Raras no Brasil: 2026–2040 (Capítulo 3).

9.1 Metodologia adotada¹⁴

O primeiro instrumento organiza as aplicações ópticas avançadas à base de TR em dez segmentos funcionais: pós de CeO_2 para polimento óptico de vidros e lentes; polimento químico-mecânico de semicondutores (CMP); descoloração e estabilização óptica de vidros planos e de embalagem; absorção seletiva de radiação UV em vidros e embalagens; coloração decorativa e funcional de vidros e cerâmicas; vidros ópticos de alto índice de refração com La_2O_3 ; lentes oftálmicas especiais com Ce e Eu; lentes de proteção para soldagem e fundição com Nd/Pr (didímio); filtros e vidros de calibração para instrumentação óptica com Nd, Ho e Pr; e vidros especiais para defesa, aeroespacial e exploração espacial. Essa granularidade de dez segmentos reflete a heterogeneidade funcional desta cadeia, na qual aplicações de maturidade plena, como a descoloração vidreira com CeO_2 , estabelecida desde os anos 1960 (Bamford, 1977), coexistem com segmentos em crescimento acelerado, como as lamas de CeO_2 para CMP de nós tecnológicos abaixo de 10 nm (Hoshino et al., 2001; Park et al., 2023), e com segmentos em introdução, como os vidros de alto índice de refração para realidade aumentada e veículos autônomos (Grand View Research, 2024b; Mordor Intelligence, 2025). Cada segmento foi classificado segundo o ciclo de vida do produto em quatro estágios — introdução, crescimento, maturidade e declínio —, com base em três critérios combinados: grau de adoção comercial documentado na literatura técnica e em relatórios industriais, volume de investimento em pesquisa e desenvolvimento por segmento e nível de prontidão tecnológica medido pela escala *Technology Readiness Level* (TRL) (Mankins, 2009).

O segundo instrumento é o mapa de competências da cadeia produtiva nacional, que avalia, para cada elo da cadeia, da separação e purificação de CeO_2 e La_2O_3 de grau óptico à síntese de pós formulados,

¹⁴ A metodologia de levantamento patentário na base Derwent Innovations Index é a mesma descrita em detalhe no Capítulo 5 (Seção 5.3). Aqui registramos apenas as adaptações específicas para esta cadeia, quando aplicáveis.

fabricação de vidros e lentes especiais e reciclagem de pós de polimento exauridos, o domínio tecnológico efetivo, a capacidade produtiva instalada, a inserção em redes internacionais de pesquisa, desenvolvimento e inovação e o acesso a insumos críticos de TR. Esse mapeamento foi elaborado com base em revisão da literatura técnica especializada, consultas a especialistas do setor realizadas entre 2025 e 2026 e levantamento dos grupos de pesquisa nacionais ativos, conduzido junto à Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa do MCTI e ao Diretório de Grupos de Pesquisa do CNPq.

O quarto instrumento, o *roadmapping* estratégico organiza as ações segundo três horizontes temporais e cinco dimensões analíticas, estrutura da cadeia e insumos críticos, segmentos de aplicação e competências tecnológicas, P&D, inovação e recursos humanos, mercado e inserção internacional e política industrial, e regulação, sustentabilidade e economia circular, com identificação de atores responsáveis, prazos-alvo e marcos de acompanhamento por horizonte, permitindo o monitoramento contínuo da trajetória estratégica e a avaliação de resultados nas janelas de revisão previstas.

9.2 Importância estratégica da aplicação para o País

Os pós para polimento óptico à base de óxido de cério (CeO_2) constituem insumos insubstituíveis em processos industriais de alta precisão, com aplicações que abrangem desde o polimento de vidros planos para arquitetura e embalagens até o processo de planarização químico-mecânica (sigla em inglês, CMP) de *wafers* de silício na fabricação de circuitos integrados. A superioridade do CeO_2 em relação aos abrasivos tradicionais, como o óxido de ferro e o óxido de alumínio, decorre de sua ação combinada de polimento químico e mecânico. As nanopartículas de óxido de cério reagem seletivamente com a superfície de sílica do substrato, catalisando a remoção de material com rugosidade superficial resultante (R_a) inferior a 0,5 nm, que é o nível exigido em óptica de precisão e microeletrônica.

O mercado global de pós de CeO_2 para polimento e de vidros com óxidos de TR foi estimado em aproximadamente US\$ 2,4 bilhões em 2024, com projeção de alcançar US\$ 4,7 bilhões até 2033–2035, crescendo a uma taxa composta anual (CAGR) de cerca de 7,4% (Grand View Research, 2024a; MarketsandMarkets, 2025; Mordor Intelligence, 2025). Esse crescimento é impulsionado principalmente pelo avanço da indústria de semicondutores, pela crescente demanda por vidros ópticos de alto desempenho em câmeras, dispositivos médicos e sistemas de defesa, e pela consolidação da proteção UV em vidros de embalagem e lentes oftálmicas.

Nota de escopo: O valor de US\$ 2,4 bilhões agrega o segmento de polimento óptico (US\$ 650 milhões, Grand View Research, 2024a) e o segmento de vidros com óxidos de TR (saldo estimado de US\$ 1,75 bilhões). O segmento de polimento óptico é detalhado na Seção 9.3.1.¹⁵

A Tabela 9.1, a seguir, sintetiza as projeções de mercado para os principais segmentos.

Tabela 9.1 Projeções do mercado global e brasileiro de materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR: 2024–2035

¹⁵ O Capítulo 6 referente a catalisadores cita o mercado global de óxido de cério como insumo em US\$ 692 milhões (Market.us, 2025) — escopo distinto do mercado de aplicações de polimento aqui referenciado.

Segmento de mercado	Valor 2024 (US\$)	Projeção 2033–2035 (US\$)	CAGR (%)	Fontes
Pós de CeO ₂ para polimento óptico de precisão (global)	US\$ 0,65 bi (2024)	US\$ 1,3 bi (2034)	7,2%	Grand View Research, 2024a
Pós de CeO ₂ para CMP - semicondutores (global)	US\$ 0,42 bi (2024)	US\$ 0,89 bi (2033)	8,7%	MarketsandMarkets, 2025
Vidros ópticos com La ₂ O ₃ e óxidos de TR (global)	US\$ 0,98 bi (2024)	US\$ 1,85 bi (2033)	7,3%	Mordor Intelligence, 2025
Vidros especiais e lentes oftálmicas com TR (global)	US\$ 0,35 bi (2024)	US\$ 0,62 bi (2033)	6,5%	Allied Market Research, 2024
Mercado global de pós para polimento e vidros com TR (total)	US\$ 2,4 bi (2024)	US\$ 4,7 bi (2033–2035)	~7,4%	Estimativa consolidada
Mercado brasileiro estimado (pós para polimento + vidros/lentes)	US\$ 65–90 milhões	US\$ 130–200 milhões	~6,0%	Estimativa*

Nota: O mercado brasileiro é uma estimativa derivada da participação da América Latina no total global (~7%), com participação do Brasil estimada em 40–55% do total regional, considerando a presença de indústria vidreira, fabricantes de lentes e setor de semicondutores no País. Não há dados publicados diretamente para o Brasil.

Para o Brasil, a importância estratégica desta cadeia articula-se em torno de quatro dimensões principais até 2040:

- I. **Soberania tecnológica e mineração de valor:** A expansão da produção de semicondutores e painéis no Brasil, impulsionada pelo Programa Nacional de Semicondutores (PNSE) e pela Política Industrial Brasil Mais (2024), cria demanda crescente por lamas de polimento à base de CeO₂ de alta pureza para polimento químico-mecânico (CMP) — segmento integralmente importado e de crítica dependência geopolítica. A China detinha, em 2025, mais de 70% da oferta global de CeO₂ de grau CMP (USGS, 2026; Roskill, 2024).
- II. **Indústria vidreira e óptica de precisão:** O aproveitamento estratégico das reservas nacionais de TR no Brasil para produção de CeO₂ e La₂O₃ de grau óptico representaria expressivo salto de valor agregado, com potencial estimado de substituição de importações na ordem de R\$ 800 milhões/ano (CPRM, 2025; USGS, 2026).
- III. **Sustentabilidade e economia circular:** O Brasil possui a maior indústria vidreira da América Latina. A migração da descoloração com CeO₂ importado para CeO₂ nacional, somada ao desenvolvimento de vidros ópticos com La₂O₃ nacional, representa frente concreta de geração de valor em segmentos de alto crescimento como óptica para defesa, câmeras e instrumentação médica.
- IV. As lamas de polimento com CeO₂ exauridas representam fonte secundária crescente de cério passível de recuperação e reprocessamento. A regulação ambiental crescente (PNRS)

incentiva o desenvolvimento de rotas de reciclagem, área em que o Brasil possui competência científica emergente (CETEM, IPT, UFRJ).

9.3 Principais aplicações ópticas avançadas à base de TR

O Quadro 9.1 sintetiza as principais aplicações ópticas avançadas à base de TR, descrevendo a funcionalidade habilitadora de cada aplicação e os elementos TR requeridos em sua fabricação.

Quadro 9.1 Principais aplicações ópticas avançadas à base de TR

Uso industrial	Funcionalidade habilitadora	Elementos TR requeridos
Pós de polimento óptico de precisão (vidros, lentes, <i>wafers</i>)	Alta taxa de remoção de material, baixa rugosidade superficial ($R_a < 0,5 \text{ nm}$); ação combinada químico-mecânica sobre superfícies de sílica, borossilicato e <i>wafers</i> de Si/SiO ₂	Ce (CeO ₂ — principal agente abrasivo químico-mecânico)
Polimento químico-mecânico de semicondutores (<i>wafers</i> , ILDs, STI)	Remoção seletiva de camadas de SiO ₂ e Si ₃ N ₄ em processos de fabricação de circuitos integrados; partículas de CeO ₂ de granulometria controlada (d_{50} : 50–200 nm) em <i>slurry</i> aquoso	Ce (CeO ₂ de alta pureza: $\geq 99,99\%$)
Descoloração e estabilização de vidros planos e de embalagem	Oxidação de Fe ²⁺ a Fe ³⁺ , convertendo a coloração verde intensa em amarelo-azulado neutro; CeO ₂ atua como oxidante seletivo no fundido vítreo	Ce, Nd (neutralização do tom residual com Nd ₂ O ₃)
Absorção de radiação UV em vidros e embalagens	Bloqueio seletivo da faixa UV (280–380 nm) por absorção eletrônica do Ce ⁴⁺ /Ce ³⁺ ; proteção de alimentos, medicamentos e cosméticos fotossensíveis	Ce (CeO ₂ ou Ce ₂ O ₃)
Coloração decorativa e funcional de vidros e cerâmicas	Ce/Ti: amarelo dourado; Nd/Er: rosa; Nd: azul-violeta; Pr: verde esmeralda; Eu/Ce: vidros de proteção solar com transmitância seletiva	Ce, Nd, Pr, Er, Eu, Ti
Vidros ópticos de alto índice de refração (lentes de precisão)	La ₂ O ₃ eleva o índice de refração ($n > 1,80$) sem aumentar a dispersão (baixo número de Abbe); lentes mais finas e leves para câmeras, microscópios e sistemas de defesa	La (La ₂ O ₃ : 35–70% em massa; Gd, Y como coformulantes)
Lentes oftálmicas para proteção solar e filtragem espectral	Mistura Eu/Ce em lentes plásticas e de vidro para óculos solares fotocromáticos; absorção na faixa UV-A e UV-B; proteção retinal	Ce, Eu
Lentes de proteção para soldagem e fundição	Nd/Pr absorvem especificamente a linha D do sódio (589 nm) e emissões de arco elétrico; proteção da visão em soldagem, corte a laser e fundição de metais	Nd, Pr (mistura Didímio)
Filtros e vidros de calibração para instrumentação óptica	Bandas de absorção estreitas de Nd ³⁺ e Ho ³⁺ utilizadas como padrões de comprimento de onda para calibração de espectrofotômetros e sistemas ópticos de precisão	Nd, Ho, Pr (alta pureza: $\geq 99,9\%$)

Uso industrial	Funcionalidade habilitadora	Elementos TR requeridos
Vidros para defesa, aeroespacial e exploração espacial	Combinações de La_2O_3 , Gd_2O_3 e Y_2O_3 em vidros especiais com alta estabilidade térmica e transmitância controlada em faixas NIR e SWIR para sistemas de visão noturna e telescópios	La, Gd, Y, Ce

O Quadro 9.2 indica o atual grau de maturidade em nível mundial dos produtos que utilizam pós para polimento e fabricação de vidros e lentes com TR, de acordo com o conceito de ciclo de vida do produto.

Quadro 9.2 Estágio do ciclo de vida das principais aplicações ópticas avançadas à base de TR (nível mundial)

Aplicações ópticas avançadas à base de TR	Estágio do ciclo de vida (nível mundial)			
	Introdução	Crescimento	Maturidade	Declínio
Pós de CeO_2 para polimento óptico de vidros e lentes (grau óptico)				
Polimento químico-mecânico de semicondutores (CMP)				
Descoloração e estabilização óptica de vidros planos e de embalagem (CeO_2)				
Absorção seletiva de radiação UV em vidros e embalagens com CeO_2				
Coloração decorativa e funcional de vidros e cerâmicas com TR (Ce, Nd, Pr, Er, Eu)				
Vidros ópticos de alto índice de refração com La_2O_3 (lentes de precisão, câmeras)				
Lentes oftálmicas especiais com Ce e Eu (proteção solar, filtros fotocromáticos)				
Lentes de proteção para soldagem e fundição com Nd/Pr (absorção linha D do Na)				
Filtros e vidros de calibração para instrumentação óptica com Nd, Ho e Pr				
Vidros especiais para defesa, aeroespacial e exploração espacial (La, Gd, Y)				

Nota: O posicionamento no ciclo de vida foi determinado com base em: (i) grau de adoção comercial documentado na literatura técnica e em relatórios industriais; (ii) volume de investimento em PD&I por segmento; e (iii) nível de

prontidão tecnológica TRL (Technology Readiness Level). A célula sombreada indica o estágio atual de maturidade de cada aplicação.

9.3.1 Pós de CeO₂ para polimento óptico de vidros e lentes

O polimento óptico à base de dióxido de cério (CeO₂) constitui a aplicação mais antiga e volumetricamente expressiva dos TR na cadeia de vidros e óptica, consolidada ao longo de décadas como a rota padrão para o acabamento superficial de lentes oftálmicas, espelhos de precisão, prismas, vidros arquitetônicos e painéis de *display*. O mecanismo de ação do CeO₂ é distinto dos abrasivos convencionais: além do componente mecânico de remoção de material, ocorre uma reação química entre o Ce⁴⁺ e os grupos Si–OH da superfície de sílica, formando ligações Ce–O–Si que favorecem a remoção seletiva do material e resultam em rugosidade superficial (Ra) inferior a 0,5 nm, parâmetro essencial para superfícies ópticas de alta qualidade (Cook, 1990; Nanz; Camilletti, 1995).

O mercado global de pós de CeO₂ para polimento óptico foi estimado em US\$ 650 milhões em 2024, com projeção de atingir US\$ 1,3 bilhão até 2034, crescendo a CAGR de 7,2% (Grand View Research, 2024a). Os principais produtores mundiais são empresas chinesas (Shenghe Resources, Grirem, Inner Mongolia Huamei), com participação superior a 65% da capacidade instalada global. A qualidade do pó é controlada por parâmetros como distribuição granulométrica (d₅₀ tipicamente 0,5–3,0 µm para polimento óptico), teor de CeO₂ (55–99,9% em massa, dependendo da aplicação) e morfologia das partículas. A agenda de inovação concentra-se no desenvolvimento de pós com distribuição granulométrica ultrafina (d₅₀ < 200 nm) para aplicações de altíssima precisão e no aumento do teor de Ce⁴⁺ ativo, responsável pela ação química do polimento (Hoshino et al., 2001; Park et al., 2023).

9.3.2 Polimento químico-mecânico de semicondutores

O polimento químico-mecânico (CMP, do inglês *chemical mechanical planarization*) é etapa crítica na fabricação de circuitos integrados modernos, responsável pela planarização de camadas de dióxido de silício (ILD — *interlayer dielectric*), nitreto de silício e metais no processo de *back-end-of-line* (BEOL). As lamas para polimento à base de CeO₂ são preferidas para a planarização seletiva de SiO₂ em relação ao Si₃N₄, apresentando seletividade (razão de remoção SiO₂/Si₃N₄) superior a 100:1 em condições otimizadas, graças à maior reatividade química superficial do Ce⁴⁺ com o SiO₂ em comparação com abrasivos de SiO₂ ou Al₂O₃ (Krishnan et al., 2010; Park et al., 2023). O mercado global de lamas para a polimento à base de CeO₂ para CMP foi estimado em US\$ 420 milhões em 2024, com projeção de US\$ 890 milhões até 2033, crescendo a CAGR de 8,7% (MarketsandMarkets, 2025).

Os principais fabricantes dessas lamas de CeO₂ para CMP são a CMC Materials (Cabot Microelectronics, adquirida pela Entegris em 2022), a KCTech (Coreia do Sul) e empresas chinesas em rápida ascensão tecnológica. A tendência para nós tecnológicos abaixo de 5 nm impõe novos desafios às formulações das lamas: partículas com d₅₀ inferior a 50 nm, distribuição granulométrica estrita (PDI < 0,15), baixíssima contaminação metálica (< 1 ppb de cada metal) e pH preciso para controle da taxa de remoção e da seletividade. A expansão do mercado brasileiro de semicondutores impulsionada pelo Programa Nacional de Semicondutores (PNSE, 2024) e pela atração de fabricantes de *chips* e painéis cria oportunidade estratégica para desenvolvimento nacional de lamas para polimento à base de CeO₂, segmento hoje integralmente dependente de importação (MCTI, 2024; MarketsandMarkets, 2025).

9.3.3 Descoloração e estabilização óptica de vidros planos e de embalagem com CeO₂

A presença de ferro nas matérias-primas utilizadas na produção de vidros (areia, feldspato, calcário) é uma das principais causas da coloração esverdeada indesejada em vidros planos e de embalagem. O íon Fe²⁺ absorve fortemente na região do visível (~1.100 nm) e confere uma tonalidade verde intensa ao vidro, comprometendo sua transmitância e apelo estético. A adição de CeO₂ ao fundido vítreo promove a oxidação seletiva de Fe²⁺ a Fe³⁺, cujo coeficiente de absorção no visível é significativamente menor, convertendo a coloração verde em amarelo-azulado de baixa intensidade. O óxido de neodímio (Nd₂O₃) é empregado em complementação para neutralizar este tom residual por absorção seletiva na faixa de 580 nm (Bamford, 1977; Shelby, 2005).

Este uso industrial caracteriza-se por elevado grau de maturidade tecnológica: o processo é dominado desde os anos 1960 pelos principais fabricantes mundiais de vidro plano (Saint-Gobain, Guardian, AGC, Vitro) e de vidro de embalagem (Owens-Illinois, Ardagh, Verallia). No Brasil, a indústria vidreira nacional, que produziu 4,2 Mt de vidro em 2024, segundo a ABIVIDRO (2024), utiliza exclusivamente CeO₂ importado, majoritariamente da China, para este fim. A tendência tecnológica aponta para a otimização da concentração de CeO₂ (tipicamente 0,1–0,5% em massa no fundido) e para a combinação com agentes redutores (coque, sulfato de sódio) visando controle mais preciso da razão Fe²⁺/Fe³⁺ e redução do consumo de CeO₂ (ABIVIDRO, 2024; Shelby, 2005).

9.3.4 Absorção seletiva de radiação UV em vidros e embalagens com CeO₂

O íon Ce⁴⁺ apresenta forte absorção na região do ultravioleta (250–380 nm), resultante de transições de transferência de carga do tipo ligante–metal (O²⁻ → Ce⁴⁺), que o tornam altamente eficiente como filtro de radiação UV em vidros protetores. A incorporação de 0,1–1,0% em massa de CeO₂ ao vidro garante transmitância inferior a 1% na faixa UV-B (280–315 nm) e UV-A (315–380 nm), sem comprometer significativamente a transmitância na região do visível (Shelby, 2005; Bamford, 1977). Esta propriedade é explorada comercialmente em dois segmentos principais: (i) vidros de embalagem para alimentos, bebidas e medicamentos fotossensíveis, especialmente cervejas, azeites, vinhos e fármacos que sofrem fotodegradação por exposição à luz UV; e (ii) vidros para recipientes de produtos cosméticos de alta qualidade.

O mercado de vidros com bloqueio UV representa segmento de valor crescente, impulsionado pela regulamentação da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e por normas internacionais (FDA, EMEA) que exigem proteção de produtos farmacêuticos fotossensíveis. A norma USP <661> especifica requisitos de transmitância para embalagens farmacêuticas, sendo o vidro âmbar (com Fe³⁺ e TiO₂) e o vidro incolor com CeO₂ as principais alternativas técnicas (USP, 2023). A inovação concentra-se na combinação de CeO₂ com outros absorvedores UV (TiO₂, SnO₂) para ampliar a faixa de absorção e reduzir o custo de formulação, bem como no desenvolvimento de vidros UV-bloqueadores ultrafinos para aplicações em embalagens premium (Shelby, 2005; ABIVIDRO, 2024).

9.3.5 Coloração decorativa e funcional de vidros e cerâmicas com TR

Os óxidos de TR oferecem um espectro único de colorações para vidros e cerâmicas, resultantes das transições eletrônicas intraconfiguracionais 4f–4f e das transições de transferência de carga características

dos lantanídeos. As combinações mais utilizadas industrialmente são: (i) Ce/Ti — coloração amarelo dourado, resultante da absorção combinada de Ce^{4+} (UV) e Ti^{4+} (violeta); (ii) Nd_2O_3 puro — coloração azul-violeta com nuances que variam entre roxo e lavanda, muito utilizada em vidros decorativos e artísticos; (iii) Nd/Er — coloração rosa a rósea, combinando a absorção do Nd^{3+} em 580 nm e a do Er^{3+} em 520 nm; (iv) Pr_6O_{11} — coloração verde esmeralda, resultante da absorção seletiva do Pr^{3+} nas faixas do vermelho e azul; e (v) Eu_2O_3 — coloração levemente rósea, combinada frequentemente com Ce para obtenção de vidros para óculos solares (Bamford, 1977; Shelby, 2005; Nohman et al., 2023).

Este segmento apresenta elevada maturidade tecnológica, com aplicações estabelecidas há décadas na indústria de vidro artístico (Bohemia, Murano, Waterford), na produção de cerâmicas de alto valor e em vidros técnicos para instrumentação. A Hungria, a República Tcheca, a Alemanha e a China são os principais produtores de vidros coloridos com TR. A inovação concentra-se na produção de vidros com coloração estável e reproduzível em lotes industriais — desafio associado à sensibilidade das transições 4f das TR às variações de composição da matriz vítrea e às condições de fusão — e no desenvolvimento de glasscerâmicas (*glass-ceramics*) com TR para aplicações de alta resistência mecânica e propriedades ópticas controladas (Zhong et al., 2023; Nohman et al., 2023).

9.3.6 Vidros ópticos de alto índice de refração com La_2O_3

Os vidros ópticos à base de óxido de lantânio (La_2O_3) constituem uma das classes mais importantes de materiais para a fabricação de lentes de precisão em câmeras digitais, smartphones, telescópios, microscópios, projetores e sistemas de visão para defesa. A incorporação de La_2O_3 em concentrações de 35–70% em massa permite elevar o índice de refração (nd) acima de 1,80 — em comparação com $\text{nd} \approx 1,52$ de vidros de borossilicato comuns — sem aumento proporcional da dispersão óptica (medida pelo número de Abbe, vd), resultando em lentes mais finas, mais leves e com menor aberração cromática. Este desempenho óptico excepcional é complementado pela adição de coformulantes como Gd_2O_3 , Y_2O_3 , B_2O_3 , ZrO_2 e Ta_2O_5 para ajuste fino das propriedades ópticas e da viscosidade do fundido (Schott, 2025; Nohman et al., 2023).

Os principais fabricantes mundiais de vidros ópticos lantânicos são a Schott (Alemanha), a Ohara (Japão), a CDGM Chengdu (China) e a AGC (Japão), que disponibilizam catálogos com dezenas de composições La-crown (LaK) e La-flint (LaF, LaSF) atendendo às especificações da ISO 10110 e da MIL-G-174B. O mercado global de vidros ópticos foi avaliado em US\$ 4,2 bilhões em 2024, com crescimento projetado a CAGR de 6,8% até 2030, impulsionado pela demanda de câmeras de smartphones, sistemas de realidade aumentada e veículos autônomos (Grand View Research, 2024b; Mordor Intelligence, 2025). O Brasil não possui capacidade industrial nacional para produção de vidros ópticos lantânicos, importando a totalidade das pré-formas de vidro óptico (*optical blanks*) necessárias à produção de lentes de precisão. (Schott, 2025).

9.3.7 Lentes oftálmicas especiais com Ce e Eu

A fabricação de lentes oftálmicas para proteção solar e filtragem espectral representa uma das aplicações de TR de maior penetração no cotidiano dos consumidores. O CeO_2 é incorporado em lentes orgânicas (resina CR-39, policarbonato, Trivex) e inorgânicas (vidro mineral) para bloqueio da radiação UV-A (315–380 nm) e UV-B (280–315 nm), em conformidade com a norma ANSI Z80.3 e com os requisitos da ISO

12312-1 para óculos de proteção solar. A transmitância UV de lentes com CeO_2 é reduzida para valores inferiores a 1% na faixa de 380 nm, protegendo a retina e o cristalino contra os efeitos deletérios da radiação UV acumulada ao longo da vida (WHO, 2022; Downie; Patel, 2023).

A mistura de Eu_2O_3 e CeO_2 é empregada em lentes de óculos escuros de alta qualidade e em lentes fotocromáticas que escurecem progressivamente com a exposição à radiação UV. O Eu^{3+} contribui com absorção complementar ao Ce^{4+} e pode conferir propriedades de luminescência residual (fosforescência suave) em determinadas formulações. O mercado global de lentes oftálmicas foi estimado em US\$ 14,8 bilhões em 2024, com os segmentos de lentes com proteção UV e fotocromáticas representando mais de 35% do total (Grand View Research, 2024c). No Brasil, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) regulamenta os requisitos de proteção UV para óculos solares por meio da Portaria nº 364/2009, que exige transmitância UV inferior a 1% para a classe de proteção UV-400 (INMETRO, 2023; Downie; Patel, 2023).

9.3.8 Lentes de proteção para soldagem e fundição com Nd/Pr (didímio)

A mistura de óxidos de neodímio (Nd_2O_3) e praseodímio (Pr_6O_{11}), comercialmente conhecida como didímio, nome derivado do grego *didymos* (gêmeo), pois os dois elementos foram separados apenas em 1885 por von Welsbach, tem sido utilizada na fabricação de lentes de proteção para operadores de fornos de fundição de vidro, soldadores a maçarico e trabalhadores expostos à intensa radiação amarela emitida pela chama de sódio (linha D do Na, $\lambda = 589$ nm). O Nd^{3+} e o Pr^{3+} apresentam bandas de absorção estreitas e sobrepostas na faixa de 570–590 nm, decorrentes de transições 4f–4f dos respectivos íons, que permitem atenuar seletivamente a radiação sódica sem comprometer significativamente a transmitância nas demais regiões do visível (Bamford, 1977; Shelby, 2005).

Esta aplicação é particularmente relevante na indústria de sopro e moldagem de vidro artesanal, na fabricação de recipientes de vidro e na operação de fornos de fusão de metais não ferrosos com fluxo de sódio. Os óculos com vidro de didímio são certificados conforme a norma EN 170 (filtros UV) e EN 171 (filtros de infravermelhos) da União Europeia e a ANSI Z87.1 nos Estados Unidos (ANSI, 2020). A concentração de $\text{Nd}_2\text{O}_3 + \text{Pr}_6\text{O}_{11}$ nas formulações comerciais de vidros de proteção varia de 2% a 8% em massa, dependendo da intensidade de proteção exigida pela aplicação. O mercado global de equipamentos de proteção individual (EPI) para soldagem e trabalho a quente foi estimado em US\$ 5,8 bilhões em 2024, com as lentes de proteção óptica representando segmento especializado de alto valor (MarketsandMarkets, 2024).

9.3.9 Filtros e vidros de calibração para instrumentação óptica com Nd, Ho e Pr

As transições eletrônicas 4f–4f dos íons Nd^{3+} , Ho^{3+} e Pr^{3+} em matrizes vítreas produzem bandas de absorção extremamente estreitas e de posição espectral altamente estável em função da temperatura e da composição da matriz hospedeira, característica diretamente decorrente da blindagem da camada 4f pelas subcamadas 5s² e 5p⁶ dos lantanídeos. O Nd^{3+} apresenta bandas de absorção de referência em 514, 585, 685, 740, 808 e 898 nm, o Ho^{3+} em 241, 279, 361, 418, 453, 537 e 641 nm, e o Pr^{3+} em 444, 469 e 482 nm. Essas bandas são utilizadas como padrões de comprimento de onda absolutos para calibração de espectrofotômetros UV-Vis-NIR, espectrômetros de Raman e fluorímetros em laboratórios metrológicos e analíticos (ASTM E275, 2022; NIST SRM 2065).

Os padrões ópticos baseados em vidros com Nd^{3+} e Ho^{3+} são comercializados pelo NIST (Standard Reference Materials 930, 2065 e 2031) e pelo BIPM para rastreabilidade metrológica de medições espectrofotométricas. O Inmetro, como instituto nacional de metrologia do Brasil, mantém padrões secundários de transmitância e comprimento de onda baseados em filtros de vidro com TR calibrados pelo BIPM e pelo PTB (Alemanha). A demanda por este segmento é relativamente inelástica e de alto valor agregado, uma vez que os filtros são produzidos em pequenos volumes com elevados requisitos de pureza dos precursores de TR ($\geq 99,99\%$ para Nd, Ho e Pr) e de homogeneidade óptica do vidro (NIST, 2024; INMETRO, 2023).

9.3.10 Vidros especiais para defesa, aeroespacial e exploração espacial com La, Gd e Y

Os sistemas ópticos para defesa, aeroespacial e exploração espacial impõem requisitos extremos de desempenho que somente podem ser atendidos por vidros e cerâmicas de alta especialização baseados em TR. Neste segmento, destacam-se: (i) vidros de alta transmitância no infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR, 1.000–2.500 nm) com La_2O_3 , Gd_2O_3 e Y_2O_3 para sistemas de visão noturna, guiamento de mísseis e reconhecimento de alvos; (ii) vidros de alta densidade e número atômico (La, Gd) para blindagem de radiação ionizante em satélites e sondas espaciais; e (iii) cerâmicas ópticas transparentes de $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG) e Lu_2O_3 produzidas por sinterização a vácuo para janelas ópticas e domes de mísseis balísticos, com transmitância superior a 80% de 0,2 a 5 μm (Goldman, 2010; Harris, 2013).

O mercado global de óptica para defesa foi estimado em US\$ 12,4 bilhões em 2024, crescendo a CAGR de 7,5% impulsionado pelo aumento dos orçamentos de defesa na Europa, nos Estados Unidos e na Ásia-Pacífico após os conflitos recentes (Allied Market Research, 2024). No Brasil, o Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE), o Programa Satélite Geoestacionário de Defesa e Comunicações Estratégicas (SGDC) e o Programa Sisfron criam demanda crescente por componentes ópticos avançados. O Instituto de Estudos Avançados (IEAv/CTA) e a Embrapa Instrumentação desenvolvem pesquisas em vidros e cerâmicas ópticas para aplicações nacionais de defesa e instrumentação, embora a dependência de importação de pré-formas de vidro óptico (*optical blanks*) com La_2O_3 , Gd_2O_3 e Y_2O_3 permaneça integral (IEAv, 2024; Harris, 2013).

9.4 Cadeia produtiva e levantamento de patentes: 2012–2025

A cadeia produtiva de materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR estrutura-se em etapas sequenciais que vão da lavra e beneficiamento de minérios de TR até a produção de pós formulados e vidros acabados. As etapas principais são: (i) mineração e beneficiamento de concentrados de TR; (ii) separação e purificação de óxidos de Ce, La e outros TR de alto grau; (iii) síntese e formulação de pós de polimento (CeO_2 de grau óptico ou CMP) ou de composições de vidro com TR; (iv) fabricação de vidros, lentes e filtros ópticos; e (v) uso final em polimento de superfícies, fabricação de dispositivos óticos e, ao final do ciclo, reciclagem de pós exauridos.

Essa cadeia é intensiva em conhecimento, capital e regulação e sua governança envolve um conjunto diversificado de atores: empresas mineradoras, refinarias de TR, fabricantes de pós de polimento e de vidros ópticos especiais, indústrias de lentes e instrumentação, fabricantes de equipamentos para

semicondutores, laboratórios de ensaio e calibração e operadores de logística reversa e órgãos reguladores. Estrutura-se em dez etapas interdependentes, cada uma com exigências técnicas e barreiras de entrada distintas.

As duas primeiras etapas compreendem a mineração e o beneficiamento dos minérios hospedeiros de TR, com destaque para o cério (Ce), o lantânio (La), o neodímio (Nd) e o praseodímio (Pr) — os elementos de maior relevância para esta cadeia. O cério é o lantanídeo mais abundante na crosta terrestre, com teores representativos nos depósitos de carbonatito (bastnasita, monazita) e nas argilas de adsorção iônica que caracterizam as ocorrências de Araxá (MG), Serra Verde (GO) e Bacia do Parnaíba (MA/PI/TO) no Brasil. O beneficiamento compreende britagem, moagem, flotação e/ou lixiviação ácida para concentração e separação parcial dos óxidos de TR, gerando o concentrado de terras raras (TREO) que serve de insumo às etapas seguintes (CPRM, 2025; USGS, 2026).

As etapas seguintes envolvem a separação e a purificação dos óxidos individuais de Ce, La, Nd e Pr por extração líquido-líquido com solventes organofosforados (D2EHPA, EHEHPA, Cyanex 272) ou por troca iônica, processos intensivos em reagentes e em controle ambiental rigoroso em razão da presença de radionuclídeos associados (tório e urânio) nas jazidas de carbonatito. A obtenção de CeO_2 de grau óptico (pureza $\geq 99,9\%$) e de La_2O_3 de grau óptico (pureza $\geq 99,99\%$) exige etapas adicionais de purificação — como precipitação seletiva com oxalato de amônio, calcinação em atmosfera controlada e classificação granulométrica ultrafina — que representam a principal barreira técnica à diversificação geográfica da cadeia. A China domina mais de 70% da capacidade mundial de refino de CeO_2 de grau óptico e CMP, concentrando produtores como Shenghe Resources, Griem Advanced Materials e Inner Mongolia Huamei (USGS, 2026; Roskill, 2024).

A quinta e sexta etapas referem-se à síntese e formulação dos produtos intermediários: pós de polimento de CeO_2 e *slurries* para CMP, composições vítreas com TR e precursores para vidros ópticos. No caso dos pós de polimento, a síntese envolve precipitação controlada, secagem por *spray*, calcinação ($800\text{--}1.100^\circ\text{C}$) e classificação granulométrica para obtenção de partículas com d_{50} entre $0,3\ \mu\text{m}$ e $3,0\ \mu\text{m}$ (polimento óptico) ou d_{50} inferior a $100\ \text{nm}$ (*slurries* para CMP). A formulação dos *slurries* incorpora ainda dispersantes, agentes modificadores de pH e surfactantes para controle da estabilidade coloidal e da seletividade de remoção (Cook, 1990; Park et al., 2023). Para vidros ópticos, a etapa consiste na fusão das composições de La_2O_3 , B_2O_3 , SiO_2 , Gd_2O_3 e ZrO_2 em cadinho de platina a temperaturas entre 1.200°C e 1.500°C , seguida de recozimento lento para eliminação de tensões internas e obtenção de homogeneidade óptica (Schott, 2025; Nohman et al., 2023).

As etapas subsequentes compreendem a fabricação dos produtos finais e sua incorporação nas cadeias industriais de uso. Os pós de CeO_2 formulados são embalados e fornecidos às indústrias de polimento de vidros planos, fabricantes de lentes oftálmicas e operadores de processos de CMP em fábricas de semicondutores. Os vidros lantânicos são conformados em pré-formas ópticas (*optical blanks*) por prensagem, fundição ou laminação, e usinados por fabricantes de lentes (óptica fotográfica, microscopia, defesa) com tolerâncias dimensionais na faixa de micrômetros e irregularidades de frente de onda inferiores a $\lambda/10$ (ISO 10110; MIL-G-174B). Os vidros com CeO_2 para descoloração, absorção UV e coloração integram diretamente o processo de fusão vidreiro, sendo adicionados como componentes das composições (*batch*) junto às demais matérias-primas (Shelby, 2005; ABIVIDRO, 2024).

As duas últimas etapas, ainda incipiente em escala industrial, envolve a coleta de lamas de polimento (*polishing sludge*) geradas nos processos de acabamento de vidros e lentes, a recuperação e reciclagem do CeO_2 . A concentração de Ce nas lamas de polimento é tipicamente 50 a 100 vezes superior à dos minérios primários, caracterizando-as como fonte altamente atrativa para mineração urbana (Hoshino et al., 2001). As rotas de recuperação mais investigadas combinam lixiviação ácida (HCl , H_2SO_4 ou HNO_3 diluído), precipitação seletiva por ajuste de pH e calcinação para regeneração do CeO_2 com pureza suficiente para reuso em polimento de grau intermediário. A regulamentação ambiental crescente, especialmente as exigências da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e do CONAMA aplicáveis a resíduos industriais perigosos, tende a ampliar o incentivo econômico à reciclagem desse fluxo no Brasil, alinhando a agenda ambiental ao interesse estratégico de redução da dependência de CeO_2 importado.

Com base nessa caracterização, apresentam-se, a seguir, as tendências tecnológicas, os avanços e os desafios associados ao desenvolvimento de pós para polimento e à fabricação de vidros e lentes à base de terras raras (TR), a partir dos resultados do levantamento de patentes conduzido na base Derwent Innovations Index (Clarivate, 2026). O estudo abrange o período de 2015 a 2025 e fundamenta-se na estratégia de busca detalhada na Tabela 9.2.

Tabela 9.2 Estratégia de busca adotada no levantamento de patentes em materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR (2012–2025)

Referência	Busca	Resultados
#1	TS= ("rare earth" OR "rare-earth" OR "rare earths" OR "rare-earths" OR lanthanide* OR lanthanoid* OR europium OR cerium OR lanthanum OR neodymium OR praseodymium OR yttrium OR terbium OR gadolinium OR "Ce3+" OR "Ce4+" OR "La3+" OR "Nd3+" OR "Pr3+" OR "Tb3+" OR "Y3+")	360.410
#2	TS= ("optical polishing" OR "polishing compound*" OR "polishing slurr*" OR "cerium oxide" OR "ceria" OR "CeO2" OR "chemical mechanical planarization" OR "CMP slurr*" OR "optical glass*" OR "special glass*" OR "precision optics" OR "lanthanum glass" OR "rare earth glass*" OR "magneto-optical" OR "Faraday rotator*" OR "Faraday effect" OR "optical lens*" OR "lenses" OR "optical filter*" OR "photochromic glass*" OR "laser glass*" OR "high refractive index" OR "optical coating*" OR "antireflect*" OR "fiber optic*" OR "optical fiber*" OR "scintillator*" OR "radiation shield*")	524.240
#3	IP= (C01F-017/10* OR C01F-017/20* OR C01F-017/00* OR C03C-003/253* OR C03C-004/08* OR C03C-004/12* OR C09G-001/02* OR B24B-037/00* OR G02B-001/00* OR G02B-005/20* OR G02F-001/09* OR H01F-001/32* OR C04B-035/505* OR C23C-014/34*)	108.299
#4	#1 AND # 2	44.951
#5	#3 AND # 4	5.165

Identificaram-se 5.165 patentes no período de 2015 a 2025, cujo crescimento nessa década reflete tanto o aumento global da atividade inventiva no setor, impulsionado pela expansão da indústria de semicondutores e de vidros ópticos de precisão e pela sofisticação das formulações de CeO_2 para CMP em tecnologias sub-28 nm.

Os códigos da International Classification of Patentes (IPC) indicados na ref.#3 combinam deliberadamente três camadas da cadeia produtiva de aplicações ópticas avançadas à base de terras raras:

- C01F-017/00*, C01F-017/10* e C01F-017/20* — capturam a etapa de precursores, abrangendo todos os compostos inorgânicos de terras raras — óxidos, hidróxidos, sais e complexos — e, especificamente, os compostos de cério (CeO_2 , Ce_2O_3) e de lantânio (La_2O_3 , LaF_3) que constituem a matéria-prima funcional tanto para a produção de pós abrasivos de polimento óptico quanto para a formulação de vidros especiais de alta pureza;
- C03C-003/253*, C03C-004/08*, C03C-004/12*, C09G-001/02* e B24B-037/00* — cobrem o núcleo tecnológico das duas aplicações centrais desta cadeia: de um lado, os vidros ópticos à base de TR, desde composições com La_2O_3 , CeO_2 e Nd_2O_3 como formadores de rede (003/253*), passando por vidros de alto índice de refração para sistemas de imageamento (004/08*), até vidros fotocromáticos e de proteção espectral com CeO_2 (004/12*); de outro, o segmento de polimento óptico de precisão, com composições de *slurry* à base de CeO_2 para polimento químico-mecânico (CMP) de *wafers* e superfícies ópticas (C09G-001/02*) e os processos e equipamentos correspondentes de polimento de lentes, prismas e espelhos (B24B-037/00*);
- G02B-001/00*, G02B-005/20*, G02F-001/09*, H01F-001/32*, C04B-035/505* e C23C-014/34* — cobrem as aplicações e plataformas de uso final: elementos ópticos passivos como lentes e janelas ópticas (G02B-001/00*), filtros ópticos dicróicos produzidos com vidros dopados com TR (G02B-005/20*), dispositivos magneto-ópticos baseados no efeito Faraday — isoladores e rotadores com TGG ($\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) e YIG ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) — para *lasers* de alta potência (G02F-001/09* e H01F-001/32*), cerâmicas transparentes de YAG: Nd^{3+} como meios ativos em lasers de estado sólido (C04B-035/505*) e revestimentos ópticos funcionais de CeO_2 , La_2O_3 e Y_2O_3 por evaporação e *sputtering* em superfícies ópticas de precisão (C23C-014/34*).

A Tabela 9.3 apresenta os principais depositantes de patentes no período 2015–2025 (critério "top 30"), extraídos de um total de 200 titulares identificados na base consultada. As 30 entidades originais foram classificadas em 19 grupos, com a indicação, entre parênteses, do número de entidades agrupadas sob cada titular consolidado.

Tabela 9.3 Principais depositantes de patentes em materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR: Ranking consolidado por grupo econômico e institucional (2015–2025)

Grupo / Entidades	País	Nº de patentes	% do total (5.165)
CDGM Glass Co Ltd	China	296	5,73%
Resonac Holdings Group (3 entidades)	Japão	289	5,60%
Ohara KK	Japão	210	4,07%
AGC Group (2 entidades)	Japão	136	2,63%
Hoya Corp	Japão	111	2,15%
Nippon Electric Glass Co	Japão	108	2,09%
Shin-Etsu Chemical Group (2 entidades)	Japão	97	1,88%

Grupo / Entidades	País	Nº de patentes	% do total (5.165)
Anji Microelectronics (Shanghai) Co Ltd	China	85	1,65%
Mitsui Mining & Smelting Co (2 entidades)	Japão	53	1,03%
Soulbrain Co Ltd	Coreia do Sul	52	1,01%
Sumitomo Metal Mining Co	Japão	47	0,91%
Versum Materials US LLC	EUA	39	0,76%
Corning Inc	EUA	37	0,72%
Evonik Industries Group (2 entidades)	Alemanha	22	0,43%
Universidade de Zhejiang	China	12	0,23%
Applied Materials Inc	EUA	11	0,21%
Central Glass Co Ltd	Japão	11	0,21%
NIMS – National Institute for Materials Science	Japão	11	0,21%
Seiko Epson Corp	Japão	11	0,21%
Fujimi Inc KK	Japão	11	0,21%
Rhône-Poulenc Chimie (Solvay Group)	França	11	0,21%
Sanyo Chemical Industries Ltd	Japão	11	0,21%
Taiwan Semiconductor Mfg Co Ltd (TSMC)	Taiwan	11	0,21%
Toray Research Center KK	Japão	11	0,21%
Subtotal — depositantes listados (critério: “Top 30”)	—	1.693	32,78%
Total geral	—	5.165	100,00%

Fonte: Busca direta na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 30 mar. 2026.

Nota: Os grupos consolidados agrupam entidades que correspondem ao mesmo titular sob denominações sociais distintas ao longo do período analisado. As entidades individuais com 11 patentes correspondem ao limiar mínimo de corte adotado pelo Derwent Innovations Index para composição do ranking de depositantes. O subtotal dos depositantes listados (1.693 patentes; 32,77% do total) reflete a concentração parcial do portfólio: os 67,23% restantes distribuem-se por centenas de depositantes individuais com até 10 registros cada.

A análise da Tabela 9.3 revelou um padrão de concentração geográfica e setorial que merece atenção detalhada, pois estrutura de forma inequívoca a geopolítica da inovação em materiais para óptica avançada à base de terras raras no período 2015–2025.

O primeiro aspecto que se destaca é a hegemonia japonesa. Do total de 19 grupos consolidados listados, onze são de origem japonesa, respondendo conjuntamente por cerca de 22% dos 5.165 documentos da

base. Esse domínio não é acidental: reflete décadas de investimento sistemático das indústrias japonesas de vidro óptico, semicondutores e materiais de precisão em propriedade intelectual relacionada ao CeO_2 e aos vidros dopados com terras raras. Grupos como Ohara KK (210 patentes; 4,06%), Hoya Corp (111 patentes; 2,15%) e Nippon Electric Glass (108 patentes; 2,09%) são fornecedores globais de referência em vidros ópticos de alto índice de refração, e sua presença destacada no *ranking* confirma que o Japão mantém posição de liderança técnica tanto na formulação de vidros com La_2O_3 e Nd_2O_3 quanto no polimento de precisão.

O segundo aspecto de relevo é a liderança isolada da CDGM Glass (296 patentes; 5,73%), empresa estatal chinesa sediada em Chengdu e principal fabricante mundial de vidros ópticos. Sua posição no topo do *ranking* — à frente de todos os grupos japoneses individualmente considerados — sinaliza que a China não é apenas um fornecedor de matéria-prima de terras raras, mas um competidor de primeiro nível na agregação de valor ao longo de toda a cadeia, da extração ao componente óptico acabado. A presença complementar da Anji Microelectronics (Shanghai) (85 patentes; 1,65%), especializada em *slurries* de CeO_2 para CMP de *wafers*, reforça essa leitura: a China avança simultaneamente nos segmentos de vidros ópticos e de polimento para microeletrônica.

O terceiro elemento digno de nota é a consolidação corporativa que o *ranking* encobre quando as entidades são analisadas isoladamente. O caso mais expressivo é o do Grupo Resonac Holdings (289 patentes; 5,60%), que resulta da fusão progressiva entre Hitachi Chemical, Showa Denko Materials e Resonac, que são três denominações de uma mesma trajetória empresarial de reestruturação industrial japonesa.

De modo análogo, o AGC Group (136 patentes; 2,63%) reúne as patentes registradas sob as denominações Asahi Glass e AGC Inc antes e após a renomeação corporativa de 2018, assim como o Grupo Shin-Etsu Chemical (97 patentes; 1,88%) consolida duas variantes de indexação do mesmo titular. Desconsiderar essas equivalências levaria a uma subestimação sistemática do peso real desses conglomerados no portfólio global.

Chama atenção ainda a quase ausência de instituições acadêmicas e de pesquisa no *ranking*: apenas a Universidade de Zhejiang (12 patentes; 0,23%) figura entre os vinte principais depositantes, e uma única entidade governamental japonesa, o Instituto Nacional de Ciência dos Materiais (NIMS), aparece no limiar mínimo de corte, com 11 registros. Esse padrão contrasta com o portfólio de fósforos de terras raras, no qual universidades chinesas e coreanas ocupam posições mais relevantes, e sugere que a inovação em óptica de precisão e polimento CMP está fortemente apropriada pelo setor privado, com ciclos de desenvolvimento mais próximos do produto industrial do que da pesquisa acadêmica de fronteira.

Por fim, a participação norte-americana — restrita à Versum Materials (39 patentes; 0,76%), à Applied Materials (11 patentes; 0,21%) e à Corning Inc (37 patentes; 0,72%) — é surpreendentemente modesta diante do peso dos EUA na indústria de semicondutores e óptica de defesa. Tal resultado sugere que o esforço inovador americano nesse domínio se concentra mais em processos e equipamentos de fabricação do que em composições de materiais à base de terras raras, segmento em que a dependência de fornecedores asiáticos permanece estrutural.

Na sequência, a análise da distribuição dos dez principais códigos da International Classification of Patentes (ICP) identificados neste mapeamento de patentes revelou uma concentração tecnológica expressiva em dois segmentos interdependentes: o polimento químico-mecânico de precisão e a óptica de elementos passivos. Em conjunto, os dez códigos listados na Tabela 9.3 totalizam 7.482 ocorrências em uma base de 5.165 documentos únicos, o que implica uma média de 1,45 código por patente, indicativo da natureza multidisciplinar e transversal das inovações nessa cadeia.

Complementando o mapeamento, buscou-se identificar os códigos da Classificação Internacional de Patentes (CIP) de maior frequência de ocorrência no portfólio levantado, de modo a revelar os eixos tecnológicos dominantes da inovação em materiais para aplicações ópticas avançadas à base de terras raras no período analisado (Tabela 9.4).

Tabela 9.4 Distribuição dos principais códigos CIP por frequência de ocorrência no levantamento de patentes em materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR (2015–2025) — Criterio “Top 10”

Código CIP	Descrição do código	Nº de patentes	% do total (5.165)
C09G-001/02	Composições de polimento à base de CeO_2 (<i>slurries</i> para CMP — <i>Chemical Mechanical Planarization</i> de <i>wafers</i> , substratos de vidro e superfícies ópticas)	1.254	24,28%
C09K-003/14	Materiais abrasivos e de polimento — compostos de cério, lantânio e outros óxidos de TR para acabamento óptico de precisão	1.009	19,54%
G02B-001/00	Elementos ópticos em geral: lentes, prismas, janelas ópticas e componentes para sistemas de imageamento com vidros dopados com TR	988	19,13%
C01F-017/00	Compostos inorgânicos de terras raras — classe geral: óxidos, hidróxidos, sais e complexos (precursores para pós de polimento e vidros especiais)	924	17,89%
B24B-037/00	Máquinas e processos de polimento de superfícies planas: polimento de lentes, prismas, espelhos e substratos ópticos assistido por pós abrasivos de TR	683	13,22%
C03C-003/068	Composições de vidro contendo La_2O_3 , CeO_2 e Nd_2O_3 : vidros ópticos de alto índice de refração e baixa dispersão (séries ED e LD) para lentes de precisão	662	12,82%
H01L-021/304	Processos de polimento de <i>wafers</i> de silício e substratos semicondutores por CMP com <i>slurries</i> de CeO_2 (integração de TR na fabricação de circuitos integrados)	644	12,47%
C01F-017/235	Compostos de cério(IV): CeO_2 de alta pureza como agente abrasivo primário para polimento óptico e como estabilizador UV em vidros especiais	479	9,27%
C01F-017/10	Compostos de cério em geral ($\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$): óxidos, nitratos, carbonatos e fluoretos de cério — matéria-prima funcional da cadeia de polimento e vidros	465	9,00%
G02F-001/09	Dispositivos magneto-ópticos baseados no efeito Faraday: isoladores e rotadores ópticos com cristais de TGG ($\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$) e YIG para lasers de alta potência	374	7,24%
Subtotal —códigos IPC “Top 10”		7.482	144,86%

Código CIP	Descrição do código	Nº de patentes	% do total (5.165)
Total geral		5.165	100,00%

Fonte: Busca direta na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 30 mar. 2026.

Nota: Os dez códigos IPC listados totalizam 7.482 ocorrências (144,86% do total de 5.165 patentes da base), evidenciando elevada concentração tecnológica nos segmentos de polimento químico-mecânico (CMP) com CeO_2 — C09G-001/02 e C09K-003/14, que somam isoladamente 2.263 registros (43,81%) — e em óptica de precisão (G02B-001/00). Uma patente pode conter múltiplos códigos IPC, de modo que o somatório dos códigos excede o número total de documentos únicos da base.

Como pode ser observado na Tabela 9.4, o código IPC de maior frequência absoluta é o C09G-001/02 (1.254 ocorrências; 24,28% da base), que abrange composições de slurry à base de CeO_2 para polimento químico-mecânico (CMP). Trata-se do núcleo operacional do segmento de polimento óptico de precisão: esses fluidos abrasivos são indispensáveis tanto para o acabamento de superfícies ópticas planas, substratos de vidro para displays, lentes e prismas, quanto para a planarização de wafers de silício na microeletrônica. A altíssima densidade patentária nesse código reflete a disputa competitiva intensa entre fabricantes asiáticos, particularmente japoneses e chineses, conforme evidenciado na Tabela 9.4, pela otimização da distribuição granulométrica do CeO_2 , da estabilidade coloidal das suspensões e da seletividade de remoção de material.

O segundo código em frequência, C09K-003/14 (1.009 ocorrências; 19,54%), cobre materiais abrasivos e de polimento em sentido mais amplo, englobando compostos de cério, lantânio e outros óxidos de terras raras para acabamento óptico. Sua proximidade com C09G-001/02 não é casual: os dois códigos frequentemente coocorrem na mesma patente, descrevendo, respectivamente, a composição do agente abrasivo e a formulação da suspensão de polimento. Juntos, esses dois códigos somam 2.263 ocorrências (43,82% da base) o que confirma o polimento com CeO_2 como o eixo tecnológico dominante do portfólio analisado.

O terceiro código, G02B-001/00 (988 ocorrências; 19,13%), relativo a elementos ópticos passivos (lentes, prismas, janelas ópticas e componentes para sistemas de imageamento), sinaliza que uma parcela relevante do portfólio não se restringe ao polimento, estendendo-se à concepção e fabricação dos próprios componentes ópticos produzidos com vidros dopados com terras raras. Esse código frequentemente coocorre com C03C-003/068 (662 ocorrências; 12,82%), que cobre composições de vidro óptico contendo La_2O_3 , CeO_2 e Nd_2O_3 como modificadores de rede, e que fundamenta os vidros de alto índice de refração e baixa dispersão das séries ED e LD, amplamente utilizados em lentes fotográficas, sistemas de endoscopia e óptica de defesa.

O código C01F-017/00 (924 ocorrências; 17,89%), relativo aos compostos inorgânicos de terras raras em geral, e seus subgrupos C01F-017/235 (479 ocorrências; 9,28%) e C01F-017/10 (465 ocorrências; 9,00%), específicos para compostos de cério(IV) e de cério em geral, respectivamente, evidenciam a robustez da camada de precursores no portfólio: significativa fração das patentes protege não o produto final — o slurry ou o vidro — mas a rota de síntese e purificação do CeO_2 de alta performance, etapa de maior valor estratégico e maior barreira técnica à entrada de novos competidores.

Os códigos B24B-037/00 (683 ocorrências; 13,22%) e H01L-021/304 (644 ocorrências; 12,47%) revelam a interpenetração entre a cadeia óptica e a microeletrônica: o primeiro cobre os equipamentos e processos de polimento de superfícies planas; o segundo, os processos de CMP aplicados à fabricação de circuitos integrados, segmento no qual o CeO_2 de terras raras compete diretamente com abrasivos alternativos como SiO_2 e Al_2O_3 . Finalmente, o código G02F-001/09 (374 ocorrências; 7,24%), o de menor frequência no top 10, registra os dispositivos magneto-ópticos baseados no efeito Faraday, isoladores e rotadores com cristais de TGG ($\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$), nicho tecnológico de alto valor agregado e crescente relevância para lasers industriais e sistemas de comunicação óptica de alta potência.

Esse perfil tecnológico multidimensional, que articula polimento de precisão, óptica passiva, microeletrônica e dispositivos magneto-ópticos em um único portfólio, se reflete de forma coerente na distribuição das patentes por área de conhecimento, analisada a seguir.

A Tabela 9.5 apresenta o conjunto de 5.165 patentes classificadas por área de conhecimento, adotando-se o critério “top. No total, identificaram-se 24 áreas, com destaque para a área de ‘Química’ e ‘Engenharia’, com 93,7 e 87,3% das patentes, respectivamente.¹⁰”

Tabela 9.5 Patentes em materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR, classificadas por área do conhecimento: 2015-2025 (critério: “top 10”)

Áreas	Nº de patentes
Química	4830
Ciência dos Materiais	3773
Engenharia	3711
Instrumentos e Instrumentação	3382
Eletroquímica	2114
Óptica	1620
Ciência dos Polímeros	1364
Telecomunicações	351
Metalurgia e Engenharia Metalúrgica	330
Energia e Combustíveis	268

Fonte: Busca direta na base de dados Derwent Innovations Index. Acesso em: 30 mar. 2026.

A Tabela 9.5 apresenta a distribuição das 5.165 patentes identificadas no levantamento por área do conhecimento, considerando as dez áreas de maior frequência dentre as 24 identificadas na base. O primeiro aspecto a destacar é que os percentuais individuais superam amplamente 100% do total quando

somados, o que decorre, tal como observado para os códigos CIP, do fato de uma mesma patente poder ser classificada simultaneamente em múltiplas áreas — indicativo da natureza intrinsecamente interdisciplinar da inovação em materiais para aplicações ópticas avançadas à base de terras raras.

A área de ‘Química’ lidera com expressiva margem, com 4.830 ocorrências, correspondendo a 93,5% da base. Esse resultado é coerente com a composição do portfólio analisado: a grande maioria das patentes envolve síntese, purificação e formulação de compostos de cério, lantânio e outros óxidos de terras raras, bem como o desenvolvimento de suspensões de polimento e de composições de vidros ópticos dopados — todas atividades de natureza eminentemente química. A hegemonia da Química sobre todas as demais áreas reafirma que o domínio da rota de síntese dos precursores de TR constitui a barreira técnica central dessa cadeia produtiva.

A segunda posição, ocupada por ‘Ciência dos Materiais’ (3.773 ocorrências; 73,0%), e a terceira, por ‘Engenharia’ (3.711 ocorrências; 71,8%), revelam que a inovação nesse domínio não se esgota na composição química: ela se estende ao controle microestrutural dos materiais, como morfologia de partícula, cristalinidade, densidade de defeitos, e à engenharia de processos de fabricação, incluindo equipamentos de polimento CMP, reatores de síntese e linhas de conformação de vidros ópticos. A proximidade numérica entre as duas áreas sugere forte sobreposição entre documentos de ‘Ciência dos Materiais’ e ‘Engenharia’ no portfólio analisado. Instrumentos e Instrumentação (3.382 ocorrências; 65,5%) ocupa a quarta posição e traduz a estreita relação entre os materiais desenvolvidos e os dispositivos nos quais são empregados: lentes, sensores, sistemas de imageamento e equipamentos de metrologia óptica figuram entre as aplicações mais recorrentes no portfólio. ‘Eletroquímica’ (2.114 ocorrências; 40,9%), por sua vez, reflete a já mencionada interpenetração com a microeletrônica, particularmente nos processos de CMP de *wafers* semicondutores, nos quais o CeO₂ de terras raras atua em ambiente eletroquímico de interface sólido-líquido. A presença de ‘Óptica’ como área autônoma (1.620 ocorrências; 31,4%) — distinta de Instrumentos e Instrumentação — indica que uma fração relevante do portfólio trata especificamente de fenômenos e propriedades ópticas, como índice de refração, transmitância, birrefringência e efeito Faraday, e não apenas dos instrumentos que os exploram. ‘Ciência dos Polímeros’ (1.364 ocorrências; 26,4%) aparece em sétimo lugar, refletindo o uso de aditivos poliméricos como dispersantes e estabilizadores nos *slurries* de CeO₂, bem como o emprego de matrizes poliméricas em revestimentos ópticos funcionais.

As três últimas áreas da seleção “*Top 10*” — Telecomunicações (351 ocorrências; 6,8%), Metalurgia e Engenharia Metalúrgica (330 ocorrências; 6,4%) e Energia e Combustíveis (268 ocorrências; 5,2%) — apresentam frequências substancialmente menores, mas sinalizam frentes emergentes de aplicação: os componentes magneto-ópticos para sistemas de comunicação óptica de alta velocidade, os processos metalúrgicos de refino e reciclagem de terras raras e as aplicações em células de combustível e revestimentos para conversão de energia, respectivamente, confirmando o caráter estratégico e transversal dos materiais ópticos à base de TR para múltiplos setores industriais de alta tecnologia.

O Quadro 9.3 apresenta o mapa de competências da cadeia produtiva de materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR no Brasil (2026), destacando o grau de domínio em cada etapa da cadeia produtiva e os pontos de atenção que deverão ser considerados na construção do roadmap estratégico da cadeia no horizonte 2040.

Quadro 9.3 Mapa de competências da cadeia produtiva de materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR no Brasil (2026)

Competência	Nível	Descrição do domínio em 2026	Evolução na última década
Separação e purificação de CeO_2 de alta pureza	Crítico	Inexistência de planta industrial nacional para CeO_2 de grau óptico e CMP. CETEM detém <i>know-how</i> em escala laboratorial. Importação é o único suprimento industrial corrente, majoritariamente da China (Shenghe, Grirem) e EUA (Entegris/CMC Materials). Pesquisa em rotas hidrometalúrgicas conduzida no CETEM e no INCT MATERIA (UFAM, UFSC, CDTN).	Progressos tecnológicos em escala laboratorial no CETEM e universidades, sem correspondência em investimentos produtivos.
Síntese e formulação de pós de polimento à base de CeO_2 (grau óptico e CMP)	Incipiente	Pesquisa universitária ativa na UFPE e USP (Ribeirão Preto e São Carlos), UFRJ, UFMG, UFSCar/UNESP (LIEC e CDMF) sobre síntese de nanocéria e <i>slurries</i> experimentais. Ausência de produção industrial nacional. Toda a demanda de <i>slurries</i> de CeO_2 para CMP e polimento óptico é atendida por importações.	Crescimento do número de publicações e grupos de pesquisa; gap tecnológico persiste entre laboratório e planta industrial. Iniciativas isoladas de cooperação com o setor produtivo ainda incipientes.
Fabricação de vidros planos e de embalagem com CeO_2 (descoloração e proteção UV)	Parcial	Setor vidreiro nacional (Owens-Illinois Brasil, Saint-Gobain, Vivix) utiliza CeO_2 importado como aditivo de descoloração e proteção UV. Domínio do processo de fabricação de vidro existe, mas a dependência de insumo crítico importado persiste.	Avanço moderado: indústria vidreira instalada e competitiva no Brasil, mas sem integração com cadeia de TR nacional. Óxidos de Ce continuam sendo 100% importados pelos fabricantes de vidro.
Fabricação de lentes oftálmicas especiais com Ce e Eu (proteção solar e fotocromáticas)	Parcial	Indústria ótica nacional produz lentes com dopantes importados. Empresas como Indo Ótica, Essilor e cooperativas óticas utilizam CeO_2 e Eu_2O_3 importados. Tecnologia de processo dominada; dependência de TR importados.	Crescimento do mercado de lentes fotossensíveis e anti-UV no Brasil. Capacidade produtiva de lentes existe no país, mas dependência de TR importados não foi reduzida na última década.
Vidros ópticos de alto índice de refração com La_2O_3 (lentes de precisão,	Crítico	Inexistência de capacidade industrial nacional para vidros ópticos com La_2O_3 . Vidros	Ausência de avanços industriais significativos. Demanda interna de vidros ópticos de precisão é

Competência	Nível	Descrição do domínio em 2026	Evolução na última década
câmeras, telescópios)		lantânicos de grau óptico são importados de Schott (Alemanha), Ohara (Japão), CDGM (China) e AGC (Japão). Pesquisa universitária pontual em UFPE, UFRJ, CePOF/USP São Carlos e LaMaV/CeRTEV (UFSCar/UNESP). Vidros fluorofosfatos dopados com TR desenvolvidos no CLA/IPEN.	integralmente atendida por importação. Pesquisa científica avançou sem correspondência produtiva.
Produção de lentes de proteção para soldagem e filtros ópticos com Nd/Pr (didímio)	Incipiente	Pesquisa laboratorial em universidades brasileiras sobre vidros e polímeros com Nd e Pr para absorção seletiva (Grupo de Vidros Ópticos Dopados, UEM; UFPE; UFRJ). Ausência de produção industrial nacional de lentes de proteção com TR. Mercado suprido por importações da Europa e China.	Tímido avanço científico; ausência de projetos de P,D&I orientados à industrialização. Demanda crescente em soldagem e corte a laser não estimulou ação industrial nacional.
Reciclagem e recuperação de CeO ₂ de pós de polimento exauridos	Incipiente	Projetos em escala laboratorial no CETEM e em universidades brasileiras abordam rotas de recuperação de terras raras, incluindo o cério, a partir de resíduos industriais contendo pós para polimento.	Tema emergente na agenda nacional de minerais críticos. Crescimento de publicações científicas brasileiras sobre recuperação de Ce de resíduos industriais; sem transição para escala industrial.
Aplicações em defesa, aeroespacial e instrumentação óptica de precisão com TR	Incipiente	Institutos de pesquisa como IEAv/CTA e IPT desenvolvem pesquisas isoladas em vidros e óptica de precisão. CLA/IPEN produz cristais e vidros dopados com TR para lasers de aplicação em defesa e medicina. Ausência de cadeia produtiva nacional integrada para aplicações críticas de defesa.	Crescimento da agenda de defesa e soberania tecnológica no Brasil pós-2020. Demanda crescente em programas como Sistema Integrado de Monitoramento de Fronteiras (Sisfron) e Programa Estratégico de Sistemas Espaciais (PESE) não induziu a cadeia produtiva de TR para óptica de defesa.

Legenda: Níveis de competência: Pleno — domínio tecnológico e industrial estabelecido; capacidade de PD&I e produção em escala comercial; Parcial — produção nacional existente, mas com dependência tecnológica externa em componentes críticos; Emergente — escala piloto ou demonstração; competência tecnológica consolidada, industrialização em curso; Incipiente — pesquisa laboratorial ativa; sem transferência tecnológica ou produção em escala relevante; Crítico — ausência de capacidade produtiva nacional; dependência integral de importação ou de insumo externo.

Fonte: Revisão da literatura técnica e consultas a especialistas (2025–2026).

9.4.1 Separação e purificação de CeO_2 e La_2O_3 de grau óptico — Nível: Crítico

A separação e a purificação de óxidos de cério e lantânio nas especificações exigidas pelas aplicações ópticas avançadas (pureza $\geq 99,9\%$ para polimento óptico e $\geq 99,99\%$ para CMP de semicondutores) constituem o gargalo mais crítico de toda a cadeia produtiva nacional (ver Capítulo 11 para análise consolidada deste gargalo). O Brasil não dispõe de nenhuma planta industrial capaz de produzir CeO_2 ou La_2O_3 de grau óptico em qualquer escala relevante. A oferta corrente é integralmente importada, com predominância de fornecedores chineses, notadamente Shenghe Resources e Griem, e para aplicações de maior exigência, de fornecedores norte-americanos como Entegris e CMC Materials (USGS, 2026; Roskill, 2024).

O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) acumulou conhecimento técnico relevante em processos hidrometalúrgicos de extração por solvente, precipitação seletiva e calcinação para a obtenção de óxidos de Ce e La a partir de concentrados de monazita e de argilas iônicas, em parceria com o SGB/CPRM e com universidades (CETEM, 2024; CPRM, 2025). Grupos no INCT MATERIA (UFAM/UFSC/CDTN) investigam rotas alternativas de lixiviação e purificação. Contudo, nenhuma dessas iniciativas avançou além da escala laboratorial ou de bancada, sem conversão em capacidade produtiva.

A superação desse gargalo é condição *sine qua non* para o avanço de todos os elos a jusante: enquanto o País não produzir CeO_2 e La_2O_3 de grau óptico domesticamente, a síntese de pós formulados, a fabricação de vidros ópticos e as rotas de reciclagem permanecerão dependentes de insumos importados e vulneráveis a restrições de oferta e volatilidade de preços (IBRAM, 2025; KfW, 2024).

9.4.2 Síntese e formulação de pós de CeO_2 para polimento óptico e CMP — Nível: Incipiente

O Brasil apresenta competência científica ativa, mas integralmente restrita à escala laboratorial, na síntese de nanopartículas de CeO_2 para aplicações de polimento. Grupos de pesquisa na UFPE, USP (Ribeirão Preto e São Carlos), UFRJ, UFMG e UFSCar/UNESP (LIEC e CDMF) dominam as rotas de síntese por precipitação controlada, sol-gel e método hidrotermal, com controle de tamanho de partícula, morfologia e cristalinidade (Hoshino et al., 2001). Os resultados publicados demonstram que os pós produzidos atingem especificações relevantes para polimento óptico, como tamanho médio de partícula abaixo de 200 nm e teor de CeO_2 superior a 95%, mas sem validação industrial.

A demanda nacional por *slurries* de CeO_2 para polimento óptico e para CMP é atendida integralmente por importações. No segmento de CMP — o de maior exigência técnica, com especificações de contaminação metálica abaixo de ppb e distribuição granulométrica rigorosa (Park et al., 2023) — a dependência de fornecedores internacionais como Entegris, Ferro e Solvay é total, sem nenhum produtor nacional identificado.

O hiato entre a competência laboratorial disponível e a ausência de escalonamento industrial reflete a falta de financiamento específico para projetos cooperativos empresa–ICT voltados à validação industrial de *slurries* nacionais. A expansão prevista de fábricas de semicondutores e painéis solares no Brasil, no âmbito do Programa Nacional de Semicondutores (Brasil, 2023), configura demanda interna projetada que

poderia justificar um programa de desenvolvimento de *slurries* nacionais de CeO_2 , a exemplo do que a Coreia do Sul e o Japão implementaram nas décadas de 1990 e 2000.

9.4.3 Fabricação de vidros planos e de embalagem com CeO_2 (descoloração e proteção UV) — Nível: Parcial

A indústria vidreira brasileira é a mais desenvolvida da América Latina e a décima maior do mundo em volume, com produtores como Owens-Illinois Brasil, Saint-Gobain Vidros, Vivix e Cebrace operando plantas modernas com domínio pleno do processo de fusão e conformação de vidro sodo-cálcico (ABIVIDRO, 2024). O uso de CeO_2 como agente descolorante — para oxidar o Fe^{2+} a Fe^{3+} e neutralizar o verde do ferro nas composições vitrosas — é prática industrial consolidada nessas unidades desde a segunda metade do século XX (Bamford, 1977; Shelby, 2005).

O domínio nacional, contudo, é parcial: o processo de fabricação do vidro é plenamente dominado, mas o CeO_2 utilizado como insumo é 100% importado, majoritariamente da China. Não existe no País nenhum fornecedor nacional de CeO_2 de grau vidreiro ou de grau proteção UV, o que expõe a indústria a riscos de abastecimento e volatilidade cambial. A ABIVIDRO (2024) registra que os fabricantes nacionais de vidro utilizam exclusivamente CeO_2 importado, com o insumo representando componente de custo crescente na formulação de vidros planos de alta transparência e vidros de embalagem premium. A substituição por CeO_2 nacional, caso disponível nas especificações requeridas, representaria redução de custo logístico e maior segurança de abastecimento para toda a indústria vidreira nacional.

9.4.4 Fabricação de lentes oftálmicas especiais com Ce e Eu (proteção solar e fotocromáticas) — Nível: Parcial

O Brasil é um dos maiores mercados mundiais de lentes oftálmicas, com produção nacional de lentes de resina orgânica e de lentes minerais em vidro sodo-cálcico. Empresas como Indo Ótica, Essilor do Brasil e cooperativas óticas fabricam ou montam lentes no País, com domínio do processo de conformação, tratamento superficial e controle de qualidade óptica. Lentes com proteção UV que incorporam CeO_2 ou compostos de $\text{Ce}^{2+}/\text{Ce}^{3+}$ como absorventes seletivos — bloqueando a faixa de 300–380 nm sem interferência na transmitância do visível — são produzidas no País com insumos importados (Grand View Research, 2024c).

As lentes fotocromáticas, que incorporam compostos de európio (Eu^{3+}) em matrizes vítreas ou poliméricas para controle da absorção ativa por excitação UV, representam segmento de maior valor agregado no qual a dependência de tecnologia e insumos estrangeiros é integral. Os compostos de Eu utilizados são fornecidos exclusivamente por produtores europeus e asiáticos (Zhong et al., 2023). O nível Parcial reflete o fato de que a capacidade produtiva de lentes existe e opera nacionalmente, mas o componente diferenciador de desempenho — os compostos de TR que conferem funcionalidade específica — é integralmente importado, e a tecnologia de formulação desses compostos permanece como caixa-preta para os fabricantes nacionais de lentes.

9.4.5 Vidros ópticos de alto índice de refração com La_2O_3 — Nível: Crítico

Os vidros ópticos lantânicos — famílias LaK, LaF e LaSF das tabelas de Schott e Ohara — constituem a principal plataforma de materiais para lentes de câmeras fotográficas, sistemas de imagem médica, telescópios, microscópios e sensores de veículos autônomos. Essas composições incorporam de 35% a 70% em massa de La_2O_3 para atingir índices de refração entre 1,65 e 1,90, com baixa dispersão, permitindo o design de óptica compacta de alto desempenho (Schott, 2025; Nohman et al., 2023).

O Brasil não possui nenhuma capacidade industrial nacional de produção de vidros ópticos lantânicos. A totalidade do vidro óptico de precisão utilizado no País — por instituições de defesa, universidades, fabricantes de instrumentos e montadores de sistemas ópticos — é importada de Schott (Alemanha), Ohara (Japão), CDGM (China) e AGC (Japão). A dependência é estrutural: não existe no País nem a matéria-prima (La_2O_3 de grau óptico), nem o forno óptico de fusão, nem o processo de recozimento e medição de constantes ópticas em especificações de vidro óptico.

A pesquisa universitária em vidros com La_2O_3 existe em grupos da UFPE, UFRJ, CePOF/USP São Carlos e LaMaV/CeRTEV (UFSCar/UNESP), com publicações em síntese de vidros borato, fosfato e silicato dopados com La e outros TR. O CLA/IPEN produz cristais e vidros especiais dopados com TR para aplicações em lasers e sensores de defesa, em escala de laboratório e pequenas séries. Esses avanços, embora tecnicamente relevantes, não configuram capacidade industrial e não atendem às especificações das tabelas de constantes ópticas padronizadas (Schott, 2025), sem as quais não é possível fornecer vidro óptico para a indústria de câmeras ou instrumentação de precisão.

9.4.6 Produção de lentes com Nd/Pr (didímio) para proteção em soldagem e filtros ópticos — Nível: Incipiente

As lentes de proteção para soldagem e corte a laser que incorporam óxido de didímio — mistura natural de Nd_2O_3 e Pr_2O_3 — exploram a absorção seletiva do Nd^{3+} na faixa de 580 nm (correspondente ao brilho laranja do arco elétrico) e do Pr^{3+} em faixas específicas do visível, reduzindo o ofuscamento e a fadiga visual dos operadores (Bamford, 1977). As lentes de proteção para lasers de Nd:YAG (1.064 nm) também dependem de absorventes seletivos de TR incorporados em substratos vítreos ou poliméricos.

O Brasil não possui produção industrial nacional de lentes de didímio nem de filtros ópticos com TR para aplicações de proteção individual ou industrial. O mercado nacional — abastecido por importações da Europa e da China — é atendido por produtos sem conformidade declarada com as normas ANSI Z87.1 (ANSI, 2020) em parte significativa dos itens comercializados em segmentos de menor exigência. A pesquisa universitária no tema está presente na Universidade Estadual de Maringá (UEM, Grupo de Vidros Ópticos Dopados), UFPE e UFRJ, com publicações em vidros com Nd e Pr, mas sem articulação com demanda industrial ou programa de substituição de importações. O crescimento da soldagem industrial e da manufatura aditiva a laser no Brasil amplia progressivamente o mercado potencial para esse segmento, sem correspondência em iniciativas de desenvolvimento nacional.

9.4.7 Reciclagem e recuperação de CeO_2 de pós de polimento exauridos — Nível: Incipiente

Os pós de polimento à base de CeO_2 exaurem-se após ciclos de uso pela redução da atividade abrasiva e pelo acúmulo de contaminantes metálicos e orgânicos provenientes das superfícies polidas. A recuperação de Ce a partir desses resíduos industriais é tecnicamente viável por rotas hidrometalúrgicas combinando lixiviação ácida, precipitação seletiva e calcinação, com taxas de recuperação de Ce superiores a 80% reportadas em escala laboratorial (Hoshino et al., 2001).

No Brasil, esse segmento permanece integralmente incipiente. Não existe planta industrial de recuperação de CeO_2 de pós exauridos, e a logística reversa dos resíduos de polimento — gerados em escala relevante pelas indústrias vidreira, ótica e de eletrônicos — não está estruturada. O CETEM conduziu estudos exploratórios sobre recuperação de Ce de resíduos industriais, e grupos da UFRJ e da UFMG publicaram sobre rotas de lixiviação de rejeitos contendo Ce, mas sem transição para escalonamento. A potencial ampliação da produção nacional de *slurries* de CeO_2 , prevista para o H2 do roadmap, gerará fluxos crescentes de resíduos que demandam rota de reciclagem estruturada, tanto por razões ambientais — os resíduos de CeO_2 misturado a SiO_2 e metais pesados requerem disposição controlada — quanto por razões estratégicas, já que o Ce recuperado representa insumo com valor equivalente ao de importação.

9.4.8 Aplicações em defesa, aeroespacial e instrumentação óptica de precisão com TR — Nível: Incipiente

As aplicações de vidros e cristais com TR em sistemas ópticos de defesa e aeroespaciais — incluindo janelas de infravermelho com Y_2O_3 e MgF_2 , espelhos de lasers de alta potência dopados com Nd, cristais cintiladores para detectores de radiação e vidros de blindagem com Gd_2O_3 e Pb — representam um dos segmentos de maior exigência técnica e de maior sensibilidade estratégica desta cadeia (Goldman, 2010; Harris, 2013).

O Instituto de Estudos Avançados (IEAv/CTA), em São José dos Campos, conduz pesquisas em vidros e materiais ópticos para aplicações de defesa e aeroespacial, com competência reconhecida em laser de estado sólido e óptica adaptativa (IEAv, 2024). O CLA/IPEN produz cristais e vidros dopados com TR para lasers e detectores em escala de laboratório e pequenas séries para programas estratégicos nacionais. O IPT mantém laboratório de óptica com capacidade de caracterização metrológica de componentes ópticos.

Contudo, nenhuma dessas iniciativas configura cadeia produtiva integrada: os materiais de base (vidros e cristais com TR) utilizados pelo IEAv e pelos programas de defesa são majoritariamente importados — restringindo a soberania tecnológica precisamente nos insumos mais sensíveis. A dependência de importações de Schott e de produtores chineses para vidros ópticos utilizados em sistemas de defesa representa vulnerabilidade estratégica relevante, cujo endereçamento requer não apenas investimento em P&D, mas decisão política explícita de priorização de conteúdo nacional em compras governamentais de defesa e de instrumentação científica.

9.5 Competência atual associada à cadeia produtiva: grupos de pesquisa e capacidade científico-tecnológica brasileira

O mapeamento dos grupos de pesquisa ativos no Brasil constitui etapa essencial para identificar as competências disponíveis, as lacunas a suprir e as parcerias estratégicas a construir. As competências científicas existentes constituem uma base importante para iniciativas futuras de inovação e desenvolvimento industrial.

A partir de levantamento realizado junto à Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa do MCTI e ao Diretório de Grupos de Pesquisa no Brasil do CNPq, foi possível identificar 14 grupos que desenvolvem linhas de pesquisa em materiais para aplicações ópticas avançadas no Brasil à base de TR, concentrando-se na síntese de nanopartículas de céria por métodos químicos (precipitação, sol-gel, hidrotérmico), na caracterização de slurries para polimento e na investigação de vidros com TR para aplicações fotônicas, com transferência tecnológica potencial para o segmento industrial ainda dependente de insumos importados (Quadro 9.4).

O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) mantém competência estabelecida em hidrometalurgia de TR, incluindo rotas de purificação de CeO_2 por extração por solvente em escala piloto. O IPT detém *know-how* em caracterização de pós abrasivos e processos de polimento industrial. A lacuna crítica persiste entre a competência científica laboratorial e a transferência para escala industrial: nenhuma empresa nacional produz CeO_2 de grau óptico ou slurries de CMP com TR em escala comercial.

Quadro 9.4 Grupos de pesquisa no Brasil com atuação no desenvolvimento de materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR

Grupo de pesquisa	Instituição	Linhas de pesquisa em pós para polimento e vidros especiais com TR	Potencial de aplicação industrial
CePOF – Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica	USP – São Carlos (SP)	Materiais fotônicos e híbridos luminescentes com lantanídeos; espectroscopia de sólidos com propriedades ópticas; fibras e componentes fotônicos dopados com terras raras.	Fibras ópticas, lasers de estado sólido, sensores ópticos especializados e guias de onda dopados com TR.
LaMaV - Laboratório de Materiais Vitreos	UFSCar – São Carlos (SP)	Síntese e caracterização de vidros e vitrocerâmicas especiais; vidros ópticos de alto índice de refração; nucleação e crescimento cristalino com terras raras.	Vidros ópticos de alta performance para instrumentação óptica; componentes fotônicos; vidros para armazenamento de energia.
LIEC – Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica	UFSCar – São Carlos (SP)	Síntese e engenharia de nanopartículas de CeO_2 e outros óxidos de terras raras; controle morfológico e granulométrico de pós; cerâmicas estruturais à base	Pós abrasivos para polimento de vidros e semicondutores; estabilizadores de zircônia para óptica e eletrônica;

Grupo de pesquisa	Instituição	Linhas de pesquisa em pós para polimento e vidros especiais com TR	Potencial de aplicação industrial
		de zircônia estabilizada com TR.	revestimentos cerâmicos funcionais.
CDMF – Centro de Desenvolvimento de Materiais Funcionais	UFSCar – São Carlos (SP);	Síntese e caracterização de óxidos de terras raras (CeO_2 , La_2O_3 e outros); fotoluminescência de cerâmicas dopadas com lantanídeos; modificação de superfície de nanopartículas de TR.	Pós luminescentes e abrasivos para polimento de precisão; fósforos para iluminação de estado sólido; dispositivos optoeletrônicos.
CLA – Centro de Lasers e Aplicações / Laboratório de Espectroscopia Óptica	IPEN-CNEN – São Paulo (SP)	Crescimento de cristais e vidros (fluoretos, fluorofosfatos) dopados com terras raras para lasers de estado sólido; guias de onda em vidros dopados com TR; processos de conversão de energia em TR^{3+} .	Lasers médicos e industriais; amplificadores ópticos para telecomunicações; sensores de alta precisão; dispositivos ópticos integrados.
Laboratórios de Bioinorgânica e Terras Raras - FFCLRP	USP – Ribeirão Preto (SP)	Síntese e aplicação de CeO_2 via rota orgânica; materiais luminescentes conversores de luz com TR; complexos de lantanídeos para catálise e fotoluminescência.	Pós à base de CeO_2 para catálise e polimento; materiais luminescentes para segurança e rastreabilidade; fósforos para conversão de luz.
Grupo de Vidros Ópticos Dopados com TR	UEM – Maringá (PR)	Vidros ópticos e vitrocerâmicas dopados com terras raras para lasers no visível e infravermelho; caracterização espectroscópica de matrizes vítreas com TR; lentes de proteção com Nd/Pr.	Lasers industriais e médicos; janelas ópticas para infravermelho; amplificadores a fibra para comunicação óptica.
Grupo de Materiais Luminescentes com TR	USP – Instituto de Química – São Paulo (SP)	Materiais luminescentes e híbridos orgânico-inorgânicos com lantanídeos; marcadores ópticos e sensores; complexos de TR para LEDs convertidos por fósforo.	Fósforos para iluminação de estado sólido; tintas de segurança e autenticação; sensores ópticos químicos e biológicos.
INCT MATERIA – Materiais Avançados à Base de Terras Raras: Inovações e Aplicações	UFAM – Manaus (AM); em rede com CDTN, IPEN, UFSC, USP, UFABC, UFES, UFMG, UFCAT, CETEM, IPT, SENAI-SP e outras (15 instituições)	Síntese de cerâmicas e óxidos de TR para dispositivos optoeletrônicos; extração sustentável e refino de TR para produção de óxidos de alta pureza; materiais TR para óptica e armazenamento de energia.	Cadeia integrada de TR desde a extração até o produto final; cerâmicas optoeletrônicas; vidros e pós funcionais para energia, eletrônica e óptica.
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral	MCTI – Rio de Janeiro (RJ)	Hidrometalurgia e separação de TR para obtenção de óxidos de alta pureza (CeO_2 , La_2O_3 , Y_2O_3); processos de refino por extração líquido-líquido e	Produção industrial de CeO_2 e La_2O_3 grau óptico para polimento e vidros especiais; domínio do processo de separação como gargalo

Grupo de pesquisa	Instituição	Linhas de pesquisa em pós para polimento e vidros especiais com TR	Potencial de aplicação industrial
		troca iônica; reciclagem de resíduos com TR.	estratégico da cadeia de TR.
Grupo de Pesquisa em Materiais Vítreos e Óptica (UFPE)	UFPE – Departamento de Física - Recife (PE)	Síntese de nanocéria (CeO_2) por rotas hidrotérmica e sol-gel; formulação de <i>slurries</i> experimentais para polimento; vidros ópticos de alto índice de refração com La_2O_3 e Nd_2O_3 ; guias de onda planares dopados com TR.	Pós de CeO_2 para polimento óptico; vidros lantânicos para sistemas de imageamento; amplificadores ópticos a fibra.
Grupo de Nanomateriais e Cerâmicas (associado ao CTNano/UFMG)	UFMG – Belo Horizonte (MG)	Síntese de nanocéria por precipitação e rota hidrotérmica; controle morfológico de partículas de CeO_2 para aplicações em CMP; caracterização de suspensões abrasivas com TR.	Pós de CeO_2 para polimento químico-mecânico de <i>wafers</i> e superfícies ópticas; materiais cerâmicos funcionais com TR.
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas	IPT – São Paulo (SP)	Caracterização de pós abrasivos à base de CeO_2 e outros óxidos de TR; avaliação de processos de polimento industrial de vidros, lentes e superfícies ópticas; ensaios de desempenho de <i>slurries</i> para CMP.	Qualificação de pós abrasivos para indústria óptica nacional; suporte técnico a processos de polimento de precisão; certificação de insumos para a cadeia de vidros e semicondutores.
IEAv/CTA – Instituto de Estudos Avançados / Centro Técnico Aeroespacial	IEAv/CTA – São José dos Campos (SP)	Pesquisa em vidros e cristais dopados com TR para aplicações em lasers de defesa e aeroespacial; óptica de precisão para sensores e sistemas de guiamento; materiais para janelas ópticas em condições extremas.	Lasers de alta potência para defesa; componentes ópticos para aeronaves e satélites; sistemas de sensoriamento óptico de precisão para aplicações militares e aeroespaciais.

Fonte: Consulta à Plataforma Nacional de Infraestrutura de Pesquisa do MCTI e ao Diretório de Grupos de Pesquisa no Brasil do CNPq.

Nota: Nenhum grupo de pesquisa brasileiro atua exclusivamente no desenvolvimento de materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR. A competência científica e tecnológica nacional concentra-se nas etapas de síntese, caracterização e funcionalização de óxidos de TR, com transferência tecnológica potencial para o segmento industrial ainda dependente de insumos importados.

9.6 Visão de futuro e objetivos estratégicos: horizonte 2040

9.6.1 Enunciado da visão

"Em 2040, o Brasil consolida uma cadeia produtiva competitiva e sustentável de materiais para aplicações ópticas avançadas à base de terras raras, articulando a produção nacional de CeO_2 e La_2O_3 de grau óptico, a formulação de slurries e o desenvolvimento de vidros com desempenho em padrão internacional. Essa cadeia abastece aplicações estratégicas em semicondutores, óptica de precisão, saúde e defesa, com participação crescente nos mercados regional e global e contribuição mensurada para a soberania tecnológica e a neoindustrialização do País".

Esse enunciado posiciona o Brasil não apenas como fornecedor de matérias-primas minerais, mas como ator integrado ao longo de toda a cadeia de valor, da lavra e separação de CeO_2 e La_2O_3 à formulação de materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR para mercados tecnológicos de fronteira.

9.6.2 Dimensões estratégicas e objetivos para 2040

Definiu-se para a cadeia de pós para polimento e fabricação de vidros e lentes a visão de futuro para 2040 e os objetivos estratégicos para alcançar essa visão, expressos de acordo com as dimensões de análise do presente estudo.

A partir dessa visão, o Quadro 9.5 apresenta, para cada dimensão, o diagnóstico da situação atual, os objetivos estratégicos prioritários e a situação-alvo projetada para 2040.

Quadro 9.5: Objetivos estratégicos para alcance da visão de futuro 2040 da cadeia produtiva de materiais para aplicações ópticas avançadas à base de TR no Brasil

Dimensão	Situação atual (2026)	Objetivos estratégicos	Situação 2040
Estrutura da cadeia e insumos críticos	Dependência elevada de importações de CeO_2 e La_2O_3 de grau óptico; ausência de produção nacional integrada de óxidos de alta pureza, pós formulados e slurries; infraestrutura industrial ainda fragmentada.	– Implantar capacidade nacional de produção e purificação de CeO_2 e La_2O_3 de grau óptico, com integração progressiva às etapas de formulação de pós para polimento e slurries de alto desempenho. – Estruturar uma cadeia doméstica articulada entre mineração, refino, formulação, certificação e fornecimento industrial, com rastreabilidade e segurança de abastecimento para aplicações estratégicas.	Cadeia produtiva nacional parcialmente integrada e competitiva, com produção regular de óxidos e formulações de maior valor agregado, redução da vulnerabilidade externa e maior previsibilidade de suprimento para os segmentos usuários.

Dimensão	Situação atual (2026)	Objetivos estratégicos	Situação 2040
Segmentos de aplicação	As aplicações nacionais concentram-se em usos industriais já estabelecidos, especialmente no setor vidreiro e ótico, com baixa inserção em segmentos de maior intensidade tecnológica, como semicondutores, defesa e instrumentação avançada.	– Ampliar o uso de pós para polimento e de vidros especiais com terras raras em segmentos de maior valor agregado, como semicondutores, óptica de precisão, saúde, defesa e instrumentação científica. – Estimular a internalização de atividades de prototipagem, validação e fornecimento para aplicações críticas, de modo a ancorar demanda doméstica qualificada e acelerar a difusão industrial dessas tecnologias.	Presença ampliada de materiais e soluções nacionais em múltiplos segmentos estratégicos, com maior diversificação de mercados, consolidação de nichos tecnológicos e inserção crescente em cadeias regionais e globais de maior valor agregado.
PD&I e recursos humanos	Há grupos de pesquisa qualificados e competências científicas dispersas, mas ainda com baixa articulação sistêmica, pouca conversão em inovação industrial e insuficiente formação de massa crítica voltada à cadeia produtiva.	– Fortalecer redes cooperativas de PD&I em síntese, processamento, caracterização e aplicação de pós, <i>slurries</i>, vidros e lentes com terras raras, aproximando universidades, ICTs e empresas. – Formar e reter recursos humanos especializados em materiais avançados, óptica, engenharia de processos, metrologia e sustentabilidade, com foco na industrialização e no escalonamento tecnológico.	Ecossistema nacional de inovação mais denso e coordenado, com competências científicas e tecnológicas convertidas em protótipos, patentes, processos produtivos e soluções industriais, apoiado por base estável de recursos humanos especializados.
Mercado e política industrial	O mercado brasileiro é atendido majoritariamente por importações, sem instrumentos específicos suficientemente consolidados para induzir a produção local, a agregação de valor e a inserção competitiva da cadeia na agenda industrial.	– Criar instrumentos de política industrial, financiamento e compras estratégicas capazes de induzir a produção nacional, a escala produtiva e a agregação de valor ao longo da cadeia. – Posicionar o Brasil como fornecedor regional relevante de materiais e soluções em terras raras para polimento e vidros especiais, com foco em substituição competitiva de importações e expansão seletiva das exportações.	Mercado doméstico com participação crescente de produção nacional, ambiente institucional mais favorável ao investimento e à inovação e presença brasileira mais consistente em mercados regionais e em nichos globais selecionados.
Regulação e sustentabilidade	Persistem lacunas regulatórias e normativas	– Estabelecer marcos regulatórios e normativos claros para	Ambiente regulatório estável e previsível, com normas

Dimensão	Situação atual (2026)	Objetivos estratégicos	Situação 2040
	para materiais de grau óptico, gestão de resíduos, rastreabilidade e certificação, além de baixa institucionalização de práticas de circularidade e avaliação de impactos ao longo da cadeia.	produção, uso, certificação, transporte e destinação de materiais contendo terras raras, em convergência com padrões técnicos e ambientais internacionais. – Incorporar princípios de sustentabilidade e economia circular à cadeia, com metas de eficiência material, reciclagem, recuperação de resíduos e mensuração de impactos ambientais, sociais e climáticos.	reconhecidas, sistemas de rastreabilidade e certificação em operação e incorporação efetiva de práticas de circularidade e sustentabilidade na governança da cadeia produtiva.

9.7 Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Materiais para Aplicações Ópticas Avançadas à base de TR no Brasil: 2026–2040

A construção do Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Materiais para Aplicações Ópticas Avançadas à base de TR no Brasil requer a articulação, de forma sequenciada e interdependente, marcos regulatórios, investimentos produtivos, desenvolvimento tecnológico e formação de capacidades nacionais, segundo três horizontes temporais:

- **Horizonte 1 (H1) – Fundações institucionais e ativação dos primeiros elos da cadeia (2026–2030):** consolidação da infraestrutura científica e regulatória, planejamento dos primeiros investimentos produtivos e mapeamento sistemático da cadeia produtiva.
- **Horizonte 2 (H2) – Escalonamento rumo à consolidação da cadeia de valor (2031–2035):** transição da escala laboratorial para plantas-piloto e produção industrial; integração vertical entre produtores de precursores de TR, formuladores de pós para polimento e usuários finais; e consolidação de consórcios empresa–ICT.
- **Horizonte 3 (H3) – Consolidação industrial e maior protagonismo internacional (2036–2040):** Operação plena da cadeia integrada, com exportação de produtos de alto valor agregado, conformidade a normas internacionais de sustentabilidade e posicionamento competitivo nos mercados regional e global.

O horizonte 1 (2026–2030) é decisivo para esta cadeia, pois define, por meio de investimentos, regulação e capacitação, a possibilidade de avanço em valor agregado. (Quadro 9.6).

O horizonte 2 (H2) representa a conversão das bases construídas anteriormente em capacidade produtiva real. A ênfase migra da estruturação para a operacionalização: trata-se de fechar os elos da cadeia, superar

os gargalos de escalonamento que tipicamente paralisam a transição piloto–indústria e consolidar as condições para uma competitividade técnica e econômica sustentável (Quadro 9.7).

O horizonte 3 (H3) representa a maturação da posição estratégica do Brasil na cadeia global de fósforos de TR. O país deverá, nesse horizonte, não apenas suprir sua demanda interna com produção nacional de alto desempenho, mas também projetar-se como fornecedor regional e global de produtos de maior valor agregado, com rastreabilidade e desempenho ambiental mensuráveis (Quadro 9.8).

O Quadro 9.9 apresenta a síntese do Mapa do Caminho Estratégico em perspectiva temporal comparativa, permitindo visualizar a trajetória de evolução esperada para cada dimensão estratégica ao longo do horizonte 2026-2040.

Quadro 9.6: Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Materiais para Aplicações Ópticas Avançadas à base de TR no Brasil Horizonte 1 (H1): Curto prazo (2026–2030)

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Estrutura da cadeia e insumos críticos	Realizar estudo de viabilidade técnico-econômica para implantação de planta industrial de separação de CeO_2 e La_2O_3 de grau óptico (capacidade inicial: 200–500 t/ano), com mapeamento de oferta de concentrados nacionais.	2027–2028	MME, CETEM, BNDES, mineradoras (Serra Verde, CBMM, outros), universidades
	Mapear e inventariar os fluxos de CeO_2 , La_2O_3 e Nd_2O_3 na cadeia produtiva nacional de pós de polimento e vidros: volumes importados, fornecedores, padrões de qualidade exigidos e pontos de entrada no sistema produtivo.	2026–2028	MME, ANM, CETEM, INMETRO, indústria vidreira (ABIVIDRO), fabricantes de lentes e pós
	Realizar síntese e caracterização de pós de CeO_2 para polimento óptico em escala laboratorial (validação de pós com $d_{50} < 200$ nm e pureza $\geq 99,9\%$) em parceria com usuários industriais (fabricantes de lentes, vidreira).	2027–2030	UFPE, USP, UFRJ, UFMG, CETEM, empresas parceiras (setor vidreiro e ótico)
Segmentos de aplicação	Desenvolver projeto cooperativo universidade-empresa para validação de CeO_2 nacional (síntese laboratorial) como substituto de produto importado em polimento de vidros planos e lentes oftálmicas.	2027–2030	USP, UFPE, UFRJ, empresas do setor vidreiro e ótico (ABIVIDRO, ABIÓPTICA), EMBRAPII
	Mapear oportunidades de fornecimento de <i>slurries</i> de CeO_2 para o setor de semicondutores e eletrônica (CMP) no Brasil, considerando expansão de fábricas de chips e painéis no contexto da neointustrialização.	2026–2027	MDIC, MCTI, BNDES, empresas de semicondutores, ABINEE

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	Iniciar pesquisa aplicada em síntese de vidros ópticos com La_2O_3 de alta pureza em escala laboratorial, em parceria com potenciais produtores nacionais de La_2O_3 e usuários de vidros de precisão (defesa, instrumentação).	2027–2030	UFPE, USP, IEAv/CTA, IPEN, Embrapa Instrumentação, FINEP
PD&I e recursos humanos	Criar Rede Nacional de P,D&I em Pós de Polimento e Vidros Ópticos com TR, articulando grupos universitários, ICTs, setor vidreiro e fabricantes de lentes em plataforma colaborativa.	2026–2027	MCTI, CNPq, FINEP, EMBRAPAII, SBQ, ABCeram, ABIVIDRO, ABIÓPTICA
	Lançar chamada pública de P&D (R\$ 15–25 milhões) voltada a pós de polimento com CeO_2 , vidros ópticos com La_2O_3 e lentes especiais com Nd/Pr, priorizando projetos cooperativos empresa-ICT.	2027	FINEP, CNPq, FAPESP, FAPERJ, FAPEMIG, empresas (Lei do Bem)
PD&I e recursos humanos (cont.)	Modernizar infraestrutura de síntese e caracterização de pós de CeO_2 e vidros com TR em pelo menos quatro ICTs (granulometria a laser, BET, MEV-EDS, XRD, espectroscopia UV-Vis-NIR), com acesso compartilhado ao setor produtivo.	2026–2030	MCTI, FINEP, universidades, CETEM, INMETRO, IPT
	Estabelecer programa de bolsas de mestrado e doutorado em síntese de pós de CeO_2 , processamento de vidros ópticos com TR e caracterização de <i>slurries</i> para CMP (meta: 15 bolsas/ano).	2027–2028	CAPES, CNPq, empresas via programas de P&D
Mercado e política industrial	Regulamentar a inclusão de pós de polimento com TR e vidros ópticos com La_2O_3 como insumos prioritários na Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (PNMCE), com instrumentos de incentivo à produção nacional.	2026–2027	MME, MCTI, MDIC, Casa Civil, Congresso Nacional
	Realizar estudo prospectivo de mercado de pós para polimento e vidros/lentes com TR no Brasil e América Latina (2026–2040), por segmento (polimento óptico, CMP, vidros planos, lentes oftálmicas, defesa, aeroespacial).	2026–2027	MDIC, MCTI, BNDES, consultorias, ABIVIDRO, ABIÓPTICA, ABINEE
Regulação e sustentabilidade	Elaborar normas técnicas ABNT e regulamentos INMETRO para especificação, ensaio e certificação de pós de CeO_2 para	2027–2030	ABNT, INMETRO, MCTI, MDIC, universidades, setor produtivo

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	polimento óptico e vidros com TR, alinhados a padrões internacionais (ISO, ASTM, DIN).		
	Desenvolver protocolo nacional para caracterização ambiental e gestão de resíduos de pós de polimento com CeO ₂ (lamas de polimento, <i>slurries</i> descartados) em conformidade com PNRS e Resolução CONAMA.	2027–2030	MMA, IBAMA, INMETRO, IPT, CETEM, empresas geradoras, universidades

Quadro 9.7: Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Materiais para Aplicações Ópticas Avançadas à base de TR no Brasil Horizonte 2 (H2): Médio prazo (2031–2035)

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Estrutura da cadeia e insumos críticos	Iniciar operação da primeira planta industrial de separação e purificação de CeO ₂ de grau óptico e de polimento (capacidade inicial: 300–500 t/ano, pureza ≥99,9%), com suprimento de concentrados nacionais.	2031	Consórcio empresarial, BNDES, MME, MCTI, mineradoras, CETEM
	Estabelecer contratos de fornecimento de longo prazo entre produtores de CeO ₂ nacional e fabricantes de vidros, lentes e pós de polimento, com especificações técnicas negociadas e auditadas.	2031–2032	Produtores de TR, indústria vidreira (ABIVIDRO), fabricantes de lentes (ABIÓPTICA), MDIC
	Implantar linha de produção de La ₂ O ₃ de grau óptico (pureza ≥99,99%) para suprir a demanda nacional de vidros ópticos de alto índice de refração, com capacidade inicial de 50–100 t/ano.	2031–2033	Consórcio de produtores de TR, BNDES, MCTI, empresas vidreira e de óptica de precisão
Segmentos de aplicação	Validar e iniciar produção comercial de <i>slurries</i> de CeO ₂ nacional para polimento de vidros planos e lentes oftálmicas, atendendo ao menos 20% da demanda interna nesses segmentos até 2033.	2031–2033	Empresas nacionais de pós de polimento, setor vidreiro, EMBRAPII, BNDES
	Desenvolver e testar protótipos de <i>slurries</i> de CeO ₂ nacional para aplicações CMP em colaboração com fabricantes de semicondutores e painéis instalados no Brasil.	2031–2034	Empresas de semicondutores, ABINEE, USP, UFPE, UFRJ, EMBRAPII, MCTI

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	Implantar linha piloto nacional de vidros ópticos com La_2O_3 de alto índice de refração para lentes de precisão, em parceria com institutos de defesa e empresas de instrumentação.	2032–2034	IEAv/CTA, IPEN, USP, UFPE, EMBRAPPII, empresas de óptica de precisão e defesa
	Ampliar o uso de CeO_2 e Eu_2O_3 nacionais em lentes oftálmicas fotossensíveis e antiUV produzidas no Brasil, reduzindo dependência de importações em pelo menos 30% até 2034.	2031–2034	Empresas óticas (ABIÓPTICA), produtores de TR nacionais, MDIC, BNDES
PD&I e recursos humanos	Criar Centro de Referência Nacional em Pós de Polimento Óptico e Vidros com Terras Raras, com infraestrutura compartilhada de síntese piloto, caracterização avançada de <i>slurries</i> e prototipagem de vidros especiais.	2031	MCTI, FINEP, BNDES, consórcio de universidades (USP, UFPE, UFRJ, UFMG), ICTs, empresas
	Aumentar o depósito de patentes brasileiras em pós de polimento com CeO_2 e vidros ópticos com $\text{La}_2\text{O}_3/\text{Nd}_2\text{O}_3$ para >10/ano, com foco em síntese, formulação de <i>slurries</i> e processos de purificação.	2031–2034	Universidades, ICTs, empresas nacionais, INPI, agências de propriedade intelectual
	Consolidar programa de formação, atingindo acúmulo de mais de 60 mestres/doutores especializados em síntese de pós de polimento, vidros ópticos e processamento de TR.	2031–2034	CAPES, CNPq, universidades, programas de pós-graduação em Química, Física e Eng. de Materiais
Mercado e política industrial	Implementar mecanismo de preferência em compras públicas para produtos com CeO_2 nacional em polimento de vidros e lentes (iluminação pública, contratos governamentais de ótica).	2031–2032	MDIC, MME, MCTI, prefeituras, órgãos de defesa, compras governamentais
	Iniciar exportações de pós de CeO_2 de polimento de qualidade internacional para mercados da América Latina (Argentina, Chile, Colômbia, Peru), com meta de >US\$ 5 milhões/ano até 2034.	2032–2034	Empresas nacionais, APEX-Brasil, MDIC, MRE
Regulação e sustentabilidade	Operacionalizar sistema de logística reversa para lamas e resíduos de pós de polimento com CeO_2 , com recuperação e reprocessamento de ao menos 40% do volume gerado nas indústrias participantes.	2031–2033	MMA, SINIR, empresas de polimento, gestoras de resíduos, IPT, CETEM

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	Publicar inventário nacional de ciclo de vida (LCA) de CeO ₂ para polimento óptico, com dados de emissões e consumo de recursos para processos nacionais, integrado à base de dados do IBICT.	2031–2033	IBICT, universidades, ABNT, INMETRO, empresas produtoras, MCTI
PD&I e recursos humanos	Criar Centro de Referência Nacional em Pós de Polimento Óptico e Vidros com Terras Raras, com infraestrutura compartilhada de síntese piloto, caracterização avançada de <i>slurries</i> e prototipagem de vidros especiais.	2031	MCTI, FINEP, BNDES, consórcio de universidades (USP, UFPE, UFRJ, UFMG), ICTs, empresas
	Aumentar o depósito de patentes brasileiras em pós de polimento com CeO ₂ e vidros ópticos com La ₂ O ₃ /Nd ₂ O ₃ para >10/ano, com foco em síntese, formulação de <i>slurries</i> e processos de purificação.	2031–2034	Universidades, ICTs, empresas nacionais, INPI, agências de propriedade intelectual
	Consolidar programa de formação, atingindo acúmulo de >60 mestres/doutores especializados em síntese de pós de polimento, vidros ópticos e processamento de TR.	2031–2034	CAPES, CNPq, universidades, programas de pós-graduação em Química, Física e Eng. de Materiais
Mercado e política industrial	Implementar mecanismo de preferência em compras públicas para produtos com CeO ₂ nacional em polimento de vidros e lentes (iluminação pública, contratos governamentais de ótica).	2031–2032	MDIC, MME, MCTI, prefeituras, órgãos de defesa, compras governamentais
	Iniciar exportações de pós de CeO ₂ de polimento de qualidade internacional para mercados da América Latina (Argentina, Chile, Colômbia, Peru), com meta de >US\$ 5 milhões/ano até 2034.	2032–2034	Empresas nacionais, APEX-Brasil, MDIC, MRE
Regulação e sustentabilidade	Operacionalizar sistema de logística reversa para lamas e resíduos de pós de polimento com CeO ₂ , com recuperação e reprocessamento de ao menos 40% do volume gerado nas indústrias participantes.	2031–2033	MMA, SINIR, empresas de polimento, gestoras de resíduos, IPT, CETEM
	Publicar inventário nacional de ciclo de vida (LCA) de CeO ₂ para polimento óptico, com dados de emissões e consumo de recursos para processos nacionais, integrado à base de dados do IBICT.	2031–2033	IBICT, universidades, ABNT, INMETRO, empresas produtoras, MCTI

Quadro 9.8: Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Materiais para Aplicações Ópticas Avançadas à base de TR no Brasil Horizonte 3 (H3): Longo prazo (2036–2040)

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
Estrutura da cadeia e insumos críticos	Alcançar capacidade instalada de produção de CeO_2 de grau óptico e polimento >1.000 t/ano, com fornecimento doméstico atendendo >50% da demanda industrial nacional em vidros, polimento e lentes.	2036–2040	Consórcios empresariais, operadores de plantas, BNDES, MME
	Consolidar produção nacional de La_2O_3 para vidros ópticos de alto índice de refração, com capacidade >150 t/ano, atendendo demanda de pelo menos dois fabricantes de lentes de precisão estabelecidos no País.	2036–2040	Empresas produtoras de TR, fabricantes de vidros ópticos, BNDES, MME
	Estabelecer o Brasil como exportador regional de CeO_2 de grau óptico e <i>slurries</i> de polimento para América Latina, com meta de exportações >US\$ 20 milhões/ano até 2040.	2037–2040	Produtores nacionais, APEX-Brasil, MDIC, MRE
Segmentos de aplicação	Consolidar a produção e comercialização de <i>slurries</i> de CeO_2 nacional para o mercado de polimento óptico de vidros planos, lentes e espelhos, com participação >35% da demanda interna.	2036–2040	Empresas nacionais de pós de polimento, setor vidreiro, ABIVIDRO, ABIÓPTICA
	Implantar linha de produção de <i>slurries</i> de CeO_2 para CMP de semicondutores, com qualidade certificada para uso em processos de fabricação de chips de 28 nm ou inferior.	2036–2040	Empresas de semicondutores, ABINEE, empresa nacional de pós para polimento, EMBRAPII
	Consolidar linha nacional de vidros ópticos lantânicos (La-crown e La-flint) para lentes de precisão em câmeras, equipamentos médicos e sistemas de defesa, com capacidade >200 kg/mês.	2036–2040	Empresas de vidros ópticos, IEAv/CTA, empresas de defesa, IPEN, universidades
	Lentes oftálmicas com dopantes nacionais de Ce e Eu consolidadas em pelo menos dois fabricantes nacionais, com redução de >40% na importação de óxidos para este segmento.	2036–2038	Empresas óticas, produtores nacionais de TR, ABIÓPTICA, MDIC
P&D, inovação e recursos humanos	Portfólio brasileiro de patentes em pós de polimento com CeO_2 e vidros ópticos com TR superior a 80 documentos, com pelo	2036–2040	Universidades, ICTs, empresas, INPI, MCTI

Dimensão	Ação estratégica	Prazo	Atores responsáveis
	menos 10% em uso comercial ou licenciados.		
P&D, inovação e recursos humanos	Formar acumulativamente >120 mestres/doutores em síntese de pós de polimento, processamento de vidros ópticos com TR e aplicações em semicondutores e defesa.	2036–2040	CAPES, CNPq, universidades, empresas parceiras
Mercado e política industrial	Posicionar o Brasil como fornecedor regional referência em CeO ₂ de grau óptico e vidros com La ₂ O ₃ , com certificação de sustentabilidade reconhecida internacionalmente.	2036–2040	Empresas nacionais, APEX-Brasil, MDIC, organismos internacionais de normalização
Regulação e sustentabilidade	Regulação nacional de especificação e rastreabilidade de CeO ₂ e La ₂ O ₃ industriais convergente com padrões ISO, ASTM e UE, com reconhecimento mútuo por parceiros comerciais internacionais.	2036–2040	INMETRO, ABNT, MCTI, MDIC, MME, organismos internacionais
Regulação e sustentabilidade	Recuperação e reprocessamento de pós de polimento com CeO ₂ exaurido, operacional em escala nacional, com taxa de recuperação maior que 60% do volume gerado e circularidade certificada.	2036–2040	MMA, empresas da cadeia, operadores de reciclagem, IPT, CETEM

Quadro 9.9: Síntese do Mapa do Caminho Estratégico da Cadeia Produtiva de Materiais para Aplicações Ópticas Avançadas à base de TR: Metas estratégicas por horizonte temporal (2026–2040)

Dimensão	Objetivo estratégico	Metas estratégicas		
		H1 – Fundações institucionais e ativação dos primeiros elos da cadeia (2026-2030)	H2 – Escalonamento rumo à consolidação da cadeia de valor (2031-2035)	H3 – Consolidação industrial e maior protagonismo internacional
Estrutura da cadeia e integração a montante	Implantar capacidade nacional de produção e purificação de CeO ₂ e La ₂ O ₃ de grau óptico com integração progressiva às etapas de formulação de pós para polimento e slurries.	Levantamento sistemático de fluxos e demandas nacionais; estudos de viabilidade técnico-econômica; síntese laboratorial de CeO ₂ de grau óptico em parceria com ICTs e setor vidreiro; articulação com mineradoras e refinadores nacionais.	Operação da 1ª planta industrial de CeO ₂ de grau óptico (300–500 t/ano); implantação de linha de La ₂ O ₃ de grau óptico (50–100 t/ano); contratos de fornecimento de longo prazo firmados com usuários nacionais.	Capacidade instalada ≥1.000 t/ano de CeO ₂ e ≥200 t/ano de La ₂ O ₃ de grau óptico; Brasil posicionado como exportador regional de precursores ópticos com rastreabilidade e certificação de sustentabilidade.
Segmentos de aplicação e competências tecnológicas	Ampliar o uso de pós para polimento e vidros especiais com TR em segmentos de maior valor agregado: semicondutores, óptica de precisão, saúde, defesa e instrumentação científica.	Projetos cooperativos universidade–empresa para validação de CeO ₂ nacional em polimento de vidros e lentes; mapeamento de oportunidades em CMP de semicondutores; pesquisa aplicada em vidros ópticos lantânicos.	Produção comercial de slurries de CeO ₂ validados; protótipos de vidros ópticos lantânicos testados por usuários; primeiras exportações de pós de polimento para a América Latina (>US\$ 5 M/ano).	Produção consolidada de pós para CMP, vidros ópticos lantânicos e lentes com dopantes nacionais; >30% da demanda interna de polimento óptico abastecida por produção nacional.
P&D, inovação e recursos humanos	Fortalecer redes cooperativas de PD&I em síntese, processamento e caracterização de materiais ópticos com TR; formar e reter massa crítica de recursos humanos especializados.	Criação da Rede Nacional de PD&I em Pós e Vidros com TR; chamada pública de P&D (R\$ 15–25 M); modernização de infraestrutura em ≥4 ICTs; programa de bolsas de mestrado e doutorado (15/ano).	Implantação do Centro de Referência Nacional; portfólio inicial de patentes brasileiras; formação acumulada de mais de 60 mestres/doutores; incorporação de design computacional de materiais (DFT, ML).	Portfólio brasileiro de ≥80 patentes em pós e vidros ópticos com TR, com ≥10% em uso comercial ou licenciadas; formação acumulada de mais de 120 especialistas; Centro de Referência em operação plena.

Mercado, inserção internacional e política industrial	Criar instrumentos de política industrial, financiamento e compras estratégicas para induzir a produção nacional e posicionar o Brasil como fornecedor regional de materiais ópticos com TR.	Regulamentação dos pós de polimento e vidros com TR na política de minerais críticos; estudo prospectivo de mercado nacional e regional (2026–2040); instrumento piloto de preferência em compras públicas.	Mecanismo de preferência em compras públicas operacionais; exportações regulares de CeO ₂ de polimento (>US\$ 5 M/ano para a AL); atração de pelo menos um fabricante relevante do setor óptico para o Brasil.	Brasil posicionado como fornecedor regional referência em CeO ₂ de grau óptico e vidros lantânicos; exportações >US\$ 20 M/ano; hub regional de P&D e produção de materiais ópticos com TR estabelecido.
Regulação, sustentabilidade e economia circular	Estabelecer marcos regulatórios e normativos para materiais de grau óptico; incorporar princípios de economia circular com metas de eficiência material, reciclagem e certificação de impactos.	Elaboração de normas ABNT e protocolos nacionais de certificação para pós de CeO ₂ e La ₂ O ₃ de grau óptico; diagnóstico de resíduos; desenvolvimento de protocolo de logística reversa de pós de polimento.	Sistema de logística reversa operacional para pós exauridos; publicação de inventário nacional de ciclo de vida (LCA); regulação em convergência com ISO e ASTM; acordo setorial de descarte responsável.	Regulação nacional convergente com ISO/ASTM/UE e com reconhecimento mútuo internacional; sistema nacional de recuperação de CeO ₂ exaurido operacional em escala (>60% de taxa de recuperação); circularidade certificada.

9.8 Considerações

A cadeia produtiva de materiais para aplicações ópticas avançadas à base de terras raras apresenta, em 2026, um paradoxo estrutural que este capítulo procurou descrever com precisão: o Brasil detém reservas minerais expressivas dos elementos que sustentam essa cadeia — cério, lantânio, neodímio — e possui competência científica reconhecida na síntese e caracterização de pós de CeO₂ e vidros com óxidos de TR, porém é inteiramente dependente de importações para abastecer sua própria indústria óptica, vidreira e de semicondutores. Essa distância entre potencial mineral e capacidade produtiva instalada define o ponto de partida e justifica a urgência do horizonte estratégico proposto.

O diagnóstico do mapa de competências (Quadro 9.3) e do levantamento patentário revelam dois gargalos críticos que condicionam toda a trajetória: a ausência de plantas industriais de purificação de CeO₂ e La₂O₃ de grau óptico no País, e a baixa conversão das competências científicas em ativos industriais — patentes, processos produtivos, produtos certificados. Enquanto esses dois gargalos não forem superados, o desenvolvimento tecnológico universitário permanecerá desconectado da cadeia de valor.

O Mapa do Caminho Estratégico proposto para 2026–2040, estruturado em três horizontes, responde a essa condição com uma lógica de sequenciamento deliberado. O Horizonte 1 (2026–2030) tem caráter fundacional: não pretende produzir escala, mas criar as condições para que ela seja viável — infraestrutura de síntese e caracterização, normas técnicas, estudos de viabilidade, redes cooperativas de PD&I e um

programa de formação de recursos humanos. Sem essas fundações, o investimento produtivo do Horizonte 2 não terá sustentação técnica nem regulatória.

O Horizonte 2 (2031–2035) representa a conversão mais exigente: da competência científica para a capacidade industrial. A implantação da primeira planta de CeO_2 de grau óptico, a validação comercial dos primeiros *slurries* nacionais e o desenvolvimento de vidros ópticos com La_2O_3 de alta pureza são os marcos que definirão se a trajetória proposta é factível. Essa fase exige convergência simultânea entre capacidade produtiva, demanda qualificada e instrumentos de política industrial — e é precisamente por essa razão que os instrumentos de compras públicas e de preferência regulatória previstos no H1 são condições necessárias, e não complementares.

O Horizonte 3 (2036–2040) projeta o resultado sistêmico: uma cadeia integrada, com produção regular de pós de polimento e vidros ópticos de padrão internacional, inserção exportadora em nichos regionais e um sistema de logística reversa que retorna ao ciclo produtivo os óxidos de CeO_2 exauridos — princípio de circularidade que é simultaneamente uma exigência ambiental e uma estratégia de segurança de abastecimento.

A realização dessa trajetória depende de uma condição externa ao capítulo, mas central ao livro: a implantação das fundações institucionais da cadeia integrada de terras raras definidas no Horizonte 1 do Capítulo 3 (Mapa do Caminho Estratégico). Sem a aprovação do marco regulatório mineral, sem o CNMCE operacional e sem as primeiras refinarias de separação de óxidos, os prazos aqui propostos para o H2 não se sustentam. O alinhamento entre o Mapa do Caminho da cadeia integrada e o Mapa do Caminho desta cadeia específica não é apenas metodológico: é uma dependência real, que precisa ser gerida como tal pelas instâncias de governança previstas.

BLOCO III — ESTRATÉGIA

Elos estruturantes, eixos de ação e teoria da mudança

O Bloco III articula o desenho estratégico que atravessa todo o documento. Trata, em primeiro lugar, dos dois elos estruturantes da cadeia produtiva — mineração e refino —, sobre os quais repousa a viabilidade industrial de tudo o que vem a jusante. Em seguida, organiza os eixos estratégicos, os prazos e os instrumentos de política pública que sustentam a execução. Incorpora a leitura analítica dos acontecimentos recentes que estreitam a janela de execução. Fecha-se com uma síntese conceitual que articula o conjunto à luz da definição operacional de estratégia como transformação de aspirações em capacidades, propondo a explicitação da teoria da mudança como condição de coerência do trajeto.

Capítulo 10

Mineração: reservas e produção de terras raras

NOTA EDITORIAL — Sobre as reservas brasileiras de terras raras: este capítulo apresenta a estimativa revisada de cerca de 15% das reservas mundiais (com base em ANM, 2025, e Lins, Vera e Dourado, 2026). Os Capítulos 1 e 2 deste documento usam estimativas anteriores, em torno de 21–25% (USGS, 2026). A divergência reflete diferenças de critério e atualização entre as fontes; ambas são preservadas como vieram dos autores.

Em um cenário de expansão da demanda mundial por elementos de terras raras (ETR), o Brasil se destaca por possuir reservas relevantes. Esse potencial geológico reforça a necessidade de investimentos em pesquisa mineral, desenvolvimento tecnológico e uma política mineral e industrial para viabilizar o aproveitamento econômico e consolidar o Brasil como um ator estratégico relevante no segmento de terras raras. Este capítulo aborda os seguintes tópicos:

- Tipos de depósitos e os principais minerais de terras raras.
- Recursos e Reservas e pesquisa mineral de terras raras no mundo e no Brasil.
- Produção de terras raras no mundo e no Brasil.
- Cadeia de produção das terras raras — *upstream, midstream e downstream*.
- Os quatro principais polos de produção mineral: China (2), EUA e Austrália.

10.1 Tipos de depósitos e os principais minerais de terras raras

As fontes econômicas de elementos de terras raras estão distribuídas globalmente em diversos tipos de depósitos, resultado de diferentes ambientes e processos geológicos responsáveis por sua formação, podendo compor diversas espécies minerais. Mais de 1.000 ocorrências/depósitos de ETR já foram identificados globalmente; no entanto, apenas um número limitado está atualmente em desenvolvimento (Lapido-Loureiro, 1994, 2013).

Cada tipo de depósito apresenta proporções variadas de ETR leves e pesados, além de distinta variedade e complexidade mineralógica, bem como diferentes teores de outros elementos que podem ser benéficos ou prejudiciais para a exploração e o beneficiamento. Há vários tipos de depósitos de ETR, mas o suprimento global provém da extração mineral de principalmente três tipos: carbonatitos, placers fluviais/marinhos e as argilas de adsorção iônica. Essa tipologia constitui a base da produção mundial de ETR, dada sua abundância relativa e a maturidade das técnicas de pesquisa mineral, lavra e beneficiamento.

10.1.1 Tipos de Depósitos de ETR

Carbonatitos: são os depósitos mais importantes em volume, dominados por minerais como bastnasita e monazita. São formados a partir da intrusão de magmas ricos em carbonato e voláteis, em contextos de magmatismo alcalino. Esses depósitos, formados por rochas ígneas contendo mais de 50% em volume de minerais carbonáticos, se desenvolvem em estruturas anelares ou domos intrusivos. A maioria da produção global de ETR provém dos depósitos de carbonatitos, assim como são também a principal fonte dos elementos leves (ETRL). Os exemplos mais conhecidos de jazidas de ETR em carbonatitos incluem as minas Mountain Pass (EUA), em operação desde 1952; Bayan Obo (China), início em 1957, responsável por mais da metade da atual produção chinesa de ETR, a maior mina de ETR do mundo; e Mount Weld (Austrália), desde 2011.

Placers fluviais e marinhos: são depósitos secundários, formados por erosão e transporte de rochas alcalinas ou graníticas ricas em monazita e xenotima, que se concentram em canais fluviais, dunas e em areias de praias. Em geral, estão acompanhados de outros minerais, como a ilmenita, o mineral mais abundante, zirconita e rutilo. Como já estão liberados, nos rios e nas praias, a concentração ou separação seletiva desses minerais por métodos físicos – gravítico, magnético e eletrostático – é bastante facilitada.

Depósitos de argilas de adsorção iônica: esses depósitos formam-se em regiões onde rochas ricas em ETRs são expostas e submetidas ao intemperismo sob condições subtropicais a tropicais. Durante esse processo, os ETRs mobilizados passam a ser adsorvidos, especialmente os elementos pesados, por minerais argilosos ou incorporados a minerais secundários (Tian-Yu Zhao et al., 2025). Os depósitos de adsorção iônica destacam-se como uma fonte importante de elementos terras raras pesadas (ETRP) e ítrio. Os mais conhecidos localizam-se em províncias do centro-sul da China, com o início operacional ocorrendo nos anos 1970. Depois foram descobertos depósitos desse tipo em Myanmar e mais recentemente no Brasil e na África.

10.1.2 Minerais de Interesse Econômico

Existem 250 minerais portadores de terras raras conhecidos. Mas os que se destacam como minerais de interesse econômico e exploração comercial são a bastnasita, a monazita e a xenotima. Os dois primeiros são os principais portadores dos elementos de terras raras leves (ETRL) e a xenotima é a principal fonte de ítrio e de outros elementos de terras raras pesados (ETRP). Os depósitos de argila de adsorção iônica (apresentados acima) fornecem a maioria dos ETRP. A seguir, são apresentadas informações sobre os três principais minerais portadores de terras raras (Lapido-Loureiro, 2013; Tian-Yu Zhao et al., 2025; Valdiviezo e Lins, 1997):

Bastnasita: $(\text{Ce, La}) (\text{F, OH}) \text{CO}_3$: é um fluorocarbonato de terras raras, no qual predominam os elementos da fração leve das terras raras. Este mineral apresenta teor de OTR (óxidos totais de terras raras equivalente), entre 65 e 75% e 5 por densidade. Apresenta composição parecida com a da monazita, com as seguintes variações de teores de ETR: 40-54% de cério, 25-40% de lantânio, 8-16% de neodímio e 3-5% de praseodímio. Uma característica que diferencia a bastnasita da monazita, é o baixo conteúdo de tório, normalmente inferior a 0,1%. Como mineral, a bastnasita é a mais importante fonte de terras raras, uma vez que 70% em peso dos ETR produzidos são provenientes da bastnasita.

Monazita: (Ce,La,Nd,Sm,Y) PO₄: é um ortofosfato de terras raras, no qual predominam também os elementos leves. Este mineral apresenta teor de OTR entre 55 e 65% e densidade entre 4,6 e 5,4. Apresenta os seguintes teores variáveis: 40-50% de cério, 20-36% de lantânio, 8-16% de neodímio, 3-5% de praseodímio, 0,5-3% de samário e 0,1-3% de ítrio. Os elementos La, Ce, Nd e Pr constituem aproximadamente 90% dos ETR presentes na monazita. Elementos radioativos, como o tório e o urânio, também são encontrados no mineral, tornando-o radioativo. O conteúdo de tório é muito variável, podendo oscilar entre 0,1 e 30%. A quantidade de urânio é menor, atingindo até 1,5%.

Xenotima: YPO₄: é um fosfato de ítrio, com 40-69% de ítrio, onde o ítrio pode ser substituído por outros elementos de terras raras pesados. Este mineral apresenta teor de OTR de 67% e densidade entre 4 e 5. Apresenta as seguintes variações de teores: 4-19% de itérbio, 4-14% de érbio, 5-14% de disprósio e 1-8% de gadolínio. É a mais importante fonte de ítrio, apresentando em média um teor de 60%. A xenotima geralmente ocorre associada à monazita, porém a xenotima é menos abundante. Entre suas propriedades físicas, como a densidade, entre 4 e 5, pode-se mencionar que a xenotima é mais fortemente magnética que a monazita, fato que permite sua separação ou concentração física por métodos magnéticos. (É comum a xenotima ser extraída como subproduto de depósitos aluvionares de cassiterita.)

10.2 Reservas de terras raras no mundo e no Brasil

O entendimento sobre as reservas de terras raras, tanto em contexto global quanto no Brasil, é fundamental para avaliar o potencial de aproveitamento destes recursos. O Brasil dispõe de depósitos significativos em termos de quantidade e teor, destacando-se como um dos países com potencial para suprir parte da crescente demanda mundial por elementos de terras raras (Lins, Vera e Dourado, 2026).

Embora às vezes confundidos, recursos minerais e reservas minerais possuem significados diferentes. Recursos minerais referem-se a concentrações naturais de minerais ou substâncias presentes no subsolo, que apresentam potencial econômico de aproveitamento. Reservas minerais, por sua vez, são partes desses recursos cuja extração apresenta viabilidade, de acordo com critérios técnicos e econômicos (CBRR, 2022).

A classificação de recursos e reservas nos diversos países segue padrões internacionais do *Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards* (CRIRSCO), a exemplo do código australiano JORC e do canadense NI 43-101. No Brasil, temos o Guia da CBRR, edição 2022, preparado pela Comissão Brasileira de Recurso e Reservas (CBRR, 2022). Os recursos minerais são subdivididos em três categorias, conforme o grau de confiabilidade geológica: inferido (baixa confiança), indicado (média confiança) e medido (alta confiança geológica). Reservas minerais, por sua vez, são classificadas em provável e provada, considerando os estudos de viabilidade realizados.

A viabilidade econômica das reservas minerais é determinada por fatores modificadores, tais como: a cotação do mineral/metalo no mercado, os custos de extração, o desenvolvimento tecnológico, as normas ambientais, entre outros. Reserva provada corresponde àquela cuja viabilidade econômica apresenta elevado grau de confiança, respaldada por estudos detalhados técnicos e econômicos e condições favoráveis de mercado e operação. A classificação das reservas é dinâmica e pode ser revisada em função

de novas informações, avanços tecnológicos ou alterações nas condições de mercado, sendo possível que uma reserva seja reclassificada como recurso, ou vice-versa (CBRR, 2022)

O panorama agregado das reservas mundiais e a posição brasileira foram introduzidos no Capítulo 1 (Seção 1.6.1 e Tabela 1.1). Esta seção aprofunda a discussão sob duas dimensões próprias: a série histórica de revisões USGS e a divergência metodológica entre USGS e ANM. As reservas dos mais diversos bens minerais costumam passar por revisões periódicas a partir de informações fornecidas por governos e empresas (Lins, Vera e Dourado, 2026). A principal referência internacional para consultas sobre reservas é a publicação anual do U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries* (USGS, 2026). Segundo a mais recente edição, de 2026 (ano-base 2025), o total das reservas de terras raras, medidas em óxidos totais de terras raras equivalente (OTR), decresceu nos últimos anos: 110 milhões de toneladas (Mt) em 2023, 90 Mt em 2024 e 85 Mt em 2025.

A distribuição por país consolida o quadro já apresentado no Capítulo 1 (Tabela 1.1): China em 1º lugar com 52% das reservas globais, Brasil em 2º com 25% e Austrália em 3º com 7,4%, seguidos por Rússia, Vietnã, EUA e Groelândia/Dinamarca, somando 97% do total mundial, conforme detalhado na Tabela 10.1.

Entretanto, a Agência Nacional de Mineração (ANM) revisou para baixo as reservas brasileiras de terras raras de 21 Mt para 11,4 Mt de OTR, conforme destacado no *Sumário Mineral Brasileiro* (ANM, 2025). A revisão deu-se a partir do Relatório Anual de Lavra (RAL) de 2023 (ano-base 2022), seguindo a norma estabelecida pela CBRR. Ao aderir a essa metodologia, seguindo as boas práticas internacionais, a ANM passa a apresentar maior precisão nos dados reportados. O próprio USGS adotou o padrão internacional do CRIRSCO em 2010, ao qual a CBRR está alinhada.

Tabela 10.1: Reservas Mundiais de Terras Raras 2025 (segundo USGS e ANM).

Reservas Mundiais - USGS (OTR)	Reservas Mundiais - ANM (OTR)
(1º) China = 44 Mt [52%]	(1º) China = 44 Mt [58%]
(2º) Brasil = 21 Mt [25%]	(2º) Brasil = 11,4 Mt [15%]
(3º) Austrália = 6,9 Mt [7,4%]	(3º) Austrália = 6,9 Mt [9,2%]
(4º) Rússia = 3,8 Mt [4,5%]	(4º) Rússia = 3,8 Mt [5,0%]
(5º) Vietnã = 3,5 Mt [4,1%]	(5º) Vietnã = 3,5 Mt [4,6%]
(6º) EUA = 1,9 Mt [2,2%]	(6º) EUA = 1,9 Mt [2,5%]
(7º) Groelândia=1,5 Mt [1,8%]	(7º) Groelândia = 1,5 Mt [2,0%]

Reservas Mundiais - USGS (OTR)	Reservas Mundiais - ANM (OTR)
(8º) Tanzânia = 0,89 Mt [1,1%]	(8º) Tanzânia = 0,89 Mt [1,2%]
(9º) A.do Sul = 0,86 Mt [1,0%]	(9º) A.do Sul = 0,86 Mt [1,1%]
Outros = 0,65 Mt [0,76%]	Outros = 0,65 Mt [0,86%]
Total = 85 Mt de OTR	Total = 75,4 Mt de OTR

Fonte: Lins, Vera e Dourado (2026), a partir do USGS, *Mineral Commodity Summaries*.

Para o ano-base 2025, portanto, com a reserva brasileira de 11,4 Mt e a reserva global corrigida para 75 Mt, o Brasil continua a se destacar em 2º lugar no cenário internacional, com participação de 15%. Essa revisão da ANM já deveria ter sido incorporada no *Mineral Commodity Summaries* nas edições mais recentes. A Tabela 10.1 apresenta os dados do USGS e aqueles com base na revisão da ANM (Lins, Vera e Dourado, 2026).

Por outro lado, o Brasil ainda não considera oficialmente os depósitos de terras em argilas de adsorção iônica (Lins, Vera e Dourado, 2026). Nos últimos 3-4 anos, algumas dezenas de *junior mining companies* – muitas delas listadas em bolsas da Austrália e do Canadá – intensificaram a prospecção e pesquisa mineral de ETR. De acordo com levantamento recente do Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2026), considerando apenas quatro dos projetos listados, cerca de 2 Mt de OTR em depósitos de argila iônica estão classificados como reservas pelas empresas e provavelmente serão reconhecidas pela ANM com a análise dos relatórios de pesquisa. Isso mostra o potencial de aumento das reservas nacionais de ETR à medida que avançam as pesquisas em outras áreas.

Nesse sentido, os investimentos em pesquisa mineral de ETR no Brasil cresceram, segundo a ANM, de apenas R\$ 2 milhões em 2021 para R\$ 19 milhões em 2022, R\$ 31 milhões em 2023 e R\$ 90 milhões em 2024. Em nível mundial, com base em relatórios da consultoria *S&P Global*, os investimentos em pesquisa de ETR atingiram US\$ 67 milhões em 2021, US\$ 148 milhões em 2024 e US\$ 155 milhões em 2025. A Austrália esteve bem à frente nesses anos, enquanto o Brasil registrou US\$ 13 milhões (9%) em 2024, o segundo lugar no *ranking*.

10.3 Produção de terras raras no mundo e no Brasil

O Brasil foi um grande produtor de ETR, a partir da monazita de areias de praias, disputando a liderança com a Índia, até metade do século XX. Os EUA assumem a liderança da produção mundial nos anos 1960, a partir da bastnasita de Mount Pass. Até a década de 1950, a produção e o consumo globais anuais eram

inferiores a 5 mil toneladas de OTR. A partir da década de 1960, com o desenvolvimento de setores como ecrãs de televisão, indústria petrolífera e sistemas informáticos, as terras raras começaram a ser amplamente utilizadas, embora ainda de forma limitada. Nos anos 1980 emerge a China com a produção da mina de Bayan Obo (Lapido-Loureiro, 2013).

A partir dos anos 1990 a participação chinesa na produção mundial cresce de modo acelerado: 35% em 1990; 60% em 1995; 75% em 2000; alcança a participação máxima de 97% em 2010 (praticamente abastecendo o mundo sozinha); e apresentando depois trajetória decrescente até os 69% de 2025. Essa ascensão da China não se deu espontaneamente. Contou com custos ambientais menos restritivos e vantagens competitivas associadas à estrutura regulatória vigente à época, porém deixou grandes passivos ambientais até hoje nos principais polos de produção. Mas não foi apenas isso. Mas houve também um investimento de grande monta e continuado em ciência e tecnologia nas várias etapas da cadeia de produção de terras raras, e orientação de política industrial de ETR pelo governo chinês e empresas estatais dominando a produção.

Entretanto, a produção mineral de ETR esteve sempre crescendo. No século XXI, com o crescimento do uso das energias renováveis para a transição energética e das indústrias de alta tecnologia (de uso civil e militar), as aplicações e a procura de mercado por terras raras têm-se expandido (Lapido-Loureiro, 2013; Tian-Yu Zhao et al., 2025).

10.3.1 Produção Mundial

A Tabela 10.2 apresenta a produção mundial de terras raras no ano de 2025. A produção aumentou quase cinco vezes ao longo deste século. Em 2000, a produção foi de 83 mil toneladas (83 kt) de OTR, alcançando 376 kt em 2023, 380 kt em 2024 e 390 kt em 2025.

A China domina o suprimento de terras raras, com 270 kt de OTR e participação de 69% em 2025. Os Estados Unidos, após alguns anos sem produção interna, ocupam a 2ª posição, com 51 kt (13%), seguindo-se a Austrália com 29 kt (7,4%) e Myanmar com 22 kt (5,6%) – esses quatro países respondem por 95% da produção mundial. O Brasil aparece em 9º lugar, com participação modesta de 0,5%.

Como se verifica, a produção mundial de terras raras encontra-se concentrada em poucos países, sendo dependente da disponibilidade de reservas economicamente viáveis e do domínio das tecnologias de extração mineral, beneficiamento e processamento.

Esse domínio chinês sobre a cadeia de suprimentos de terras raras é o principal fator que aumenta a criticidade desse mineral estratégico. A China detém 85-90% da capacidade mundial de refino. Além de refinar a própria produção mineral, a China importa concentrados minerais e carbonatos mistos de outros países que ainda não apresentam capacidade instalada de refino, como o Brasil e os EUA (com capacidade de refino ainda incipiente, menor que 3 kt).

Assim, mesmo com a diversificação da produção primária, a partir de 2012, para a Austrália, Myanmar (com um crescimento extraordinário em anos recentes) e Madagascar, grande parte do concentrado de ETR produzido nesses países ainda é enviada para a China para ser processada e refinada. Essa posição dominante permite à China influenciar os preços globais das terras raras, por meio de alterações nas quotas de exportação.

Tabela 10.2: Produção Mundial de Terras Raras.

Produção em 2025 (OTR)
(1º) China = 270 kt [69%]
(2º) EUA = 51 kt [13%]
(3º) Austrália = 29 kt [7,4%]
(4º) Myanmar = 22 kt [5,6%]
(5º) Tailândia = 4,8 kt [1,2%]
(6º) Índia = 2,9 kt [0,74%]
(7º) Madagascar=2,7 kt [0,69%]
(8º) Rússia = 2,6 kt [0,67%]
(9º) Brasil) = 2,0 kt [0,51%]
Outros = 3,0 kt [0,77%]
Total = 390 kt de OTR

Fonte: Elaboração do autor. Dados: USGS, Mineral Commodity Summaries.

10.3.2 Produção no Brasil

A produção atual brasileira alcançou menos de 1% da produção mundial, como visto na Tabela 10.2. Um fato importante ocorreu em janeiro de 2024, com o início da operação da Mineração Serra Verde, localizada em Minaçu-GO, a primeira produção a partir de minério de argila iônica realizada fora da Ásia. A tecnologia empregada é a lixiviação salina em tanque agitado, seguida das etapas de remoção de impurezas e de precipitação conjunta dos ETR. Isto resulta em um composto (concentrado) químico denominado Mixed Rare Earth Carbonate (MREC), carbonato misto, que é exportado pela empresa. Com capacidade nominal de 5 mil toneladas de OTR, a produção efetiva atingiu 560 toneladas em 2024 e 2 mil toneladas em 2025.

Entre 2026 e 2030, os investimentos em produção de terras raras no país devem atingir US\$ 2,4 bilhões, segundo levantamento do IBRAM. Até 2030, com base nos projetos mais avançados, o Brasil poderá

produzir 40-50 kt de OTR, na forma de MREC ou concentrados minerais, passando de menos de 1% para cerca de 10% da produção mundial atual. Por enquanto, apenas duas empresas no Brasil consideram acrescentar a etapa de separação/refino em seus projetos.

10.4 Cadeia de produção de terras raras: upstream, midstream e downstream

A cadeia de produção de terras raras pode ser compreendida, de modo geral, em três principais etapas ou segmentos: *upstream*, *midstream* e *downstream*. Essa divisão não é absolutamente rígida, embora útil do ponto de vista analítico, uma vez que a configuração de cada etapa depende do tipo de depósito, da mineralogia predominante, da rota tecnológica empregada e do grau de integração vertical da produção. Ainda assim, tal organização permite entender com maior clareza como os elementos terras raras (ETR) são lavrados, concentrados, separados e transformados em produtos de maior valor agregado para aplicações em inúmeras. A Figura 2.1 ilustra as três etapas.

Do ponto de vista econômico, foi realizada uma avaliação do valor de mercado da cadeia de ETR (Lins, Vera e Dourado, 2026) para os anos 2024-2025. Mesmo sujeita a imprecisões, as estimativas para os três segmentos fornecem uma ordem de grandeza:

- *upstream* = US\$ 3 bilhões – concentrados minerais de rochas duras (70%) e carbonatos mistos de argilas iônicas (30%).
- *midstream* = US\$ 5 bilhões – óxidos individuais (65%) e metais e ligas (35%).
- *downstream* = US\$ 40 bilhões – a metade corresponde aos ímãs de terras raras.

Do ponto de vista de estratégia, um estudo realizado por acadêmicos chineses sobre a rede de comércio da cadeia industrial global de terras raras separou a indústria de terras raras nesses três segmentos para analisar a evolução do setor entre 2001 e 2023 (Liu et al., 2025). Na análise dos autores o comércio global de terras raras é marcado por assimetrias importantes entre os países, o que torna essencial que cada nação saiba exatamente onde está posicionada na cadeia produtiva, aproveitando as vantagens comparativas e mitigando as desvantagens. Essa cadeia se divide então em três etapas: extração (*upstream*), processamento (*midstream*) e fabricação de produtos (*downstream*). Entender em qual dessas etapas um país opera é o ponto de partida para decisões estratégicas mais inteligentes. Países que atuam principalmente na extração costumam exportar matérias-primas com baixo valor agregado, ficando de fora dos maiores ganhos econômicos da cadeia. Por isso, investir em tecnologia e capacitação para avançar nas etapas seguintes é uma escolha estratégica que pode transformar significativamente a posição de uma nação no comércio internacional de terras raras, recomenda o estudo.

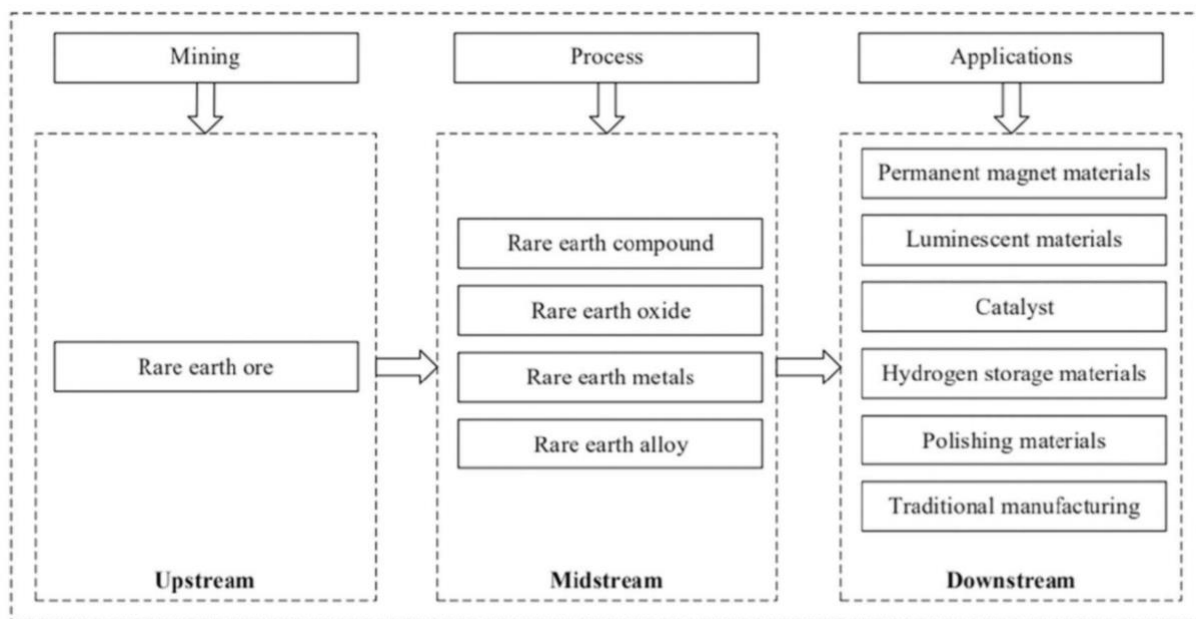


Figura 10.1. Cadeia de produção de Terras Raras em três etapas: upstream, midstream e downstream. Fonte: Zhang, H. et al. *Ecological Economics*, 198 (2022) 107472.

Porém, esse avanço depende também do cenário geopolítico. Cooperação e conflito/confronto geopolíticos entre países moldam diretamente as redes de comércio, e ignorar essa realidade pode ser um erro custoso. Por isso, os autores recomendam que abordagens puramente transacionais e de curto prazo precisam dar lugar a estratégias mais amplas e duradouras, que equilibrem segurança nacional e liberação comercial. Na prática, isso significa apostar na cooperação multilateral — desenvolvendo recursos minerais conjuntamente, padronizando produtos e incentivando a inovação tecnológica compartilhada. Unindo reposicionamento na cadeia produtiva com colaboração internacional, os países, na visão dos autores, criam as condições para um comércio de terras raras mais justo e sustentável para todos.

Etapa Upstream

No *upstream* situam-se as atividades de lavra, preparação do minério e concentração mineral. A produção mineral de terras raras possui características próprias e elevada complexidade técnica. Após a lavra, geralmente a céu aberto, é necessário dominar uma sequência de etapas de beneficiamento de minérios, incluindo a concentração dos minerais portadores de ETR — como bastnasita, monazita e xenotima — e prepará-los para a extração química posterior. Por isso, a definição e o aperfeiçoamento das rotas tecnológicas são decisivos não apenas para a viabilidade econômica dos empreendimentos, mas também para seu desempenho ambiental.

Nos minérios convencionais, o minério lavrado é inicialmente submetido a operações de cominuição (britagem e moagem), com a finalidade de promover a liberação dos minerais portadores de terras raras em relação aos minerais de ganga. Essa etapa é crítica: uma liberação insuficiente reduz a eficiência da concentração dos minerais de interesse, enquanto a moagem excessiva eleva custos, gera finos e pode prejudicar operações posteriores. A seguir, o material passa por processos de concentração mineral, cujo

objetivo é elevar o teor dos minerais de interesse e produzir um concentrado adequado às etapas químicas subsequentes.

Isso exige operações baseadas em diferenças de propriedades físicas – e, em muitos casos, propriedades físico-químicas, como no processo de flotação – entre os minerais úteis e os minerais da ganga. Nessa fase, o conhecimento detalhado da mineralogia, da textura do minério e do grau de liberação dos minerais portadores de ETR é essencial.

Entre as técnicas de concentração mais empregadas destacam-se a concentração gravítica, a separação magnética e, em alguns casos, a separação eletrostática, todas baseadas em diferenças de propriedades físicas entre os minerais de interesse e os minerais de ganga. Têm ampla aplicação, por exemplo, em depósitos secundários do tipo aluvião (*placers*), de origem marinha ou fluvial, onde minerais pesados como monazita e xenotima podem ser concentrados com relativa eficiência. Em minérios primários com mineralogia mais complexas, porém, tais métodos, especialmente a concentração gravítica, costumam funcionar sobretudo como pré-concentração, reduzindo a massa a ser enviada para etapas mais seletivas.

Com o mesmo objetivo de pré-concentração, nos últimos anos, o *upstream* incorporou técnicas de *ore sorting*, ou *smart sorting*, que usam sensores para separar partículas mineralizadas da rocha encaixante antes de etapas mais intensivas de processamento. Essa técnica permite distinguir partículas mineralizadas de partículas estéreis ainda em granulometrias mais grossas, antes das etapas mais intensivas de moagem. Métodos como transmissão por raios X, detecção por cor, luminescência e infravermelho próximo aumentam a seletividade, reduzem energia e rejeitos, sendo tendência para maior eficiência no beneficiamento de terras raras.

A flotação é a tecnologia geralmente empregada para a concentração dos minerais de ETR de minérios convencionais. Nessa operação unitária, o minério moído é transformado em polpa e condicionado com reagentes específicos (coletores e depressores), de modo que os minerais de interesse (tornados hidrofóbicos) possam aderir seletivamente às bolhas de ar introduzidas no sistema. Esses minerais ascendem à superfície e são recuperados, enquanto os minerais da ganga (hidrofílicos) permanecem na polpa.

Rotas industriais de beneficiamento foram desenvolvidas e comercializadas com relativo sucesso para minerais como bastnasita, monazita e xenotima. A flotação apresenta aplicações industriais consolidadas em depósitos clássicos, como Bayan Obo, na China; Mountain Pass, nos Estados Unidos; e Mount Weld, na Austrália – sobretudo para os três minerais citados acima.

Ainda assim, muitos depósitos apresentam uma mineralogia mais complexa, baixos teores, liberação muito fina, cuja resposta aos métodos usuais ainda não está plenamente consolidada em escala comercial. Exemplificando, depósitos ricos em ETR contendo minerais menos usuais, como eudialita e allanita, para os quais ainda persistem desafios metalúrgicos importantes quanto ao desenvolvimento de rotas economicamente robustas. Isso explica por que a concentração de minérios de terras raras continua demandando forte esforço de pesquisa, desenvolvimento e inovação.

Uma situação particular ocorre nos depósitos de argilas iônicas, cuja importância estratégica se ampliou nas últimas décadas, especialmente no centro-sul da China e em Myanmar, e ganhou importância no Brasil nos últimos três anos, conforme mencionado anteriormente. Nesses sistemas, os ETR não se encontram predominantemente incorporados a minerais discretos passíveis de concentração física convencional, mas adsorvidos na superfície de argilominerais ao longo de perfis lateríticos intensamente intemperizados. Por essa razão, a recuperação dos elementos de interesse ocorre, em geral, por lixiviação e troca iônica, na própria mina. Em termos de cadeia produtiva, essa especificidade justifica a inclusão da extração de ETR a partir de argilas iônicas na etapa *upstream*, diferentemente do que se observa em minérios de rochas

duras convencionais, nos quais os concentrados minerais, já comercializáveis, passam para a etapa *midstream*.

Os ETR nestes depósitos são extraídos por lixiviação via troca iônica, substituindo-os por cátions como sódio ou cálcio. No início das operações na China, nos anos 1970, era comum a utilização de NaCl como lixiviante. Usam-se, desde os anos 1990, soluções de sais de amônio para separar íons terras raras das argilas. A lixiviação pode ser realizada por diferentes métodos, como a *in situ*, que reduz movimentação de material e impacto na superfície. Também se utiliza a lixiviação em tanque agitado. Após a lixiviação, a solução aquosa, o licor, segue para remoção de impurezas e precipitação conjunta dos ETR, formando o carbonato misto (*MREC*). Essas técnicas hidrometalúrgicas serão apresentadas em detalhe no capítulo 6.

Essa rota, embora eficiente, enfrenta desafios técnicos e ambientais importantes. O uso de sulfato de amônio é alto, e o nitrogênio amoniacal residual nos rejeitos e águas subterrâneas é um ponto crítico. A viabilidade depende não só da eficiência metalúrgica, mas também do controle hidrológico, recuperação de reagentes e mitigação dos impactos ambientais. Essas questões ambientais serão devidamente analisadas no capítulo 7.

Etapa Midstream

O segmento *midstream* corresponde, em linhas gerais, à etapa de transformação química dos concentrados minerais — ou das soluções enriquecidas provenientes das argilas iônicas, como os carbonatos mistos — em compostos intermediários de terras raras, por meio de processos hidrometalúrgicos (ver capítulo 6).

Nos minérios convencionais, essa fase envolve usualmente operações de decomposição química seguidas de lixiviação, com o objetivo de romper a estrutura cristalina dos minerais portadores e solubilizar os ETR. Como resultado, obtêm-se compostos químicos mistos de terras raras, que constituem intermediários para as etapas subsequentes de purificação e separação individual.

Essa etapa é particularmente sensível do ponto de vista ambiental e regulatório, sobretudo quando o minério contém minerais como a monazita, que frequentemente concentram tório e urânio. Nesses casos, a produção de compostos intermediários exige cuidados adicionais relacionados ao controle radiológico, ao manejo de efluentes e resíduos e ao cumprimento das exigências normativas aplicáveis. O *midstream* é, portanto, uma fase crítica não apenas pelo seu papel metalúrgico, mas também pelos requisitos ambientais, sanitários e institucionais que a acompanham (a serem abordados no capítulo 7).

Na sequência, ainda entre o *midstream* e o *downstream*, ocorre a etapa de separação individual dos elementos terras raras, uma das mais desafiadoras de toda a cadeia produtiva. A dificuldade decorre da grande similaridade química entre os ETR. A técnica dominante nesse estágio é a extração por solventes. Ao final desse processo, obtêm-se óxidos individuais de terras raras com elevado grau de pureza. O capítulo 6 analisa em profundidade este tema. Os óxidos podem ser posteriormente convertidos em metais e ligas, sais especiais ou outros compostos.

Etapa Downstream

O *downstream*, por sua vez, compreende a transformação desses óxidos, metais e ligas em bens intermediários e finais de maior intensidade tecnológica e maior valor agregado. Entre os produtos mais relevantes fabricados nesta etapa destacam-se a fabricação de ímãs permanentes de alto desempenho, catalisadores (automotivos e de refino de petróleo), fósforos, materiais de polimento, baterias, vidros e cerâmicas especiais, entre outros, produtos que são empregados em diversas indústrias. É justamente nessa etapa que se concentra parte expressiva do valor econômico da cadeia, o que explica o interesse

crescente de diversos países em não apenas produzir concentrados ou compostos mistos, mas também internalizar etapas mais avançadas de separação, refino e manufatura.

A cadeia de produção mineral de terras raras distingue-se pela sofisticação técnica nas três etapas, altamente especializadas, apresentadas acima. A compreensão adequada dessa cadeia requer atenção às diferenças entre os tipos de depósito e às particularidades de cada rota tecnológica. Tal distinção é fundamental para a análise técnica, econômica e ambiental do setor, bem como para a formulação de estratégias nacionais voltadas ao aproveitamento sustentável e competitivo das terras raras por aqui.

10.5 Os principais polos de produção de terras raras

A seguir, apresenta-se um resumo dos quatro principais polos de produção de terras raras — dois na China, um nos EUA e outro na Austrália — responsáveis por cerca de 90% das 390 mil toneladas de OTR produzidas em 2025. Esses depósitos possuem origens, mineralizações e processos metalúrgicos distintos, destacando a ausência de um modelo único de jazida (Matiolo, 2023; Tian-Yu Zhao et al., 2025; Valdiviezo e Lins, 1997). Juntos, definem a geopolítica global dos minerais críticos nesta quadra do século XXI.

10.5.1 Bayan Obo — China (Mongólia Interior)

A China responde por 69% da produção mundial de ETR, liderando em volume graças ao depósito de Bayan Obo, mas enfrenta sérios passivos ambientais devido à negligência histórica. A maior mineralização de terras raras conhecida corresponde a um depósito resultante de processo metamórfico, caracterizado por uma complexa diversidade mineral. O minério contém mais de 100 minerais distintos, com bastnasita e monazita como principais portadores de elementos de terras raras, coexistindo em proporções aproximadas de 2:1, acompanhadas por magnetita, hematita, fluorita e dolomita, entre muitas outras espécies minerais.

A mina de Bayan Obo, localizada a 150 km ao norte de Baotou, na Mongólia Interior, configura-se como a maior do mundo de ETR. Descoberto em 1927 durante prospecção de ferro, o depósito apresenta reservas estimadas em 35 milhões de toneladas de ETR, representando mais de 30% das reservas globais. Geologicamente, trata-se de um depósito polimetálico carbonatítico-hidrotermal, abrangendo três cavas a céu aberto que cobrem uma área de 48 km².

Os ETR predominantes são os leves (La, Ce, Nd, Pr). A concentração do minério em Baiyun Ebo é mais complexa do que no minério de Mountain Pass (apresentado adiante) devido à variedade mineralógica, à granulometria fina dos minerais portadores de terras raras e à associação com outros minerais. O grau de liberação da bastnasita e da monazita ocorre em granulometria muito fina. O processo de beneficiamento do minério envolve separação magnética para obtenção de concentrado de ferro, seguida de flotação com coletores hidroxâmicos para os minerais portadores de ETR, com temperatura acima de 75 °C.

O concentrado misto de bastnasita e monazita (com teor de concentrado de 50-65% de OTR e recuperação entre 60 e 65%) é encaminhado para plantas em Baotou, onde passa por ustulação com H₂SO₄ concentrado (>300°C), lixiviação aquosa, remoção de impurezas e separação por extração com solventes. O processo gera resíduos contendo tório e efluentes fluoretados, constituindo o maior passivo ambiental do setor

global de ETR. A produção excede 100 kt por ano de OTR, sob operação da estatal China Northern Rare Earth Group.

10.5.2 Argilas iônicas — Sul da China (Jiangxi, Guangdong, Fujian e outras)

Os depósitos de argilas iônicas no centro-sul da China dominam a produção de ETR pesados. Esses depósitos constituem o tipo genético singular da mineração mundial de ETR: os elementos não estão em minerais cristalinos, mas sim como cátions trivalentes (REE^{3+}) adsorvidos eletrostaticamente nas superfícies de argilas — caulinita e montmorilonita — formadas pelo intemperismo tropical intenso de granitos. Distribuídos por sete províncias (Jiangxi, Guangdong, Fujian, Hunan, Guangxi, Zhejiang e Yunnan), com o epicentro em Ganzhou (Jiangxi), foram descobertos em 1970 e revolucionaram o mercado global de ETR pesados.

Apesar do teor muito baixo (0,03–0,15% TREO), esses depósitos fornecem mais de 80% da produção mundial de ETR pesados (Dy, Tb, Y, Ho, Eu, Gd) — elementos críticos para ímãs permanentes e tecnologias de defesa — tornando-os estrategicamente insubstituíveis. O processo de extração por lixiviação *in situ* injeta solução de sulfato de amônio em poços perfurados nos morros graníticos; a solução percola pela argila por 150–400 dias, deslocando os ETR^{3+} por troca iônica. O licor coletado na base é precipitado, filtrado e calcinado, gerando óxidos mistos de ETRP. O impacto ambiental é severo: poluição por nitrogênio amoniacal, erosão e mais de 300 minas abandonadas em Ganzhou. Porém, praticamente sem radioatividade — grande vantagem sobre Bayan Obo.

10.5.3 Mountain Pass — EUA (Califórnia)

A mina Mountain Pass, única mina de ETR em operação nos EUA, está localizada no Deserto de Mojave, a 85 km a sudoeste de Las Vegas. Começou a operar em 1952, fechou em 2002, por questões ambientais e por conta da competição chinesa (preços baixos). Reabriu em 2010, com a Molycorp, que, no entanto, faliu em 2015. A operação foi retomada pela MP Materials em 2017, tornando os EUA o segundo produtor mundial, com 51 mil toneladas de OTR em 2025 (13% da produção global), mas que exporta quase todo o concentrado mineral para a China.

É uma lavra a céu aberto em uma cava encravada em um carbonatito primário com teor médio de 8–10% de OTR e vida útil superior a 30 anos. A partir de 1965, a bastnasita substituiu a monazita como a principal fonte de terras raras. Em 1978, a mina chegou a responder por mais da metade da produção mundial de ETR.

O minério apresenta 10% do mineral bastnasita, o principal mineral portador de ETR, com a presença de monazita. A ganga, formada pelos minerais calcita (20%), barita (10%) e dolomita (30%), além de minerais como o quartzo, tem propriedades superficiais similar à da bastnasita, dificultando a seletividade da flotação. O processo de flotação usa coletores de ácidos graxos ou hidroxamatos com condicionamento a vapor, uma vez que a temperatura tem efeito importante na seletividade do processo. O concentrado de flotação, principalmente com bastnasita, com teor maior de 60–65% de OTR, e recuperação na flotação de 65–70%, segue depois para a hidrometalurgia. O concentrado é submetido à ustulação oxidante e depois à lixiviação com HCl. O cério se precipita nessa etapa, enquanto os demais ETR trivalentes dissolvem e seguem para extração por solventes.

Após investimento de US\$ 1,7 bilhão no Project Phoenix, a MP Materials alcançou a produção de 51 mil toneladas de OTR em 2025. A empresa planeja expandir operações e criar uma cadeia de suprimento completa para ETR, incluindo fabricação de ímãs NdFeB, em Fort Worth (Texas), tendo assinado um contrato de fornecimento para atender a demandas da General Motors e da Apple. Essa iniciativa reduz a dependência norte-americana do mercado chinês, fortalece a segurança nacional e beneficia indústrias de alta tecnologia.

10.5.4 Mount Weld — Austrália (Austrália Ocidental)

A mina Mount Weld iniciou suas operações comerciais em 2011, sob gestão da empresa Lynas Rare Earths. Destaca-se pela alta concentração de ETR, teor de 7,3% de OTR, e baixa radioatividade, consolidando-se como referência de eficiência fora do mercado chinês. Assim, com essa mina, a Austrália projeta-se como o terceiro maior produtor de OTR, com 29 mil toneladas em 2025 e participação de 7,4%.

As reservas provadas somam 13 Mt e teor de 7,3% de OTR, com zonas ricas chegando a 45% de TREO. O mineral portador de ETR dominante é a monazita secundária (Ce, La, Nd, Pr) PO₄, de origem supergênica — formada pela decomposição da apatita primária do carbonatito original e remobilização dos ETR.

Sua característica mais valiosa é o teor extremamente baixo de tório (0,07%), reduzindo riscos radioativos no processamento. A concentração é feita por flotação, com o uso de coletores de ácidos graxos/hidroxâmicos para separar a monazita dos minerais de ganga (cerianita, crandalita). A planta de concentração de Mt Weld pode processar até 240 mil toneladas de minério por ano, e produzir 66 mil toneladas de concentrado contendo 26,5 mil toneladas de OTR. O concentrado obtido na flotação (com teor de ~40% de OTR) é transportado para a nova planta de Kalgoorlie.

A instalação de processamento de terras raras de Kalgoorlie é a primeira do seu tipo na Austrália, com investimento de A\$ 575 milhões. O concentrado de flotação de monazita é inicialmente transformado por craqueamento em sulfato de terras raras. A seguir, vem a lixiviação, purificação e precipitação, com a produção do carbonato misto de terras raras (MREC).

O MREC é exportado para a Planta Avançada de Materiais da Lynas (LAMP) em Kuantan, Malásia, onde passa pelo processo de extração por solventes, separando-se os ETR individualmente. Os produtos finais da LAMP incluem óxido de NdPr, carbonato de Ce, óxido de Ce, carbonato de LaCe, óxido de LaCe e óxido de SEG (Samário-Európio-Gadolínio).

Como considerações finais deste capítulo vale registrar que o Brasil apresenta algumas pré-condições favoráveis para o desenvolvimento da cadeia produtiva de ETR e de outros minerais críticos (Lins, Vera e Dourado, 2026), como infraestrutura adequada, incluindo um ecossistema de C&T razoável; uma matriz energética renovável (*powershoring*), 50% da energia total e 90% da energia elétrica; e diplomacia comercial ampla (*friendshoring*). Recentemente, projetos e PD&I de empresas têm recebido financiamento do BNDES e da Finep por meio da política Nova Indústria Brasil (NIB). Há iniciativas em curso para elaborar uma política mineral e industrial para minerais críticos e estratégicos por parte do Governo Federal e do Congresso Nacional, com sugestões do setor privado.

Entrementes, a geopolítica das terras raras tornou-se mais intensa, exigindo mais celeridade dos países em suas decisões. Os países mais avançados industrialmente tentam de várias maneiras diminuir a dependência da China, a qual predomina em todas as etapas da cadeia comercial de terras raras, como um ator singular, sendo o único país produtor-importador-consumidor-exportador nas três etapas da cadeia.

Com efeito, a China é o principal detentor de reservas (~50%), com maior destaque nas reservas de ETR pesadas (~80%). É o maior produtor mineral (~70%), o principal consumidor de ETR (~70%) e o maior importador de produtos do *upstream* para refinar internamente. É a líder global na etapa de refino (90%), assim como é o principal produtor de ímãs permanentes de ETR (~80%) e o principal consumidor desses ímãs (~60%). É o principal exportador de produtos do *midstream* e do *downstream*, e ainda faz uso de cotas de exportações para garantir o suprimento dos consumidores internos ou para barganha política-comercial.

Experiências internacionais mostram diferentes combinações entre capital doméstico, capital internacional e mecanismos de governança nacional. Portanto, com esse panorama, qualquer estratégia que o Brasil venha a adotar para se inserir mais ativamente na cadeia de valor das terras raras tem que considerar o cenário global, o qual é marcado fortemente pelo predomínio da China e por suas iniciativas. Além de um posicionamento soberano, o Brasil precisa avançar com agilidade, coordenação e estratégia, definindo ações para estruturar esse setor de modo competitivo e sustentável.

Concluído o diagnóstico do *upstream* — onde os minérios são extraídos e os concentrados produzidos — o capítulo seguinte trata do *midstream* da cadeia: a separação dos óxidos individuais por extração por solvente. É nessa etapa, de maior complexidade tecnológica e maior valor agregado, que a concentração chinesa atinge seu grau mais expressivo e que o Brasil precisa construir capacidade industrial inédita. Etapas posteriores da cadeia tendem a capturar maior valor agregado do que a exportação de concentrados.

Capítulo 11

Refino: separação dos óxidos por extração por solvente

O refino de terras raras é a etapa que converte os concentrados em óxidos separados por extração por solventes (SX) e que são destinados às cadeias de produtos com maior valor agregado. Embora a SX seja tecnicamente complexa e intensiva em conhecimento, ela constitui o elo que conecta o potencial mineral às indústrias de ímãs permanentes, catalisadores, baterias, vidros, materiais ópticos e outras aplicações avançadas. Por isso, a prioridade está na estruturação de uma base nacional de refino orientada por produtos-alvo, especificações industriais e articulação com a demanda.

No plano internacional, a China mantém posição dominante no refino — sua participação global e os mecanismos institucionais que a sustentam são detalhados no Capítulo 1. No Brasil, em 2026, o país ainda não dispõe de uma planta de SX de ETR em operação. Há, contudo, competências técnico-científicas instaladas em instituições públicas como CETEM, IPEN, CDTN, USP, que vêm atuando no estudo e no desenvolvimento de rotas de separação. Esse contraste entre capacitação acumulada e ausência de operação industrial revela que o avanço do refino exige, além do conhecimento técnico, a coordenação produtiva, definição de prioridades e articulação com mercados de destino.

O desenvolvimento de capacidade de refino constitui uma das alternativas estratégicas para ampliar a agregação de valor doméstica e reduzir dependências externas. Nessa perspectiva, o ganho do refino para o Brasil ultrapassaria a agregação de valor ao concentrado, pois viabilizaria uma oferta de insumos críticos para as cadeias produtivas de produtos com alta tecnologia. Trata-se de um avanço estratégico visando satisfazer a demanda interna e avançar no atendimento do mercado mundial em etapas sensíveis do suprimento e amplia a autonomia nacional em cadeias produtivas de maior valor agregado. Para isso, o refino pode ser orientado para produzir os insumos de relevância industrial, e que detenha, ainda, a flexibilidade operacional suficiente para processar diferentes matérias-primas de ETR.

Por fim, os desafios nacionais distribuem-se em dimensões tecnológicas, econômicas, regulatórias, ambientais e mercadológicas. Para enfrentá-los foi proposto um roadmap em três horizontes entre 2026 e 2040. O primeiro estágio pode concentrar-se na consolidação de bases técnico-operacionais, na definição das rotas prioritárias e na validação em escala piloto; o segundo, na transição para unidades focadas nos óxidos prioritários e no início da integração com as cadeias industriais; e o terceiro, na expansão de escala, na diversificação de produtos e na maior articulação com estratégias de economia circular. O Brasil já dispõe de ativos minerais e referências técnicas, mas o avanço do refino ainda depende de coordenação institucional, continuidade de investimentos e compromisso de longo prazo com o desenvolvimento tecnológico. Diversificar as opções de processamento pode contribuir para aumentar a resiliência das cadeias de suprimento.

11.1 Situação Atual

Nas décadas de 2010-2020, os elementos terras-raras (ETR) ocuparam posição ainda mais relevante nas agendas geopolítica e de transição energética, já que esses metais são usados em tecnologias estratégicas. Nesse cenário, a experiência internacional mostra que a competitividade de longo prazo depende da disponibilidade geológica e do domínio das etapas de processamento. É justamente nessas etapas que os concentrados minerais são transformados em insumos industriais com especificações compatíveis com a manufatura de materiais modernos.

No caso dos ETR, essa conversão é uma etapa crítica porque a semelhança química entre os lantanídeos impõe complexidade à separação por extração por solventes (SX). A extração por solventes permanece a principal rota industrial atualmente empregada, embora novas tecnologias estejam em desenvolvimento. A separação de terras raras representa uma das etapas mais complexas da cadeia produtiva, mas experiências internacionais demonstram que capacidades podem ser desenvolvidas por meio de investimento, cooperação tecnológica e aprendizado acumulado. Além disso, a capacidade de separação constitui um dos elos mais relevantes para a agregação de valor e autonomia produtiva.

É nesse contexto que se insere o presente capítulo, cujo propósito é discutir as possibilidades de implementação da etapa de refino dos ETR no Brasil. Mais do que conceituar tecnicamente essa operação hidrometalúrgica, o capítulo busca situá-la como a conexão entre a mineração e as cadeias produtivas a jusante, especialmente àquelas associadas a ímãs permanentes, catalisadores, materiais ópticos, polimento e outras aplicações de maior valor agregado.

Sob essa perspectiva, o refino deve ser tratado como um componente importante da estratégia nacional para os ETR, pois o desenvolvimento dessa etapa poderia criar as condições necessárias para o crescimento das cadeias produtivas. Por outro lado, ignorá-lo tende a restringir o país à exportação de concentrados e intermediários químicos e produtos de maior valor agregado. Portanto, essa discussão é um tema importante para a inserção do Brasil em segmentos industriais mais intensivos em tecnologia e valor agregado.

11.2 Visão geral do capítulo

A construção deste capítulo foi organizada em quatro eixos:

- (i) **Fundamentação técnica:** nas Seções 3 e 4, apresentam-se, inicialmente, as etapas que antecedem a separação por extração por solventes, com destaque para a lixiviação, a purificação dos licores e as principais rotas associadas às diferentes matérias-primas de terras raras. Em seguida, discute-se o panorama internacional do refino e expõem-se os fundamentos técnicos da própria separação por SX, situando essa etapa no contexto industrial contemporâneo;
- (ii) **Direcionamento tecnológico-industrial:** as Seções 5, 6, 7 e 8 discutem o papel estratégico do refino na cadeia produtiva de terras raras, a evolução recente das patentes de separação, a definição de produtos-alvo e de especificações industriais, bem como

aspectos relevantes da configuração de plantas de SX. Esse eixo procura mostrar que a implantação do refino não deve ser orientada apenas pela viabilidade técnica da separação, mas também pelas demandas dos mercados de destino e pelos objetivos industriais do país;

- (iii) Diagnóstico nacional: as Seções 8, 9, 10 e 11 discutem o caso brasileiro, identificam instituições, laboratórios e empresas com atuação em separação de ETR e sistematizam os principais gargalos tecnológicos, econômicos, regulatórios e ambientais;
- (iv) Proposição: a Seção 12 organiza os elementos anteriores em uma trajetória sugerida de implantação do refino no país estruturada em horizontes temporais.

11.3 Contexto internacional da SX de elementos terras-raras

Antes de abordar a separação dos elementos terras raras (ETR), descreveremos brevemente as etapas de lixiviação e purificação. Esses processos sucedem o beneficiamento mineral e são fundamentais para viabilizar a posterior separação individual desses elementos.

11.3.1 Lixiviação e purificação das principais fontes minerais de terras raras no mundo e no Brasil

A etapa hidrometalúrgica das terras raras começa após a concentração do minério ou, no caso das argilas iônicas, quando o material já está apto para lixiviação. Desse ponto em diante, o objetivo é transferir os ETR da fase sólida para a fase aquosa com o máximo de recuperação e, quando possível, com o mínimo de solubilização de impurezas.

As rotas que efetivamente estruturaram a lixiviação em escala industrial são apresentadas na Tabela 11.1: (1) digestão cáustica e sulfúrica para monazita; (2) sulfatação ou calcinação seguida de lixiviação ácida para bastnasita; (3) sulfatação ou abertura alcalina para xenotima; e (4) dessorção iônica mediante contato com sais amoniacaais ou análogos para argilas iônicas. Os minérios de Bayan Obo (China) e Mt Weld (Austrália) são exemplos clássicos da rota sulfúrica. Já Mountain Pass (Estados Unidos) representa o processo de sulfatação e lixiviação para a bastnasita. Por fim, as argilas iônicas chinesas e, mais recentemente, a Serra Verde (Minaçu, Goiás) e a Meteoric (Poços de Caldas, Minas Gerais), representam a rota de dessorção iônica (Demol et al., 2019; INB, 2012; Lynas, [s.d.]b; MP Materials, 2025; Serra Verde, [s.d.]).

Do ponto de vista de processo, a lixiviação e a purificação precisam ser analisadas conjuntamente. A rota de abertura define o teor, a especiação dos ETR no licor e as impurezas que podem ser lixiviadas. Na monazita e na xenotima, a dificuldade metalúrgica dominante é a presença de fósforo e de radionuclídeos, sobretudo tório e urânio. Na bastnasita, o desafio é controlar flúor (F), cálcio (Ca), ferro (Fe), fósforo (P) e cério (Ce). Por outro lado, a dessorção nas argilas iônicas é operacionalmente simples, mas isso vem acompanhado de licores muito diluídos, ricos em sais do próprio lixiviante, com possível implicação ambiental e econômica (Demol et al., 2019; Giese e De Souza, 2022; Shi et al., 2022).

Tabela 11.1: Comparação das principais rotas de lixiviação e purificação.

Fonte mineral	Base química do mineral ou da ocorrência	Rota de lixiviação predominante	Principais impurezas do licor/eixo principal de purificação
Monazita	Fosfato de terras raras, dominante em ETR leves e frequentemente com Th e U	Digestão cáustica com NaOH seguida de dissolução ácida; ou sulfatação com H ₂ SO ₄ e lixiviação em água	P, Fe, Al, Th, U, Ca; em alguns casos Si. Eixo principal: separação de fósforo; controle de Fe/Al; remoção rigorosa de Th/U antes das etapas posteriores (Alves et al., 2021; Amaral e Morais, 2010; Demol et al., 2019).
Bastnasita	Fluorocarbonato de ETR, dominante em ETR leves	Calcinação e lixiviação ácida; em alguns casos sulfatação	F, Ca, Fe, Al, P; parte do Ce pode exigir manejo específico. Eixo principal: controle de flúor e cálcio; remoção de Fe/Al; condicionamento do licor para evitar incrustações e coprecipitação (Demol et al., 2019; He et al., 2017; Lynas, [s.d.])b).
Xenotima	Fosfato de ítrio rico em ETR pesadas	Sulfatação com H ₂ SO ₄ ou abertura alcalina com NaOH, seguida de lixiviação ácida	P, Fe, Al, Th, U; tipicamente maior sensibilidade radiológica. Eixo principal: remoção de fósforo, clarificação do licor e controle de radionuclídeos (Alex et al., 1998; Demol et al., 2019).
Argilas iônicas	Terras raras adsorvidas na estrutura da argila	Lixiviação por troca iônica com sulfato de amônio e soluções correlatas; rotas mais novas usam ligantes orgânicos/amoniacais de menor impacto	Al, Fe, Mn, Mg, Ca, NH ₄ ⁺ , SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻ ; licor diluído. Eixo principal: remoção de Fe/Al/Mn por neutralização controlada e gestão da carga salina do circuito (Giese e De Souza, 2022; Russo et al., 2025; Shi et al., 2022).

No caso do Brasil, em síntese, a lixiviação e a purificação das principais fontes minerais de terras raras no Brasil, se enquadram principalmente em duas situações hidrometalúrgicas diferentes. A primeira é a dos carbonatitos e lateritas carbonatíticas, como Araxá, em que a rota de lixiviação precisa ser desenhada para controlar a extração de ferro e outras impurezas do sistema Nb–P–Fe–ETR e ao mesmo tempo produzir um licor de ETR sem carregar junto o passivo do tório e do urânio. A segunda situação é mais recente e trata sobre as argilas iônicas, no qual a abertura é fácil, mas a qualidade hidrometalúrgica do projeto passa a depender de uma purificação eficiente de licores diluídos e de uma gestão robusta de amônio, sulfato e água de processo (MP Materials, 2025; Nascimento et al., 2019; Serra Verde, [s.d.]).

11.3.2 Empresas e países que separam ETR no mundo hoje

Atualmente, a China responde por aproximadamente 90% da separação dos óxidos de terras raras no mundo (ver discussão consolidada no Capítulo 1), posição que decorre tanto da disponibilidade mineral quanto do domínio da tecnologia de separação por extração por solvente. O ponto a destacar para os fins deste capítulo é a integração entre o refino e as demais etapas a jusante das cadeias, o que confere ao país presença dominante ao longo de toda a cadeia produtiva.

Essa integração industrial foi reforçada por movimentos regulatórios e organizacionais na década de 2010, que consolidaram ainda mais a posição chinesa no refino global. Em 2024, as cotas de mineração, fundição e separação foram concentradas em dois grandes grupos estatais (China Northern Rare Earth Group e China Rare Earth Group) (IEA, 2025; Reuters, 2025b). Além disso, houve restrições à transferência de tecnologia associada à extração, separação e fabricação de ímãs de terras raras (Liu e Patton, 2023; Reuters, 2025b). Por fim, houve, ainda, a restrição à exportação de materiais e produtos relacionados a ETR médias e pesadas, como o samário (Sm), o gadolínio (Gd), o térbio (Tb), o disprosio (Dy), o lutécio (Lu), o escândio (Sc) e o ítrio (Y) (MOFCOM, 2025; Reuters, 2025a; Waldersee et al., 2025). Todas essas ações da política externa e comercial chinesa revelam uma coordenação estratégica do governo, porque sinalizam que sem os óxidos o desenvolvimento das tecnologias modernas será limitado.

Fora dela, destacam-se Malásia/Austrália (Lynas), França (Solvay), Estados Unidos (MP Materials e Energy Fuels), Índia (IREL) e Canadá (SRC). Esses casos, entretanto, são heterogêneos em escopo de produtos, maturidade e escala.

Tabela 11.2: Principais países e empresas com separação de terras raras em operação em 2026.

País	Empresa / instituição	Situação reportada publicamente	Ref.
China	China Northern Rare Earth Group / China Rare Earth Group	Centro dominante do refino e da separação mundial; quotas de mineração, fundição e separação concentradas em dois grandes grupos estatais. Em 2024 a China Northern Rare Earth processou 170.001 t de OTR e a China Rare Earth Group 83.999 t de OTR. Total processado 254.000 t de OTR.	(IEA, 2025; Reuters, 2025b)
Malásia / Austrália	Lynas Rare Earths	Opera em Gebeng, na Malásia, a maior planta individual de processamento fora da China; produz materiais separados de terras raras para exportação. Em 2025 produz 10.462 t de OTR e 6.558 t de NdPr. Em 2025 iniciou produção comercial de Dy e Tb em 2025, mas não divulgou a tonelagem anual separada desses dois produtos.	(Lynas, 2025a, 2025b, [s.d.], [s.d.])
França	Solvay	La Rochelle foi expandida em 2025 e é apresentada pela empresa como a maior planta fora da China capaz de separar todos os materiais de terras raras. Iniciou produção de óxidos de NdPr em abril/2025. Volumes de produção “relativamente pequenos” no meio de 2025. Iniciou produção de samário no	(Solvay, 2025, [s.d.])

País	Empresa / instituição	Situação reportada publicamente	Ref.
		segundo semestre de 2025. Dy e Tb previstos para 2026.	
Estônia	Neo Performance Materials	Usina de separação de terras raras com capacidade instalada de aproximadamente 3.000 toneladas por ano, com foco em NdPr. A empresa recentemente incluiu linha de separação de Terras Raras Pesadas, como o Dy e o Tb.	(Magnequench, [s.d.]; Neo Performance Materials, 2025)
Estados Unidos	MP Materials	A refinaria da Califórnia já processa quase metade da produção da empresa, com material vendido majoritariamente fora da China. Refino/separação química de 2.599 toneladas de óxido de NdPr em 2025 em Mountain Pass. Refino/separação de Tb e Dy iniciando operação em 2026.	(MP Materials, 2026a, 2026b, [s.d.])
Estados Unidos	Energy Fuels	A White Mesa Mill possui capacidade instalada na Fase 1 para cerca de 1.000 t/ano de NdPr, com expansão prevista para Dy/Tb na Fase 2. Em 2025 produziram 30 kg de óxido de disprósio e 1 kg de óxido de térbio com 99,9% de pureza. Produção de 38 t de NdPr óxido equivalente em 2024, a partir do processamento de 500 t de monazita. Capacidade instalada da P Fase 1 da ordem de 850-1.000 t/ano de NdPr e expansão prevista para até 35 t/ano de Dy e 12 t/ano de Tb em 2027.	(Energy Fuels, 2026a, 2026b, 2026c)
Índia	IREL	A divisão de Aluva refina concentrados mistos e produz terras raras separadas de alta pureza; a unidade OSCOM fornece concentrados/cloretos mistos. A unidade OSCOM informa capacidade da ordem de 11.000 t/ano de concentrado/cloreto misto de terras raras, enquanto a divisão de Aluva produz compostos individuais de alta pureza (La, Ce, NdPr, Sm, Gd e Y).	(IREL, 2025, [s.d.]a, [s.d.]b, [s.d.]c)
Canadá	Saskatchewan Research Council (SRC)	Instalação integrada com hidrometalurgia, separação e metalurgia; o governo provincial informou produção de metais de terras raras na América do Norte.	(SRC, 2024, [s.d.]a, [s.d.]b)

País	Empresa / instituição	Situação reportada publicamente	Ref.
		A SRC informou produção de metais de terras raras em escala comercial no verão de 2024, com prontidão para 10 t/mês de metais NdPr e meta de 40 t/mês até o fim de 2024. Para a operação plena, a instituição indica 400 t/ano de metal NdPr, podendo chegar a 600 t/ano, além de quantidades significativas de óxidos e metais de Dy e Tb (Mishra, [s.d.]; Toyota Tsusho e Sojitz, [s.d.]).	
Japão	1) Shin-Etsu Chemical (Echizen); 2) Rare Material Division da Mitsui Kinzoku (Omuta)	Shin-Etsu Chemical (Takefu Plant): SX de ETR com produção de óxidos/compostos de alta pureza. Não se declara produção nem origem mineral específica da matéria prima atual. A Shin-Etsu também recicla imãs de NdFeB a escala industrial. Capacidade não divulgada. A Rare Material Division da Mitsui Kinzoku, em Omuta, é uma operação relevante de refino e fabricação de produtos de terras raras de alta pureza, baseada em extração por solventes e troca iônica, com portfólio amplo de óxidos, sais e metais. Capacidade de produção e separação anual não divulgada.	(Mishra, [s.d.]; Toyota Tsusho e Sojitz, [s.d.])

A leitura da tabela mostra que a separação fora da China deixou de ser apenas laboratorial, mas ainda está longe de constituir um sistema robusto e plenamente diversificado. A maior parte das capacidades não chinesas continua concentrada em poucos ativos industriais, com vulnerabilidade a preço, escala, feedstock e financiamento. Se por um lado a China já desenvolveu o refino e as cadeias produtivas a jusante, o restante do mundo ainda tenta estruturá-los, sendo que, até 2026, seguem limitados.

Entretanto, as nações consumidoras de terras raras buscam autonomia e autossuficiência para mitigar a dependência das importações chinesas. Para isso, têm implementado diversas políticas de apoio governamental que variam significativamente em formato de país para país.

Os dois mecanismos mais relevantes nesse esforço de autonomia — o acordo MP Materials–Departamento de Defesa dos EUA e o programa JARE–Lynas no eixo Austrália–Japão — foram analisados em detalhe no Capítulo 1 e revisitados, do ponto de vista do Roadmap, no Capítulo 3. Para os fins do presente capítulo, importa registrar que ambos demonstram que a viabilidade de uma cadeia ocidental de ETR depende menos da geologia do que de instrumentos institucionais de garantia de demanda e proteção de preços.

Uma atualização em março de 2026 deste acordo passou a assumir contornos mais explícitos de mitigação de risco comercial e garantia de abastecimento. Neste, a Lynas reformulou seu acordo com a Japan Australia Rare Earths (JARE), controlada pela JOGMEC e pela Sojitz, assegurando um compromisso firme de compra de 5.000 t/ano de NdPr até 2038. O novo acordo também prevê o direcionamento de 75% da produção de óxidos de terras raras pesadas da Lynas à indústria japonesa, com a JARE comprometendo-se a adquirir metade da produção total de terras raras pesadas da empresa. Além disso, o contrato passou a incorporar um piso de preço de US\$ 110/kg para esse volume anual de NdPr e um mecanismo de partilha de ganhos quando os preços ultrapassarem US\$ 150/kg, reforçando o caráter estratégico do arranjo.

A atualização desse acordo evidencia, ainda, um movimento mais amplo de travamento antecipado da oferta não chinesa por parte de economias que tratam as terras raras como insumo estratégico. Em março de 2026, a Arafura Rare Earths avaliou que Coreia do Sul e Alemanha se tornaram mais expostas ao risco de escassez, em razão de a oferta relevante fora da China permanecer concentrada, no momento, sobretudo em Lynas e MP Materials, já parcialmente comprometidas por acordos estratégicos de longo prazo. Nesse contexto, a Arafura passou a se posicionar como alternativa adicional de suprimento, projetando para o projeto Nolans uma produção de 4.440 t/ano de NdPr a partir do segundo semestre de 2029, equivalente a cerca de 4% da oferta global (Burton, 2026).

Outro exemplo de cadeia japonesa fora do Japão é a Toyotsu Rare Earths India (TREI), *joint venture* da Toyota Tsusho com a IREL, criada para produzir e processar terras raras para a cadeia japonesa. Fontes analíticas sobre a política japonesa apontam o envio de cerca de 2.500 t de terras raras processadas da Índia para a cadeia da Toyota no contexto desse arranjo (Mishra, [s.d.]). Há também iniciativas japonesas no Vietnã. A Toyota Tsusho e a Sojitz foram associadas historicamente a planos de processamento no país, e uma operação com capital japonês, a SRE Vietnam (ligada à Tokai Trade), buscava elevar sua capacidade de processamento para 3.929 t/ano. Novamente, isso mostra presença japonesa relevante na cadeia de processamento/separação, mas não dentro do território japonês (Toyota Tsusho e Sojitz, [s.d.]).

Na Europa, o apoio é menos “empresa a empresa” e mais estruturado como política industrial regional. A expansão da Solvay em La Rochelle foi apresentada pela própria empresa como alinhada às metas estratégicas europeias para autonomia em materiais críticos. Em paralelo, a União Europeia passou a operar o *Critical Raw Materials Act* (CRMA), que cria um regime de projetos estratégicos para extração, processamento, reciclagem e substituição, com aceleração de licenciamento e melhor acesso a financiamento. Assim, o apoio europeu existe, mas em geral vem mais por marco regulatório, priorização e financiamento institucional do que por um contrato de preço mínimo como no caso estadunidense (EUR-Lex, [s.d.]).

No Canadá, o apoio estatal aparece de forma mais direta no financiamento à infraestrutura tecnológica, como no caso da instalação da Saskatchewan Research Council (SRC), que recebeu desde 2020 C\$ 71 milhões do Governo de Saskatchewan e C\$ 30 milhões do Governo do Canadá para estruturar uma instalação integrada “do mineral ao metal” (SRC, 2024).

Na Índia, o suporte combina a atuação de empresas estatais com uma política nacional explícita para minerais críticos: a National Critical Mineral Mission (NCMM), lançada em 2025, foi concebida para fortalecer a cadeia desde exploração, mineração e processamento até reciclagem, P&D e formação de

recursos humanos, com dispêndio público proposto de US\$ 1,75 bilhão e investimentos esperados de US\$ 1,75 bilhão por estatais e outros agentes (PIB, [s.d.]).

No caso da Estônia, o apoio público documentado aparece de forma mais clara na consolidação da cadeia integrada de separação e fabricação de ímãs: a operação da Neo Performance Materials em Sillamäe, reconhecida como uma das poucas instalações não cativas de separação de terras raras na Europa, serviu de base para a implantação de uma nova fábrica de ímãs em Narva, apoiada por até €18,7 milhões em recursos do governo estoniano, via Just Transition Fund da União Europeia; adicionalmente, o projeto recebeu uma linha de crédito de US\$ 50 milhões da Export Development Canada (EDC). Assim, embora o apoio público explicitamente divulgado na Estônia tenha se concentrado mais fortemente na etapa *downstream* de fabricação de ímãs do que na planta histórica de separação, o caso evidencia uma estratégia de fortalecimento de cadeia integrada no território europeu. Em conjunto, esses casos mostram que o apoio governamental às cadeias de terras raras já é uma realidade internacional, embora em formatos distintos (Brazilian Critical Minerals, 2025; Gupta e Krishnamurthy, 2015; Xie et al., 2014).

11.4 Fundamentos técnicos da separação por extração por solventes

A extração por solventes, ou extração líquido-líquido, é uma operação unitária amplamente usada na indústria mineral para separar e/ou concentrar metais a partir de soluções aquosas. Nessa operação o agente de separação de massa é uma solução orgânica composta por um diluente, geralmente isoparafina, e um princípio ativo denominado extratante, cuja função é interagir com os elementos terras-raras contidos no licor de lixiviação purificado (alimentação) e transferi-los seletivamente para a fase orgânica. O mecanismo pelo qual ocorre a extração do soluto depende da natureza eletrostática da molécula, do par iônico e/ou do íon metálico extraído. Na primeira categoria, tem-se os extratantes neutros, que solvatam uma molécula metálica neutra para formar um complexo organometálico (Rydberg, 2004). Nos extratantes aniônicos o mecanismo ocorre por uma associação iônica entre espécies contrariamente carregadas (Ritcey e Ashbrook, 1979; Rydberg, 2004), sendo o metal na forma aniônica e o extratante na forma de aminas ativadas positivamente mediante o contato com ácido forte. Por fim, tem-se os extratantes catiônicos, cuja interação ocorre entre o cátion metálico e a parte polar e ionizável.

Como os ETR são cátions trivalentes em meio aquoso clorídrico, a extração ocorre, portanto, mediante uso de extratantes catiônicos. São exemplos dessa categoria os ácidos organofosforados, carboxílicos e naftênicos, além dos extratantes derivados da oxima, aldeídos e cetonas, cujos complexos organometálicos encontram-se na forma de quelatos (Ritcey e Ashbrook, 1979). Os mais usados para o refino de ETR são os ácidos organofosforados (Xie et al., 2014), como o di(2-etilhexil) ácido fosfórico (D2EHPA) e o 2-etilhexil ácido fosfônico mono 2-etilhexil éster (EHEHPA) (Figura 11.1).

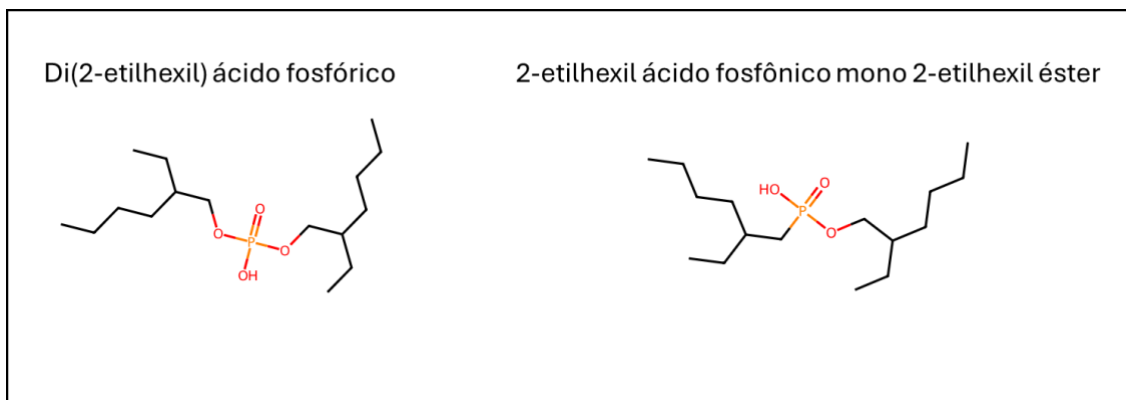


Figura 11.1: Extratantes tipicamente usados no refino de ETR por SX: D2EHPA (esquerda) e EHEHPA (direita).

As principais etapas envolvidas no processo SX são mostradas na Figura 11.2. Após a lixiviação e purificação, o licor de lixiviação (alimentação) é enviado para a etapa de extração por solvente, na qual o licor é contactado com um extratante orgânico, e o ETR de interesse é transferido para esse. Idealmente, essa etapa seria suficientemente seletiva ao ETR de interesse e não haveria extração dos demais ETR, que sairiam puros no efluente aquoso esgotado (refinado). Contudo, há coextração dos demais ETR e se torna necessária uma etapa de lavagem da fase orgânica impura.

Nessa segunda etapa, os ETR coextraídos são removidos mediante a adição de uma solução de lavagem, que é composta ou por um ácido diluído ou por uma solução de lavagem contendo o próprio ETR de interesse. Gera-se, portanto, uma corrente aquosa secundária que é misturada novamente com o licor.

Por fim, o orgânico contendo somente o ETR de interesse é enviado para a etapa de reextração, na qual se usa um ácido mineral em alta concentração para transferir os ETR extraídos para a fase aquosa, produzindo-se, assim, um extrato aquoso. Essa corrente e o refinado podem ser enviados para outros circuitos de SX ou para as etapas de precipitação como hidróxido, carbonato ou oxalato, seguida da calcinação do sólido para se obter um óxido de ETR. Além disso, o extratante pode ser regenerado, se necessário, e recircula no processo, retornando à etapa de extração. Como podem ocorrer eventuais perdas por solubilidade do solvente na fase aquosa e por separação imperfeita de fases (entranhamento), uma corrente de reposição de extratante pode ser necessária para manter o inventário constante.

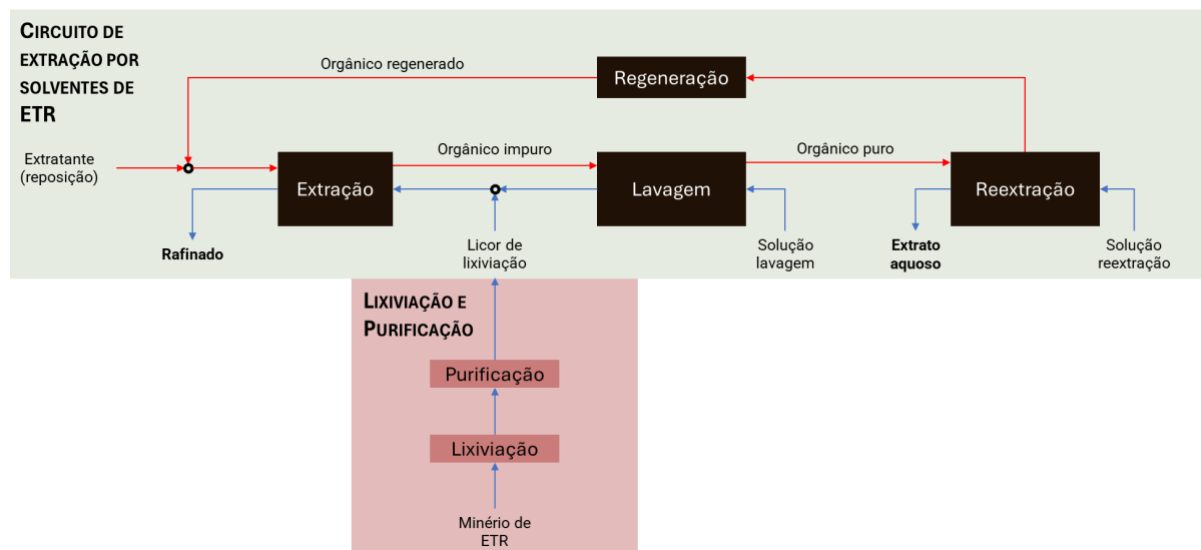


Figura 11.2: Fluxograma simplificado das etapas de lixiviação, purificação e de um circuito típico de SX de ETR.

Usando como caso base um licor monazítico isento de Ce destinado à produção de óxidos para a cadeia de ímãs permanentes (Figura 11.3), observa-se que são necessários cinco cortes para a produção de ETR magnéticos (Pr + Nd, Tb e Dy), nas etapas descritas brevemente abaixo:

- i. Lixivia-se o concentrado de ETR mistos para a obtenção do licor de alimentação;
- ii. Na primeira etapa de SX (Sm/Nd), obtêm-se duas frações principais: uma fração leve contendo La, Pr e Nd, e uma fração média e pesada, composta por Sm-Er e Y;
- iii. Na etapa seguinte (NdPr/La), a fração leve é subdividida em La (Subproduto 1), e em outra corrente contendo Pr + Nd (Produto 1);
- iv. Enquanto isso, a segunda fração é separada em um concentrado de ETR médios Sm + Eu + Gd (Subproduto 2) e em uma corrente com ETR pesados com Tb + Dy + Ho + Y + Er;
- v. Na sequência (Ho/Dy), a corrente de ETR pesados é novamente fracionada, gerando um concentrado de Tb + Dy e outra contendo Ho, Y e Er (Subproduto 3);
- vi. Por fim (Dy/Tb), o concentrado de Tb + Dy é fracionado em seus óxidos individuais, gerando mais dois produtos puros (Tb₄O₇, Dy₂O₃);

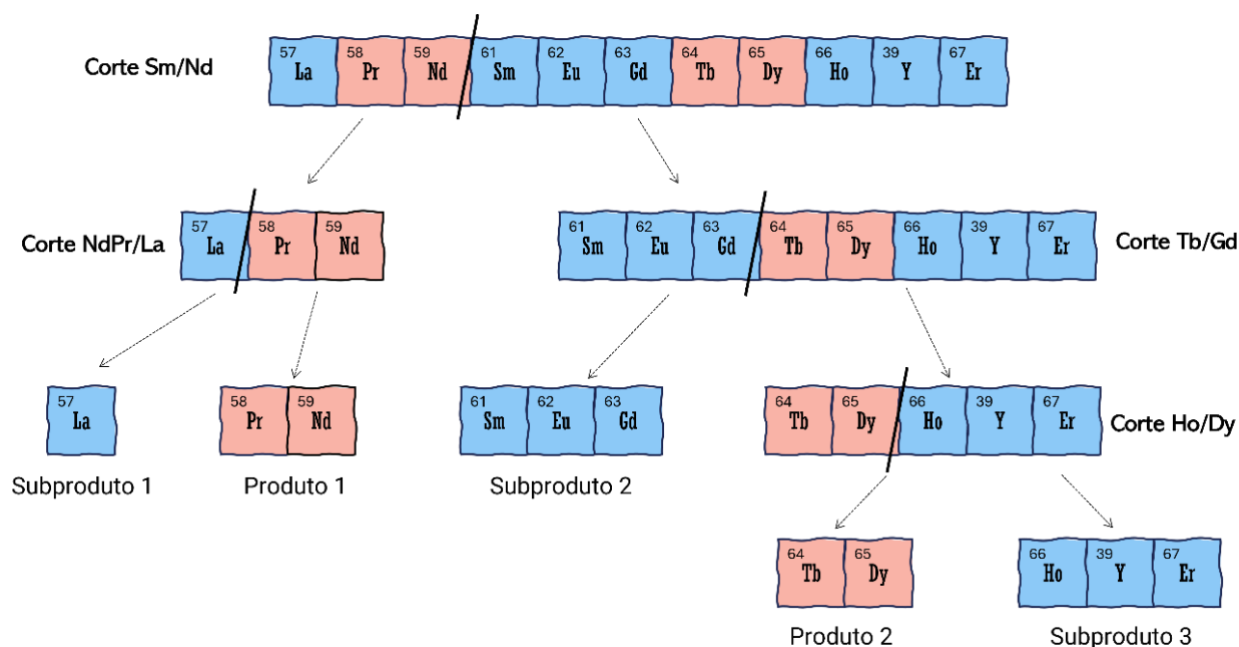


Figura 11.3: Rota proposta para a produção de ETR magnéticos a partir de um licor monazítico isento de Ce.

Portanto, observa-se que o refino dos ETR por SX não é uma operação trivial, pois demanda estabelecer vários cortes que podem conter centenas de estágios de equilíbrio cada um para atingir as especificações de pureza das cadeias produtivas. Por esse motivo, o desenvolvimento do refino em escala industrial depende do domínio da química dos ETR e da capacidade de transformá-lo em circuitos. É justamente essa exigência que ajuda a compreender por que o refino de ETR permanece concentrado em poucos países e porque sua distribuição internacional se tornou um tema central para a dinâmica das cadeias produtivas desses elementos.

Complexidade termodinâmica e operacional da separação de lantanídeos

A dificuldade de separar lantanídeos individuais por extração por solvente tem fundamento eletrônico-químico. Os íons trivalentes desses elementos apresentam configurações eletrônicas muito próximas e, em consequência da contração lantanídica, raios iônicos que variam por incrementos muito pequenos entre elementos vizinhos. Os fatores de separação obtidos com os extratantes industrialmente disponíveis (D2EHPA e EHEHPA, descritos acima) ficam, em larga parte da série, próximos da unidade. A combinação dessas duas propriedades — quase-degenerescência eletrônica e proximidade dimensional — é a razão pela qual a separação industrial só se torna viável em cascatas com dezenas a centenas de estágios de equilíbrio por corte.

A operação de circuitos dessa magnitude exige controle simultâneo de pH, temperatura, concentração iônica total, cinética de transferência interfacial, estabilidade do orgânico e contaminação cruzada entre estágios. Pequenas oscilações em qualquer dessas variáveis se propagam ao longo da cascata e podem deslocar os perfis de pureza fora das janelas comerciais. Esse controle é, em larga medida, tácito: depende de heurísticas operacionais, de calibrações repetidas e de protocolos analíticos refinados que se acumulam

em décadas de operação industrial. A barreira de entrada que separa um país que domina circuitos comerciais de SX de outro que ainda opera em escala piloto está, antes de tudo, nesse acervo de conhecimento operacional — e não na disponibilidade dos extratantes ou no projeto formal do circuito.

11.5 Evolução das patentes dos processos de separação de ETRs por extração por solvente: 1987-2025

Para o levantamento de patentes foi realizada uma busca na base de dados Derwent Innovations Index a partir de três estratégias complementares (Tabela 11.3): #1 “rare earth”, com 146.763 registros; #2 “solvent extraction”, com 98.794 registros; e #3 “1 AND 2”, com 726 registros. As análises apresentadas a seguir restringem-se ao universo recuperado pela estratégia #3, por representar o núcleo patentário especificamente associado à extração por solventes aplicada às terras raras, e foram conduzidas segundo o critério do top 10.

Tabela 11.3: Estratégia usada para a pesquisa de patentes relacionadas a SX de ETR.

Número	Estratégia	Quantidade
1	rare earth	146.763
2	solvent extraction	98.794
3	1 AND 2	726

No que se refere às áreas do conhecimento (Tabela 11.4), observa-se nítida concentração em Química (719), Ciência dos materiais (499), Metalurgia e engenharia metalúrgica (445) e Engenharia (327), seguidas por Ciência dos polímeros (188), Instrumentos e instrumentação (116), Eletroquímica (79), Energia e combustíveis (74), Recursos hídricos (32) e Biotecnologia e microbiologia aplicada (28). Esse perfil indica que o conjunto patentário analisado está fortemente orientado para o desenvolvimento de rotas de processamento, separação, purificação e transformação de materiais, e menos para aplicações finais específicas, o que é coerente com um recorte tecnológico centrado na extração por solventes de terras raras.

Tabela 11.4: Áreas do conhecimento das patentes depositadas (critério top 10)

Área do conhecimento	Contagem	% do total
Química	719	27,2%
Ciência dos materiais	499	18,9%
Metalurgia e engenharia metalúrgica	445	16,8%
Engenharia	327	12,4%

Área do conhecimento	Contagem	% do total
Ciência dos polímeros	188	7,1%
Instrumentos e instrumentação	116	4,4%
Eletroquímica	79	3,0%
Energia e combustíveis	74	2,8%
Recursos hídricos	32	1,2%
Biotecnologia e microbiologia aplicada	28	1,1%

Quanto aos depositantes (Tabela 11.5), os dez principais são China Petroleum Chem Corp (23), Xiamen Rare Earth Materials Inst (22), Sinopec Res Inst Petroleum Processing (19), Ganjiang Innovation Acad Chinese Acad Sc (10), Mitsubishi Materials Corp (10), Mitsubishi Materials Techno Corp (10), Res Inst Petroleum Processing Sinopec (10), Changchun Applied Chem Inst Chinese Acad (9), Sumitomo Metal Mining Co (9) e Univ Jiangxi Sci Technology (9). O recorte mostrado evidenciou a predominância de instituições e empresas chinesas, acompanhadas por presença relevante de grupos japoneses, sugerindo que a fronteira tecnológica permanece ancorada em organizações asiáticas ligadas tanto ao processamento químico quanto ao desenvolvimento de materiais e rotas de separação.

Tabela 11.5: Proprietários de patentes (critério top 10)

Proprietários	Contagem	% do total
China Petroleum Chem Corp	23	5,4%
Xiamen Rare Earth Materials Inst	22	5,1%
Sinopec Res Inst Petroleum Processing	19	4,4%
Ganjiang Innovation Acad Chinese Acad Sc	10	2,3%
Mitsubishi Materials Corp	10	2,3%
Mitsubishi Materials Techno Corp	10	2,3%
Res Inst Petroleum Processing Sinopec	10	2,3%
Changchun Applied Chem Inst Chinese Acad	9	2,1%
Sumitomo Metal Mining Co	9	2,1%
Univ Jiangxi Sci Technology	9	2,1%

Em relação aos códigos da ICP e suas respectivas quantidades (Tabela 11.6), destacam-se C22B 59/00 (366), referente à obtenção de metais de terras raras; C22B 3/26 (131), relativo à extração, por via úmida, de compostos metálicos a partir de minérios ou concentrados por extração líquido-líquido com compostos orgânicos; C22B 7/00 (118), associado ao tratamento de matérias-primas que não sejam minérios, como sucata, para obtenção de metais não ferrosos ou de seus compostos; C22B 3/38 (100), referente à extração, por via úmida, com compostos orgânicos contendo fósforo; B01D 11/04 (76), correspondente à extração por solvente de soluções líquidas; C01F 17/00 (67), ligado a compostos de metais de terras raras; C22B 3/44 (58), referente à extração, por via úmida, por processos químicos; C22B 60/02 (44), associado à obtenção de tório, urânio ou outros actinídeos; C22B 3/00 (43), relativo à extração, por via úmida, de compostos metálicos a partir de minérios ou concentrados; e C22B 3/32 (41), referente à extração, por via úmida, com ácidos carboxílicos.

Em conjunto, esses códigos mostram que o universo analisado é dominado por tecnologias de hidrometalurgia e separação química, com ênfase em rotas de extração por solventes e obtenção de compostos ou metais de terras raras.

Tabela 11.6: Códigos IPC das patentes de SX de ETR (critério top 10).

Códigos IPC	Contagem	% do total
C22b-059/00	366	18,3%
C22b-003/26	131	6,6%
C22b-007/00	118	5,9%
C22b-003/38	100	5,0%
B01d-011/04	76	3,8%
C01f-017/00	67	3,4%
C22b-003/44	58	2,9%
C22b-060/02	44	2,2%
C22b-003/00	43	2,2%
C22b-003/32	41	2,1%

Merece destaque, nesse contexto, a patente do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) intitulada “Processo contínuo para separação de terras-raras leves” (BR 102016023957-5 A2). A invenção descreve um processo contínuo de separação de lantânio e didímio (Pr + Nd) por extração por solvente em meio clorídrico estruturado em três etapas usando extratante organofosforado e ácido láctico como complexante biodegradável. Os resultados experimentais indicaram que se obteve didímio com pureza de até 99,9%, lantânio com pureza da ordem de 96-98% e recuperações elevadas, chegando, em uma das

configurações descritas, a 99% de La, 86% de Pr e 92% de Nd. Trata-se de um ativo particularmente relevante porque se posiciona, simultaneamente, no campo da separação de terras raras leves, na agenda de processos mais limpos e na escala contínua de operação.

11.6 O papel do refino na cadeia produtiva de ETR

É comum dizer que a separação de um concentrado em seus óxidos individuais de alta pureza pode aumentar a ordem de grandeza da receita da mineradora que implementa a rota de SX. Contudo, esse ganho deve ser interpretado com cautela. Usando um caso recente de exemplo (Brazilian Critical Minerals, 2025), um carbonato misto de terras-raras (MREC) continha 6,71% de Pr_6O_{11} , 26,67% de Nd_2O_3 , 0,24% de Tb_4O_7 e 0,96% de Dy_2O_3 . Se o MREC seja vendido como intermediário, o valor de venda do carbonato de ETR (42-45% REO) seria de USD 6,02/kg em outubro de 2025. Por outro lado, a cesta de óxidos foi estimada em US\$ 34,05/kg (Brazilian Critical Minerals, 2025), o que representa uma valorização de cerca de 465% em relação à venda do carbonato. Ressalta-se, contudo, que esse resultado mostra um limite teórico e não considera a variabilidade do depósito mineral, os custos de processamento e a eficiência da separação.

Além do ganho de receita, o refino tem um papel decisivo que é transformar a disponibilidade mineral em insumos para as indústrias de alto valor agregado (Figura 11.4). É essa etapa que permite a disponibilização de óxidos separados com especificações compatíveis com as cadeias produtivas a jusante. Sem esse elo, a existência de recursos minerais não se converte automaticamente em fornecimento para fabricantes de ímãs permanentes, catalisadores, vidros, materiais ópticos e outras aplicações intensivas em ETR. Além de valorizar um produto mineral, o refino é importante porque viabiliza a produção doméstica dos insumos químicos que sustentam a industrialização a jusante.

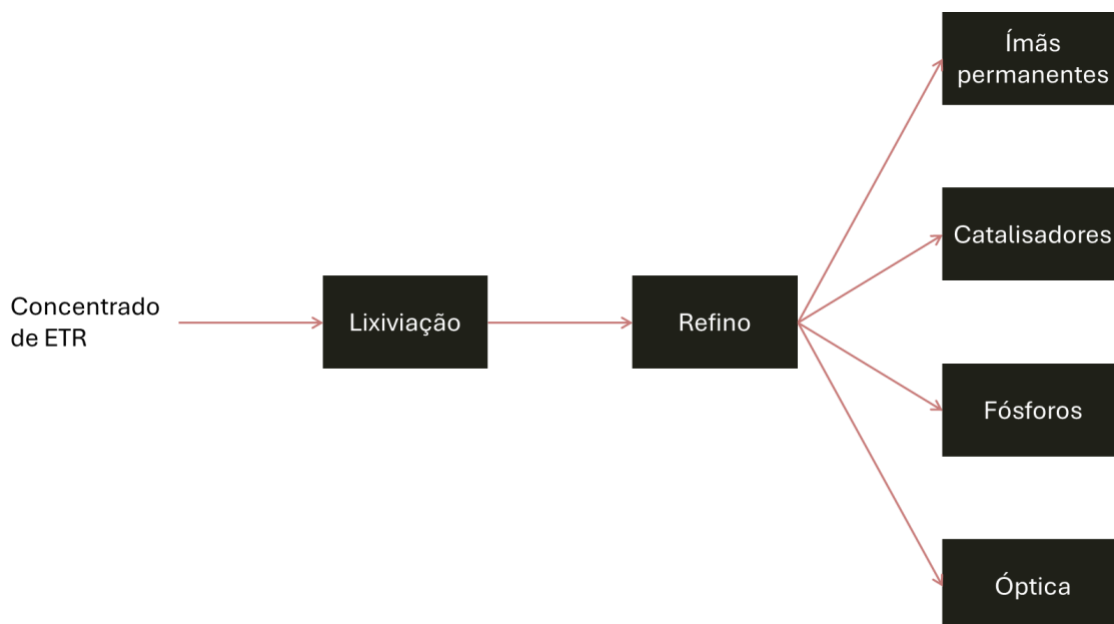


Figura 11.4: A localização do refino na cadeia produtiva de tecnologias a base de ETR.

Sob essa ótica, a etapa de refino tem duas contribuições relevantes, uma relacionada com o ganho econômico e a outra o Brasil está no fornecimento de óxidos separados para as indústrias a jusante.

11.7 Produtos-alvo, especificações e integração com as cadeias de aplicação

A definição dos produtos-alvo estabelece a especificação de pureza e a escala de produção. Nesse contexto, sugere-se uma priorização de grupo de produtos para o refino brasileiro na Tabela 11.3. O grupo La + Ce aparece associado a catalisadores, polimento e vidros. Já os grupos Pr + Nd, Tb e Dy ocupam posição de relevância em razão de sua vinculação à cadeia de ímãs permanentes e ligas magnéticas. Além disso, podem ser incorporados grupos como Sm + Eu + Gd + Y para aplicações específicas, e ETR pesadas, cuja relevância estratégica é acompanhada por maior complexidade de separação e possivelmente menores demandas.

Tabela 11.7: Priorização sugestiva de produtos alvo do refino brasileiro.

Grupo de produtos	Aplicações prioritárias	Motivação	Horizonte sugerido
La + Ce	Catalisadores, polimento e vidros	Mercados conhecidos e menor complexidade relativa de entrada	Curto prazo
Pr + Nd	Ímãs permanentes e ligas magnéticas	Alta relevância industrial e conexão com política de minerais críticos	Curto a médio prazo
Tb + Dy	Ímãs de alta temperatura e aplicações estratégicas	Elevado valor, evitar desmagnetização de ímãs permanentes a quente	Médio prazo
Sm + Eu + Gd + Y	Fósforos, óptica, aplicações especiais e saúde	Nicho tecnológico com maior sofisticação e menor volume	Médio prazo
ETR pesadas	Materiais ópticos, lasers, aparelhos médicos	Elevada complexidade de separação	Longo prazo

Essa sugestão pode ser encarada como um critério de projeto para as plantas de SX. Os óxidos com horizonte sugerido de curto prazo e menor complexidade de obtenção tendem a ser mais adequados para a inicialização do refino, enquanto aqueles de maior complexidade operacional têm maior maturidade operacional e industrial.

A integração com as cadeias de aplicação decorre diretamente dessa escolha. Um produto separado só adquire valor industrial quando sua composição, pureza e regularidade são compatíveis com a etapa usuária a jusante, seja ela voltada a catalisadores, polimento, vidro, fósforos, óptica ou materiais magnéticos. Por isso, a definição dos produtos-alvo deve ser feita em articulação com os requisitos técnicos das cadeias consumidoras, e não apenas com base na viabilidade da separação.

Para o caso brasileiro, essa lógica pode favorecer uma trajetória de implementação gradual do refino, na qual haveria o início do refino com produtos de inserção mais imediata e, a partir do ganho de escala, avançar para os cortes e óxidos de maior exigência técnica.

11.8 Configurações de planta de extração por solventes

A configuração de uma planta de refino por extração por solvente depende da forma de contato entre as fases e, por consequência, do modo como o circuito responderá aos requisitos de operação, controle e manutenção. Essa relação torna a escolha da tecnologia inseparável do problema industrial a ser resolvido, razão pela qual a Tabela 11.2 apresenta, de forma sintética, as principais alternativas usadas em SX de ETR.

Tabela 11.8: Tipos de contactores em SX, vantagens e limitações (Ritcey e Ashbrook, 1979; Rydberg, 2004).

Equipamento	Vantagens	Desvantagens
Misturadores-decantadores	Boa dispersão das fases; flexibilidade operacional; operação com muitos estágios; escalonamento fácil; eficiência elevada; custo baixo.	Inventário e custo energético altos; ocupação de grande área; pode precisar de bombeamento entre estágios.
Colunas agitadas	Boa dispersão das fases; escalonamento fácil; custo intermediário; baixa ocupação de espaço.	Rendimento limitado para baixa diferença de densidade; inadequado para sistemas de alta razão de vazões
Extratores centrífugos	Baixo inventário; baixa ocupação de espaço.	Alto custo inicial e operacional; número de estágios limitado

Os misturadores-decantadores tendem a ser mais adequados quando se busca flexibilidade operacional durante o desenvolvimento da rota. As colunas agitadas e os contadores centrífugos, por sua vez, passam a ser alternativas relevantes quando a ocupação de espaço ou menor inventário de solvente se tornam atributos prioritários.

Além disso, deve-se considerar a instalação de tanques, bombas, tubulações, sistema de estocagem de solventes, instrumentação, pontos de amostragem, laboratório analítico, tratamento de efluentes e dispositivos de segurança. Todos esses itens compõem uma única arquitetura operacional, cujo desempenho depende da articulação entre a química e a engenharia de processo. Por isso, a definição da configuração está além do contato entre fases, pois envolve robustez operacional, controle analítico e compatibilidade com o arranjo industrial pretendido.

Escalabilidade industrial e estabilidade operacional

Plantas de separação por solvente operam com tolerâncias estreitas em relação à composição mineralógica do material de alimentação. Variações no perfil de impurezas, na razão entre terras raras leves, médias e pesadas e na concentração de fósforo, ferro, alumínio e radionuclídeos repercutem simultaneamente sobre seletividade de corte, rendimento global, pureza dos óxidos individuais, consumo específico de reagentes e geração de rejeitos. Não há, portanto, sentido prático em transferir, de um

depósito para outro, um circuito de SX já projetado: o ajuste à mineralogia local consome tempo, capital e iterações operacionais que costumam exceder as previsões iniciais.

O histórico internacional recente reforça essa observação. Projetos como Lynas em Kalgoorlie e Gebeng, MP Materials em Mountain Pass, Solvay em La Rochelle e Caremag (Seção 1.5.3) acumularam, em diferentes graus, intervalos de vários anos entre a operação piloto e a produção comercial em capacidade plena. Esses intervalos não são imputáveis a uma única causa: combinam ajustes hidrometalúrgicos a feedstocks reais, refinamento de circuitos de SX, qualificação analítica e adequação a requisitos regulatórios. Para o caso brasileiro, discutido a seguir, esse padrão sugere que a transição entre demonstração e operação comercial deve ser tratada como parte intrínseca do cronograma do empreendimento, e não como etapa marginal de comissionamento.

11.8.1 Discussão acerca do caso brasileiro

A definição de uma rota de SX de ETR no Brasil poderia considerar a heterogeneidade das matérias-primas disponíveis. Essa heterogeneidade afasta a ideia de uma solução única, definitiva e rígida e dá luz a ideia de uma planta multipropósito, na qual seria possível tratar licores de alimentação provenientes de diversas fontes minerais. Para ilustrar esse argumento, é interessante observar a composição dos licores de lixiviação. No primeiro caso, cita-se um licor monazítico, cujos teores relativos de lantânio, cério, praseodímio e neodímio integram cerca de 90% do total de ETR (Gupta e Krishnamurthy, 2015; Rosental, 2008). No segundo caso, evidencia-se um licor de argilas iônicas, no qual os teores de lantânio, neodímio e ítrio podem totalizar cerca de 80% do total de ETR (Gupta e Krishnamurthy, 2015). Há de se perceber que a variabilidade de composição deve ser endereçada de forma distinta durante a fase de projeto dos circuitos de SX. Nesse sentido, uma planta multipropósito pode ser capaz de atender ambas as demandas.

Outro ponto de destaque é a presença de impurezas e coprodutos, cuja remoção afeta simultaneamente a viabilidade ambiental, a complexidade operacional e o custo global da purificação. A escolha da rota, portanto, não depende apenas da separação desejada entre ETR, mas também do esforço necessário para estabilizar e qualificar o licor de alimentação.

O critério seguinte poderia ser o produto pretendido. Por exemplo, a produção de Pr + Nd, Tb e Dy para ímãs permanentes responde a uma demanda diferente daquela associada à produção de La + Ce para catalisadores e polimento de vidros. Essa diferença mostra que a rota não deve ser desenhada apenas para maximizar recuperação metalúrgica, mas para produzir também materiais compatíveis com especificações comerciais e usos industriais definidos.

11.8.2 Institutos, laboratórios e empresas com atuação em separação de terras raras no Brasil e seus principais resultados

No caso brasileiro, há uma base histórica relevante, formada inicialmente por empresas ligadas ao processamento da monazita e, em período mais recente, por institutos de pesquisa e centros tecnológicos que desenvolveram competências em extração por solvente, troca iônica, precipitação seletiva. Entretanto, a evidência pública disponível indica que a maior parte dessas competências permanece concentrada em escala laboratorial, piloto ou de demonstração, sem consolidação ampla de uma

capacidade industrial contínua de separação individual comparável à observada em países líderes do setor (USP, [s.d.]).

O levantamento a seguir reúne as instituições, laboratórios e empresas brasileiras que possuem uma atuação consistente em separação de terras raras. O texto privilegia resultados concretos, tais como patente, operação piloto, demonstração semi-industrial, produtos obtidos, linhas de pesquisa consolidadas e infraestrutura dedicada. Foram evitadas inclusões de atores cuja atuação pública esteja restrita apenas à mineração, à concentração mineral ou ao uso de terras raras em materiais, sem indicação clara de pesquisa ou desenvolvimento tecnológico na etapa de separação química.

Orquima, Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear, Nuclemon e INB.

A Empresa Orquima (Indústrias Químicas Reunidas S/A, localizada na cidade de São Paulo) foi pioneira no país não apenas no processamento da monazita, mas também na separação dos elementos de terras raras. Na Usina Santo Amaro, na cidade de São Paulo (USAM), operou o tratamento químico da monazita com padrões tecnológicos avançados para a época, com fabricação de produtos de alta qualidade, forte ênfase em pesquisa e desenvolvimento e formação de pessoal técnico especializado. A primeira verticalização mais clara da cadeia ocorreu em 1989, já na fase Nuclemon, com a implantação da Usina de Interlago (USIN), que passou a processar o cloreto de terras raras proveniente do tratamento químico da monazita para produzir as frações leves e médias + pesadas pelo processo de extração por solvente com *know-how* japonês. Simultaneamente, à implantação da USIN foi inaugurada uma unidade de separação de terras raras na USAM que ampliou em escala industrial a produção de hidróxidos e óxidos de cério e de solução de cloreto de lantânio. Em seguida, no fim de 1990, foi iniciado com o Instituto de Energia Nuclear (IEN/CNEN) o desenvolvimento do processo para obtenção de óxidos individuais de alta pureza, culminando na implantação da Unidade de Demonstração de Extração por Solventes, em Buena/RJ (UDES) em 1992/1993, unidade que operou de novembro de 1993 a outubro de 1996 e demonstrou, em escala semi-industrial, a consolidação tecnológica da SX para separação individual de terras raras. Em 1997, o desenvolvimento foi retomado em escala piloto com foco nas terras raras leves, sendo o estudo concluído (Rosental, 2008).

Na fase INB (Indústrias Nucleares do Brasil), o estudo para substituição da USAM foi reiniciado em 1996, e a unidade de Caldas foi montada em 1997 para abertura de monazita e produção de hidróxido de cério e cloreto de lantânio; embora a planta tenha ficado pronta para pré-operação em janeiro de 1999, a operação experimental só ocorreu em julho de 2004, após autorização ambiental, e nessa campanha foram processadas aproximadamente 300 toneladas de monazita. Apesar de os resultados acumulados indicarem êxito tecnológico na etapa de separação por SX e no domínio de rotas de maior valor agregado, essa trajetória não se converteu em produção industrial contínua e competitiva. Entre os principais fatores para o insucesso destacam-se a estagnação de P&D e os baixos investimentos no período pós-Orquima, a falta de atualização e treinamento das equipes, deficiências de engenharia, obsolescência das unidades, a paralisação industrial de 1992 em São Paulo, os entraves associados ao licenciamento ambiental e nuclear em plantas com materiais radioativos, a necessidade de gestão de rejeitos radioativos e, por fim, a baixa viabilidade econômica diante da forte pressão competitiva internacional, especialmente com a oferta chinesa a preços muito inferiores desde o final da década de 1980 (INB, 2012; Rosental, 2008).

Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM)

Outro exemplo brasileiro de processamento e separação de terras raras foi o da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) localizada no complexo de Araxá (MG) onde esses elementos ocorrem sobretudo na monazita presente no minério intemperizado explorado pela companhia, historicamente voltada à cadeia do nióbio. A atuação da empresa não se restringiu à recuperação mineral, mas avançou para o desenvolvimento de uma rota integrada de produção de intermediários de terras raras a partir do rejeito da planta de concentração de pirocloro, com obtenção de concentrado, sulfato duplo e hidróxido de terras raras, etapa que serviu de base para o refino subsequente. Do ponto de vista tecnológico, o aspecto mais relevante foi a implantação de uma planta-piloto de separação no Centro de Pesquisa Hidrometalúrgico, com área de 2.500 m² e capacidade de 6 a 8 t OTR/ano em regime de testes, na qual a separação foi realizada a remoção prévia de cério e dois circuitos de extração por solventes: um destinado ao agrupamento de terras raras médias e pesadas e outro voltado à separação entre lantânio e didímio (CBMM, 2015). Essa infraestrutura permitiu obter óxidos de lantânio, cério, didímio e de terras raras médias e pesadas com teores reportados entre 98% e 99,9%, evidenciando um domínio tecnológico expressivo da etapa de separação em escala piloto no país (CBMM, 2015; IPT, 2016, 2022).

O encerramento das operações da CBMM relacionadas com terras raras ocorreu em algum momento posterior a 2016. A CBMM concluiu que a operação em Araxá não apresentava viabilidade comercial e, por isso, não deu continuidade ao projeto.

É notável destacar que a CBMM em colaboração com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) participou do desenvolvimento da tecnologia de redução do óxido de didímio a didímio metálico e obteve os primeiros 100 gramas de didímio metálico produzidos no Brasil. Seu papel é relevante porque demonstra a transformação de um produto separado quimicamente em insumo metálico para ímãs permanentes, contribuindo para o fechamento da cadeia de valor.

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)

O Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares possui tradição histórica em pesquisa com terras raras desde a década de 1960 e figura entre os principais institutos brasileiros com competência em separação.

Os estudos brasileiros em terras raras, com ênfase no fracionamento e na separação, desenvolveram-se a partir de uma base industrial associada ao processamento da monazita e evoluíram para atividades mais sofisticadas de obtenção de frações enriquecidas e de lantanídeos individuais de elevada pureza. Os trabalhos pioneiros conduzidos por P. Krumholz e colaboradores, no âmbito da Orquima S/A, consolidaram no país uma metodologia de separação que utiliza as diferenças de basicidade entre os elementos terras raras (Abrão, 1994). Nesse contexto, foram exploradas rotas de precipitação fracionada de sais básicos e hidróxidos, com destaque para a separação de lantânio livre de cério por precipitação com amônia ou hidróxido de amônio, procedimento considerado conveniente para aplicação em escala industrial.

A Orquima também desenvolveu trabalhos com troca iônica em resinas catiônicas e EDTA como eluente, inclusive para a separação de ítrio e terras raras pesadas, e explorou ainda métodos fundados em mudanças de valência, notadamente para a separação de cério, európio, samário e itérbio, tornando o Brasil pioneiro na produção de óxido de európio de elevada pureza em escala de centenas de quilogramas (Abrão, 1994).

Com a incorporação das instalações da Orquima à Administração da Produção da Monazita (APM), vinculada à CNEN, houve continuidade e ampliação das atividades de fracionamento químico das terras raras. A APM deu prosseguimento aos estudos para obtenção de concentrados ricos em cério, lantânio e didímio, além de desenvolver investigações sobre o aproveitamento de monazitas de outras origens, como a goianita, e de frações de xenotima associadas à monazita (Abrão, 1994). Desse esforço resultaram diversos concentrados comerciais, identificados por seus teores aproximados, tais como La-95, La-98,5, La-99,5, La-99,88, Di-45, Di-50, Di-80, Sm-15, Sm-45, Ce-97, Gd-20 e Y-75, o que evidencia uma capacidade nacional relevante de fracionamento em escala pré-industrial e industrial. Posteriormente, sob a Nuclemon, o país avançou para a aplicação de extração por solventes em baterias de misturadores-decantadores, possibilitando a produção de dois concentrados industriais, um de terras raras leves e outro de terras raras pesadas, a partir de cloretos mistos de terras raras. Esse marco é especialmente relevante porque representa a transição de rotas baseadas predominantemente em precipitação e cristalização para operações contínuas de separação líquido-líquido, mais compatíveis com cadeias produtivas de maior valor agregado (Abrão, 1994).

No campo da pesquisa científica e tecnológica, o IPEN destacou-se como a principal instituição brasileira na sistematização de rotas para o refino e a separação individual de lantanídeos. O instituto acumulou longa experiência em separações em grupo e individuais utilizando precipitação fracionada, precipitação homogênea, extração por solventes e cromatografia de troca iônica, partindo, em geral, dos concentrados de cloretos mistos produzidos pela Nuclemon (Abrão, 1994). O trabalho sistemático do IPEN orientou-se para a obtenção inicial de frações enriquecidas por técnicas químicas mais simples, seguida pelo refino final por cromatografia, especialmente por troca iônica. Cabe ressaltar o desenvolvimento, no IPEN, de uma linha de pesquisa inovadora voltada à purificação cromatográfica em resinas sem o uso de íon de retenção, apresentando-se como uma alternativa economicamente promissora. Como resultado, o IPEN já dispunha de tecnologia para a obtenção de óxidos puros de lantânio, cério, praseodímio, neodímio, samário e gadolínio, demonstrando domínio não apenas do fracionamento grosseiro, mas também da separação fina de elementos individuais (Abrão, 1994).

Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN)

O Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) é uma das instituições brasileiras com trajetória mais consistente em terras raras, especialmente na interface entre hidrometalurgia, separação química e materiais magnéticos. O centro possui linhas de P&D voltadas à separação e purificação de elementos terras raras, com o objetivo de obter elementos individuais de elevada pureza e dominar uma tecnologia hoje concentrada em poucos países. No campo de separação, o CDTN destaca infraestrutura e experiência em extração por solventes e resinas de troca iônica. O centro possui laboratório piloto moderno de extração por solvente e resina de troca iônica (Amaral e Moraes, 2010; Felipe et al., 2021). Em material institucional recente, o centro afirma possuir laboratório piloto moderno de extração por solvente e resina de troca iônica e informa que já desenvolveu processos de separação para várias empresas mineradoras (CDTN, [s.d.]). Isso é relevante porque mostra não apenas atuação acadêmica, mas também capacidade de transposição para demandas tecnológicas da cadeia mineral.

Universidade de São Paulo (USP)

A Universidade de São Paulo aparece no cenário brasileiro não apenas como articuladora institucional da cadeia de terras raras, mas também como geradora de soluções alternativas de separação. Reportagem do Jornal da USP registra que grupos da universidade obtiveram resultados promissores com um método de separação não poluente baseado em nanotecnologia. Tal resultado é detalhado em tese defendida na instituição, na qual se descreve a chamada Nanohidrometalurgia Magnética, uma tecnologia alternativa de caráter mais verde, baseada em nanopartículas super paramagnéticas funcionalizadas para sequestrar elementos estratégicos a partir de solução lixiviada (Almeida, 2019; USP, [s.d.]).

Embora essa rota não corresponda ao arranjo industrial clássico de separação por extração por solvente, ela representa contribuição científica relevante ao propor uma alternativa para captura e separação de lantanídeos sem dependência direta de solventes orgânicos convencionais. Além disso, a USP coordenou o INCT PATRIA, iniciativa voltada ao domínio de toda a cadeia produtiva de ímãs de terras raras, o que lhe conferiu papel de liderança na articulação nacional entre mineração, separação, metalurgia e aplicações. Assim, seu principal resultado específico em separação está associado ao desenvolvimento de rotas inovadoras e de menor impacto ambiental, em escala de pesquisa (Almeida, 2019; USP, [s.d.]).

Centro de Tecnologia Mineral (CETEM)

Atualmente, o CETEM representa o exemplo público mais proeminente de desenvolvimento nacional de tecnologia para a separação de terras raras via extração por solvente com foco industrial. Essa trajetória iniciou-se em 1989, com a criação da Câmara Setorial de Terras Raras pelo CETEM/CNPq. Tal entidade congregou empresas, institutos e centros de pesquisa para debater os aspectos técnicos e econômicos do setor. Como desdobramento das ações da Câmara, que estabeleceu planos estratégicos integrando academia e indústria, pesquisadores do CETEM realizaram intercâmbios e visitas a grupos de pesquisa líderes na China e na Itália.

Mais recentemente, o CETEM tem participação relevante na estruturação da agenda brasileira de P&D em terras raras, atuando em projetos voltados ao domínio tecnológico do processamento e refino desses elementos. No PROTERRARAS (2013–2017), coordenou ações para modernizar a tecnologia nacional de processamento de ETR, desde a caracterização e o beneficiamento mineral até a hidrometalurgia e o aproveitamento de resíduos. Também integrou o Projeto REGINA (2017–2020), um projeto de cooperação Brasil–Alemanha, para o desenvolvimento de rotas sustentáveis de produção de óxidos de terras raras, e participa do REGINA II, a partir de 2024. Além disso, participou e participa dos Institutos Nacionais de Tecnologia (INCTs) PATRIA, Terras Raras e MATERIA, nos quais desenvolveu e desenvolve atividades de PD&I relacionadas com caracterização tecnológica de depósitos, processamento mineral e metalurgia extrativa de terras raras. Do mesmo modo, o CETEM integra o projeto MagBras – Demonstrador Industrial do Ciclo Completo de Produção Brasileira de Ímãs Permanentes de Terras Raras –, reforçando sua atuação estratégica na consolidação de competências nacionais em processamento, refino, sustentabilidade e articulação da cadeia produtiva de ETR no Brasil.

Em 2023, o Centro informou a concessão de carta-patente, pelo INPI, para o processo contínuo de separação de terras raras leves de sua autoria (Vera et al., 2022). Segundo a descrição institucional, a invenção refere-se a um processo contínuo para separar lantânio do didímio, em solução aquosa ácida de

cloreto de terras raras leves, empregando a técnica de extração por solvente em temperatura ambiente e em meio ácido. Trata-se de um resultado particularmente relevante porque ultrapassa a condição de estudo exploratório e consolida propriedade intelectual sobre uma rota de separação específica (CETEM, [s.d.]; Vera et al., 2022).

Além da patente concedida, o CETEM registrou em 2024 a seleção do projeto intitulado Implementação de uma planta piloto de separação de terras raras magnéticas no âmbito do Desafio Nacional GRANIOTER-MCTI (CETEM, 2024). Esse marco é importante porque demonstra a transição da competência científica para uma etapa de demonstração tecnológica mais avançada, orientada para a separação de elementos de maior valor agregado na cadeia de ímãs permanentes. Além disso, o CETEM participa do esforço nacional mais amplo de refino de terras raras, tanto a partir de fontes minerais quanto de materiais reaproveitados. Dessa forma, os principais resultados públicos do CETEM podem ser sintetizados em três frentes: geração de propriedade intelectual, desenvolvimento de rotas por extração por solvente e avanço rumo à escala piloto contínua (Dourado et al., 2023).

11.9 Gargalos tecnológicos, econômicos, regulatórios e ambientais

Nota elucidativa — Intensidade energética e dependência química da cadeia

O refino de terras raras articula etapas hidrometalúrgicas e térmicas — lixiviação, precipitação, extração por solvente, calcinação e metalurgia redutora — cuja viabilidade industrial depende menos do domínio isolado de uma operação unitária do que da articulação entre energia, logística de reagentes, consumo de água e transporte de cargas químicas. O custo conjunto desses fatores responde por parcela substancial do OPEX e, em plantas operadas fora da China, costuma definir o diferencial competitivo do empreendimento.

Para o Brasil, essa estrutura de custos abre uma janela específica de competitividade: a integração de plantas de refino a fontes de energia renovável já consolidadas, a polos químicos com escala de reagentes próxima e a circuitos de economia circular para recuperação de solventes e tratamento de efluentes. Esses três vetores articulam-se com os gargalos discutidos a seguir e voltam a aparecer, no Mapa do Caminho proposto na §11.10, como condicionantes da transição entre operação piloto e produção comercial.

Os gargalos do refino brasileiro podem ser agrupados em cinco conjuntos. O primeiro é tecnológico. A principal dificuldade tecnológica da separação de elementos terras raras no Brasil está na transição entre a competência científica já existente e sua consolidação em escala industrial contínua. Embora o país disponha de reservas expressivas, grupos de pesquisa qualificados e iniciativas relevantes de desenvolvimento tecnológico, ainda não há uma operação comercial plenamente estabelecida para a

separação individual dos elementos. Esse desafio decorre da própria complexidade da separação dos lantanídeos, cujas propriedades químicas são muito semelhantes, exigindo circuitos extensos de extração por solventes, elevado controle de processo, alta confiabilidade analítica e grande domínio de engenharia de fluxo contínuo.

No caso brasileiro, esse gargalo é agravado por limitações adicionais: disponibilidade ainda restrita de alimentação real em escala suficiente para validação tecnológica, variabilidade na composição do minério exige ajustes frequentes nos circuitos de separação, necessidade de purificação prévia rigorosa dos licores para remoção de impurezas e radionuclídeos, dependência externa de insumos, equipamentos e conhecimento operacional acumulado, além da dificuldade de integrar mina, concentração, separação e transformação em uma mesma estratégia industrial. Em consequência, o desafio nacional não é apenas dominar a química da separação, mas estruturar uma base produtiva capaz de operar com estabilidade, escala, competitividade e conformidade ambiental, articulando pesquisa, financiamento, formação de pessoal e política industrial.

O segundo conjunto é econômico e financeiro. O refino demanda investimento relevante, horizonte de maturação longo, escala mínima para diluir custos fixos e contratos comerciais capazes de ancorar a receita do empreendimento. Refinarias de separação, fora da China, tendem a aparecer publicamente em faixas como US\$ 75 milhões (Ucore Rare Metals), € 115–216 milhões equivalentes (REEtec/Caremag) ou algumas centenas de milhões de dólares quando entram em ETR pesados e forte apoio estatal. A Ucore Rare Metals é uma empresa de origem canadense que vem estruturando sua inserção na cadeia norte-americana de terras raras por meio do Louisiana Strategic Metals Complex, em Alexandria, Louisiana, nos Estados Unidos. A REEtec é uma empresa norueguesa cujo principal projeto está situado em Herøya, em Porsgrunn, Noruega, onde a companhia opera uma planta-demonstrativa desde 2019 e conduz a implantação de sua primeira planta industrial em escala plena. A Caremag, subsidiária industrial da empresa francesa Carester, constitui uma iniciativa voltada ao fortalecimento da cadeia europeia de terras raras por meio de uma planta de reciclagem de ímãs permanentes e refino/separação de terras raras localizada em Lacq, no sudoeste da França (Carester, 2025; REEtec, [s.d.]; Ucore, [s.d.]).

O terceiro conjunto é regulatório e institucional. Em cadeias com possibilidade de associação a radionuclídeos e geração de efluentes complexos, a previsibilidade do licenciamento é tão importante quanto a tecnologia de separação. Falhas de coordenação entre política mineral, política industrial, regulação ambiental e instrumentos de financiamento podem atrasar projetos e elevar custo de capital.

O quarto conjunto é ambiental e operacional. Ele engloba manejo de rejeitos, perdas de solvente, consumo de água, tratamento de efluentes, segurança química e eventuais passivos radiológicos.

O quinto conjunto é de mercado e coordenação. Sem uma demanda industrial minimamente organizada ou sem mecanismos de compras, padronização e parceria, uma planta de refino pode produzir materiais corretos do ponto de vista químico, porém desconectados do mercado.

Esses gargalos não devem ser tratados isoladamente. Em uma cadeia como a de terras raras, o problema de escala está conectado ao problema de mercado; o problema regulatório se conecta ao ambiental; o problema tecnológico depende da base analítica; e todos eles convergem para a necessidade de

governança. Por isso, o plano proposto neste capítulo adota a lógica de remover gargalos por camadas, articulando ações de curto, médio e longo prazos.

Outro ponto relevante é que o risco de não avançar no refino é também um gargalo estratégico. Permanecer apenas com concentrados ou óxidos mistos reduz a captura de valor, limita a influência do país nas cadeias internacionais e enfraquece o potencial de políticas industriais. Em outras palavras, o custo de inação precisa ser reconhecido explicitamente no capítulo como parte da análise de viabilidade.

11.10 Mapa do Caminho Estratégico 2026 – 2040

Portanto, a trajetória brasileira de implantação do refino poderia ser compreendida em três horizontes sucessivos, como representado na Figura 11.5. O primeiro, correspondente ao período 2026 – 2030, estaria associado à consolidação de bases técnico-operacionais, período no qual ganhariam centralidade a ampliação de ensaios de bancada e de circuito contínuo em pequena escala, a estruturação de uma planta-piloto ampliada para validação em ambiente relevante, a consolidação de protocolos analíticos e a definição da cadeia produtiva prioritária e das metas de pureza dos óxidos.

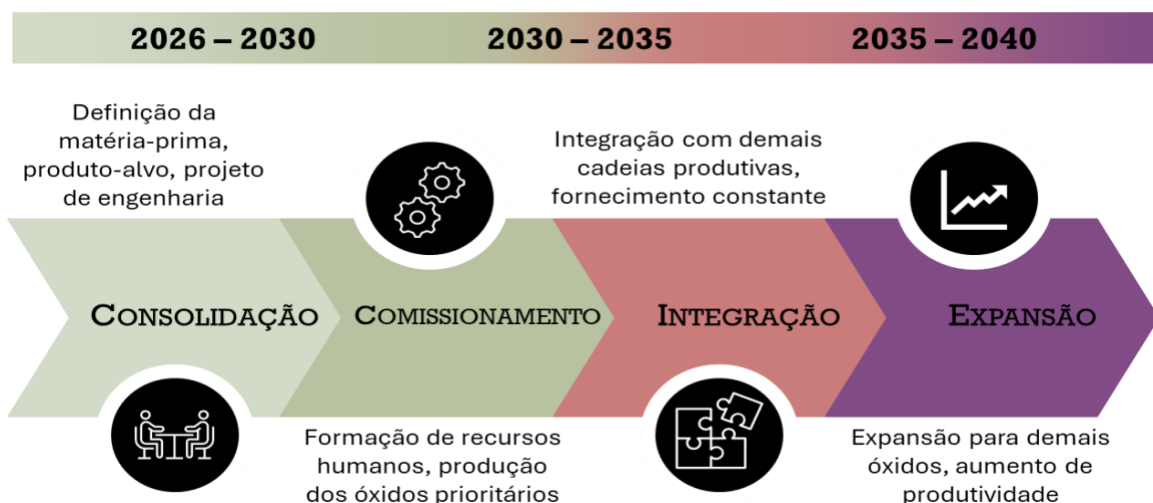


Figura 11.5: Mapa do Caminho sugestivo no horizonte 2026-2040 para o refino de ETR no Brasil.

Uma vez estabelecidas essas bases, o segundo horizonte (2030 – 2035) poderia ser orientado para a transição entre a demonstração e a operação comercial. Nessa fase, a prioridade tenderia a recair sobre a construção de unidades focadas para a produção dos óxidos prioritários, em especial aqueles relacionados ao maior valor de revenda, bem como a formação de recursos humanos e o início da integração do refino com as demais cadeias produtivas.

Por fim, o terceiro horizonte (2035 – 2040) corresponderia à etapa de expansão e produção de demais óxidos. Nesse ponto, a questão deixaria de ser apenas demonstrar a viabilidade do refino e poderia envolver a ampliação de escala, diversificação de produtos, eventual incorporação de circuitos mais

complexos, reforço de estratégias de economia circular, otimização do gasto de insumos e maior articulação com cadeias como as de ímãs permanentes, catalisadores, vidros e outras aplicações especiais.

11.11 Considerações

A discussão desenvolvida neste capítulo permite concluir que a implantação da etapa de refino de terras raras no Brasil deve ser compreendida como uma decisão estratégica de política industrial. Nas cadeias nas quais o valor econômico, tecnológico e geopolítico se concentra nos produtos separados em alta pureza, o domínio do refino passa a definir o grau de inserção do país nos segmentos de maior valor agregado. Nessa perspectiva, o refino deixa de ser apenas uma operação unitária da hidrometalurgia e se torna um articulador entre mineração e manufatura avançada.

Ao mesmo tempo, o capítulo mostra que essa implantação não depende de uma solução única nem de uma transição imediata para a escala comercial. A experiência histórica nacional, somada às limitações tecnológicas, econômicas, regulatórias, ambientais e mercadológicas identificadas, sugere que a construção desta capacidade deve ocorrer de forma progressiva, seletiva e coordenada. Isso implica partir de matérias-primas e produtos-alvo compatíveis com as capacidades já existentes, consolidar base analítica e operacional, estruturar plantas de validação em ambiente relevante e, somente a partir desse amadurecimento, avançar para unidades com maior escala e complexidade. Em outras palavras, o avanço do refino brasileiro dependerá mais da formação continuada de competência industrial, governança institucional e articulação com os mercados consumidores.

Assim, a principal conclusão do plano proposto é que o refino deve ser guiado por prioridades claras, coordenação entre atores públicos e privados e compromisso de longo prazo com a pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Apesar do país já dispor de recursos minerais, conhecimento acumulado e referências históricas que justificam esse movimento, o desafio é converter, portanto, esses ativos dispersos em capacidade produtiva efetiva.

Antes de prosseguir para as aplicações finais, é necessário introduzir um eixo transversal que percorre toda a cadeia: a sustentabilidade ambiental e a economia circular. O paradoxo é direto — terras raras são insumos da transição energética, mas sua extração e processamento envolvem impactos ambientais e sociais significativos. O capítulo seguinte discute como gerir esse paradoxo no contexto brasileiro e por que a circularidade deixa de ser uma opção para se tornar um requisito estrutural de acesso aos mercados ocidentais de maior valor.

Capítulo 12

Eixos estratégicos, prazos e instrumentos

A articulação operacional da estratégia organiza-se em oito eixos interdependentes, três horizontes temporais e seis famílias de instrumentos de política pública. Os eixos cobrem a totalidade da cadeia produtiva — da expansão da base mineral à inserção internacional — e incorporam as funções transversais de ciência e tecnologia, sustentabilidade, governança e diplomacia econômica. Os horizontes organizam a sequência de ativação dos eixos: fundações no curto prazo, escalonamento no médio e consolidação no longo. Os instrumentos compõem o ferramental disponível ao Estado para induzir, financiar, regulamentar e coordenar a execução.

12.1 Os oito eixos estratégicos

O primeiro eixo é a expansão e qualificação da base mineral. Seu objetivo é converter recursos em reservas e em produção, intensificando a pesquisa geológica, apoiando projetos avançados em curso (Serra Verde, Araxá, Caldas, Goiás), atraindo investimento privado qualificado para produção mineral e melhorando a infraestrutura logística e energética de suporte. O resultado esperado é o aumento da produção nacional com redução do risco exploratório.

O segundo eixo é o desenvolvimento do midstream — a etapa de separação e refino. Seu objetivo é criar capacidade nacional contínua, por meio de plantas-piloto e demonstradores, incentivos à implantação de plantas industriais, transferência tecnológica internacional e formação de competências e mão de obra especializada. O resultado esperado é a redução da dependência externa e o domínio dos gargalos estratégicos que habilitam todas as cadeias a jusante.

O terceiro eixo cobre metalurgia, ligas e ímãs permanentes. O objetivo é avançar para etapas de maior valor agregado, desenvolvendo a produção de metais de terras raras, criando capacidade nacional de ligas (Nd-Fe-B, Sm-Co, outras), implantando indústria nacional de ímãs permanentes e estimulando parcerias industriais e joint ventures. O resultado esperado é a inserção em cadeias industriais estratégicas — energia eólica, mobilidade elétrica, defesa, eletrônicos, aeroespacial.

O quarto eixo é a integração com cadeias industriais usuárias. Conecta a produção mineral e o refino à indústria nacional, articulando setores automotivo, energia, defesa, eletrônicos e demais; viabilizando encomendas tecnológicas e compras públicas inovadoras; instituindo política de conteúdo local estratégico; e organizando plataformas setoriais de inovação. O resultado esperado é a criação de demanda doméstica estruturante e a redução das vulnerabilidades de mercado.

O quinto eixo é ciência, tecnologia e inovação. Visa elevar a maturidade tecnológica (TRL) da cadeia mediante o fortalecimento das ICTs — CETEM, INCTs, universidades —, a criação de plantas-piloto integradas, programas continuados de P&D aplicado e inovação disruptiva, e a capacitação ampliada de recursos humanos. O resultado esperado é a transição efetiva da pesquisa para a escala industrial.

O sexto eixo é sustentabilidade e economia circular. Trata a competitividade ambiental como atributo constitutivo da estratégia, operacionalizado por tecnologias de processamento limpo e eficiente; reciclagem de ímãs, baterias e resíduos industriais; gestão responsável de rejeitos e efluentes; e certificações e rastreabilidade socioambiental. O resultado esperado é a vantagem competitiva em mercados regidos por critérios ESG e a estruturação efetiva da economia circular do setor.

O sétimo eixo é governança e coordenação estratégica. Integra atores públicos e privados em uma agenda comum por meio da criação de coordenação interministerial específica para terras raras, da plataforma nacional de diálogo e integração da cadeia, do monitoramento estratégico e da inteligência de mercado, e do marco regulatório com segurança jurídica. O resultado esperado é a coordenação efetiva entre políticas e a estabilização do ambiente decisório, condição para atração de investimento e gestão eficiente.

O oitavo eixo é a inserção internacional e a política externa. Posiciona o Brasil em cadeias globais estratégicas por meio de parcerias com EUA, União Europeia, Japão, Coreia do Sul, Austrália e Índia; participação em alianças e iniciativas multilaterais de minerais críticos; acordos de offtake e cooperação tecnológica; e promoção comercial articulada à diplomacia econômica. O resultado esperado é a integração efetiva em cadeias globais confiáveis e diversificadas, sem dependência exclusiva de qualquer polo.

12.2 Sequência por horizonte

O horizonte de curto prazo (H1, 2026–2030) prioriza fundações institucionais e ativação dos elos críticos. As ações estruturantes incluem marco regulatório específico, coordenação política de alto nível, instrumentos de financiamento e mitigação de risco, programa emergencial de formação de recursos humanos, rastreabilidade e certificação, produção de dados ambientais específicos dos depósitos nacionais, conversão de recursos em reservas, beneficiamento competitivo e desenho operacional das primeiras plantas-piloto de separação. O eixo de separação e refino concentra a decisão estratégica central deste horizonte: sem ativação efetiva nesse período, os horizontes seguintes ficam comprometidos.

O horizonte de médio prazo (H2, 2031–2035) executa o escalonamento. A estratégia transita do estágio preparatório para operação comercial, com ao menos uma planta nacional de separação e refino em operação, integração efetiva com cadeias a jusante, plantas-piloto e semicomerciais para ligas, catalisadores e ímãs, e conversão de demonstradores em atividade empresarial sustentada. Os instrumentos de encomenda pública, redução de risco e financiamento de longo prazo são decisivos neste horizonte: a transição do laboratório para a indústria não ocorrerá por espontaneidade de mercado.

O horizonte de longo prazo (H3, 2036–2040) consolida posição competitiva. A meta passa de "ter plantas" para "definir posição global". Inclui produção nacional de ímãs em escala industrial, atendimento progressivo da demanda doméstica em todas as cadeias ativadas, inserção internacional com produtos de maior valor agregado, consolidação do polo catalítico integrado a insumos nacionais, aproveitamento intensificado da economia circular e presença efetiva em cadeias tecnológicas avançadas. O horizonte é simultaneamente industrial e tecnológico — não se confunde com política mineral de curto prazo.

12.3 Instrumentos de política pública

Os instrumentos disponíveis ao Estado organizam-se em seis famílias complementares.

- i) Instrumentos financeiros — BNDES, FINEP, fundos de inovação, crédito direcionado, investimento de longo prazo, eventuais pisos de preço — sustentam o ciclo de capital paciente que a cadeia requer.
- ii) Instrumentos regulatórios — licenciamento ágil, segurança jurídica, marco específico para minerais críticos, desburocratização — estabilizam o ambiente decisório.
- iii) Instrumentos tecnológicos — encomendas tecnológicas, plantas-piloto de demonstração, centros de excelência — articulam ciência e indústria.
- iv) Instrumentos industriais — conteúdo local estratégico e incentivo à implantação (CAPEX) — induzem investimento privado em direção aos elos prioritários.
- v) Instrumentos territoriais — zonas industriais e clusters tecnológicos, verticalização da cadeia — articulam capacidade produtiva e inovação.
- vi) Instrumentos internacionais — acordos bilaterais, mapeamento de riscos geopolíticos, alianças estratégicas, diplomacia econômica — posicionam o País nas cadeias globais sem submissão a qualquer polo.

Nenhum dos instrumentos apresentados, isoladamente, mostrou-se suficiente para desenvolver cadeias nacionais de terras raras. A experiência internacional indica que resultados consistentes decorrem da combinação coordenada de instrumentos regulatórios, tecnológicos, financeiros e industriais.

12.4 Fatores críticos de sucesso

A execução articulada dos oito eixos estratégicos, distribuídos ao longo dos três horizontes temporais e apoiados pelo conjunto de instrumentos disponíveis, está associada a cinco fatores críticos de sucesso identificados a partir da análise das experiências internacionais e das características da cadeia de terras raras. O primeiro refere-se à previsibilidade dos investimentos de longo prazo, elemento que contribui para a mobilização de recursos públicos e privados em iniciativas cujos ciclos de maturação frequentemente ultrapassam períodos governamentais. O segundo diz respeito à coordenação entre governo, setor produtivo, instituições de ciência, tecnologia e inovação e demais atores relevantes, condição observada de forma recorrente nos países que avançaram na consolidação de cadeias estratégicas. O terceiro está relacionado ao desenvolvimento contínuo de competências e à formação de recursos humanos especializados, em escala compatível com os objetivos industriais e tecnológicos estabelecidos. O quarto envolve a busca por escala produtiva e competitividade internacional, de modo a favorecer a sustentabilidade econômica dos empreendimentos e sua inserção em mercados globais. Por fim, o quinto fator corresponde à incorporação da sustentabilidade e da responsabilidade socioambiental como elementos estruturantes da estratégia, em consonância com as crescentes exigências de investidores, mercados consumidores e marcos regulatórios.

As experiências internacionais analisadas indicam que nenhum desses fatores atua isoladamente. Diferentes países têm adotado combinações de instrumentos regulatórios, tecnológicos, financeiros e industriais, bem como mecanismos de mitigação de riscos para viabilizar investimentos intensivos em capital, promover a coordenação entre Estado, empresas e instituições de pesquisa e acelerar a construção de capacidades produtivas e tecnológicas ao longo da cadeia de valor das terras raras.

Capítulo 13

Acontecimentos recentes e impactos sobre a estratégia

Os capítulos anteriores foram redigidos ao longo de 2025 e início de 2026, com base no quadro institucional e nas condições de mercado vigentes naquele período, no qual este documento estava sendo elaborado. Entre 20 de abril e 5 de maio de 2026, três acontecimentos modificaram materialmente o quadro de referência: a aquisição da Mineração Serra Verde por empresa norte-americana, o veto presidencial aos dois projetos de lei de criação da TerraBras e a entrada em vigor provisória do Acordo Mercosul–União Europeia. Os três eventos não invalidam a estratégia formulada nos capítulos anteriores; alteram, contudo, o quadro no qual ela será executada. Este capítulo consolida a leitura analítica desses acontecimentos e identifica os ajustes necessários nas frentes de implementação.

13.1 Aquisição da Mineração Serra Verde (20 de abril de 2026)

Em 20 de abril de 2026, foi anunciada a aquisição da Mineração Serra Verde, operadora da Mina Pela Ema em Minaçu (GO), por empresa norte-americana listada na Nasdaq e apoiada por agências do governo dos Estados Unidos. O valor declarado da operação foi de US\$ 2,8 bilhões. A transação amarra a produção da Fase 1 da mina a contrato de offtake de quinze anos com veículo de propósito específico capitalizado por agências governamentais norte-americanas e investidores privados, com pisos de preço para neodímio e praseodímio. A operação consolida, na prática, um dos poucos depósitos de argilas iônicas em escala produtiva fora da Ásia em cadeia integrada sob coordenação estratégica do governo dos Estados Unidos.

Para a estratégia consolidada nos capítulos anteriores, o evento tem três implicações diretas. A primeira é que um dos projetos centrais listados no Quadro A.4.1 — a operação Serra Verde — passa a operar sob coordenação estratégica externa, com a produção comprometida em contrato de longo prazo. O Brasil mantém soberania sobre o recurso geológico (preservada pelo regime constitucional de propriedade da União sobre os minerais), mas perde, no curto prazo, a possibilidade de articular a produção dessa mina a um esforço doméstico de agregação de valor. A segunda implicação é que a janela para implantação do elo nacional de separação e refino se estreita: parte significativa do feedstock potencialmente disponível para uma planta doméstica passa a estar contratada externamente. A terceira implicação é simbólica e política: o evento expõe, com nitidez, a consequência prática da ausência de instrumentos institucionais capazes de articular decisões setoriais em tempo compatível com a velocidade do mercado de minerais críticos.

Os ajustes operacionais recomendados são três. O primeiro é a diversificação ativa da base de feedstock para o elo nacional de separação e refino, articulando o aproveitamento de monazita associada aos rejeitos de nióbio em Araxá, os projetos de argilas iônicas em Caldas e adjacências, e os concentrados de outras operações em estágios avançados de desenvolvimento. A diversidade de fontes reduz a dependência de qualquer projeto isolado e fortalece a viabilidade econômica de uma planta nacional de

processamento. O segundo ajuste é a aceleração da decisão sobre o elo de separação e refino: o estreitamento da janela exige decisão estratégica no horizonte de curto prazo. O terceiro ajuste é a articulação ativa do Brasil em parcerias internacionais de minerais críticos que contemplem cooperação tecnológica e transferência de know-how, não apenas oferta de concentrado, deslocando a relação do registro de fornecedor de matéria-prima para o registro de parceiro industrial integrado.

13.2 Veto às propostas de criação da TerraBras (24 de abril de 2026)

Em 24 de abril de 2026, foi vetada formalmente, a partir do debate institucional sobre modelos de governança para minerais críticos, a criação da TerraBras, estatal proposta em dois projetos de lei distintos no Congresso Nacional. A primeira proposta previa a criação de uma empresa pública para gerir, explorar, industrializar e comercializar as reservas nacionais de terras raras; a segunda propunha a conversão do Serviço Geológico do Brasil em estatal com essas atribuições. O veto encerrou, no plano legislativo imediato, o debate sobre a constituição de uma empresa estatal específica para a cadeia.

Para a estratégia consolidada nos capítulos anteriores, o veto não altera o diagnóstico nem os direcionadores — que não dependem da existência de empresa estatal específica —, mas redefine o conjunto de instrumentos institucionais disponíveis. Os capítulos do Bloco III tratam a coordenação estatal como função institucional necessária; essa função pode ser exercida por diferentes arranjos — empresa estatal específica, agência reguladora, conselho interministerial com secretaria executiva, fundo soberano setorial. O veto fecha uma das rotas institucionais; preserva, contudo, as demais. A questão de fundo permanece: como o País organizará, sem o instrumento estatal específico, a função de coordenação que a cadeia requer.

Três rotas institucionais alternativas merecem consideração explícita. A primeira é o modelo de hub de processamento por encomenda — arquitetura societária mista, com participação proporcional de governo (via BNDESPAR ou fundos públicos), capital privado nacional (consumidores industriais e produtores de matéria-prima) e capital internacional (mineradoras operando no País e parceiros tecnológicos). O modelo opera por tarifa de processamento sem aquisição da propriedade do mineral, alinha interesses de produtores domésticos e estrangeiros já estabelecidos e oferece via concreta de integração do País a cadeias ocidentais de redução de risco, ao mesmo tempo em que sustenta capacidade industrial nacional. A segunda rota é a consolidação institucional de uma coordenação interministerial permanente para minerais críticos, com mandato técnico, secretaria executiva e instrumentos próprios de financiamento e regulamentação. A terceira é a constituição de fundo soberano setorial específico, com governança técnica e horizonte de capital paciente, capaz de aportar capital de risco em plantas-piloto, demonstradores e primeiras plantas industriais.

As três rotas são complementares, não alternativas. A ausência da TerraBras como entidade operacional única não dispensa qualquer das três; ao contrário, torna-as conjuntamente necessárias para preencher a função institucional que a empresa estatal cumpriria. O ajuste operacional recomendado é a definição, no horizonte de curto prazo, do arranjo institucional concreto que articulará coordenação, financiamento e indução industrial. O risco a evitar é o vácuo institucional — situação em que a ausência de um instrumento específico é tratada como ausência de necessidade de coordenação.

13.3 Entrada em vigor do Acordo Mercosul–União Europeia (1º de maio de 2026)

Em 1º de maio de 2026, entrou em vigor provisoriamente o Acordo Mercosul–União Europeia, criando uma área de livre comércio com aproximadamente 720 milhões de consumidores e PIB superior a US\$ 22 trilhões. O acordo prevê desgravação tarifária escalonada e inclui dispositivos sobre transferência de tecnologia, compras governamentais, sustentabilidade, proteção de micro e pequenas empresas e regiões geográficas específicas. Para a cadeia de terras raras, o acordo abre janela de exportação para mercado consumidor qualificado, alinhado a critérios ESG e em busca ativa de diversificação de fontes de suprimento fora da China.

Para a estratégia consolidada, o acordo reforça três frentes previamente identificadas. A primeira é a vantagem comparativa brasileira em sustentabilidade — matriz elétrica predominantemente renovável, depósitos de argila iônica com radioatividade menor que outras tipologias mineralógicas, capacidade técnica de implementar rastreabilidade e certificação. A segunda é o valor estratégico de diversificar mercados, reduzindo a dependência de qualquer comprador isolado. A terceira é a oportunidade concreta de negociar transferência tecnológica e cooperação industrial no âmbito de capítulos específicos do acordo, particularmente em compras governamentais e em sustentabilidade.

Os ajustes operacionais recomendados são três. O primeiro é vincular efetivamente a agenda de terras raras à Nova Indústria Brasil, identificando os segmentos da cadeia que se beneficiam diretamente das condições do acordo e construindo, com o setor produtivo, as estruturas de oferta que respondam à demanda europeia qualificada. O segundo é articular o regime tributário especial em estudo para refino de minerais críticos — com créditos tributários proporcionais à agregação de valor — com os dispositivos do acordo que premiam produção sustentável e industrialização local. O terceiro é mobilizar os instrumentos de promoção comercial e diplomacia econômica para posicionar o País como parceiro preferencial da União Europeia em minerais críticos, capitalizando a janela de diversificação aberta pela política europeia de redução de risco.

O acordo pode alterar condições de acesso a mercados, investimentos e requisitos regulatórios relevantes para a cadeia.

13.4 Aprovação do PL 2780/2024 na Câmara dos Deputados (6 de maio de 2026)

Em 6 de maio de 2026, a Câmara dos Deputados aprovou o Projeto de Lei 2780/2024, que institui a Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (PNMCE) e cria o Comitê de Minerais Críticos e Estratégicos (CMCE), vinculado ao Conselho Nacional de Política Mineral (CNPM). A proposta segue na edição final deste documento (Junho/2026) para apreciação pelo Senado Federal.

Do ponto de vista da estratégia formulada nos capítulos anteriores deste estudo, a aprovação do PL 2780/2024 representa o primeiro avanço legislativo substancial desde o início da janela estratégica aqui identificada — e também o primeiro teste empírico de quão próximos o Congresso Nacional e o Executivo

chegaram, na prática, das recomendações de política pública sintetizadas no Roadmap Estratégico (Capítulo 3). O resultado é ambivalente: o PL entrega instrumentos que eram inexistentes e eram urgentes; ao mesmo tempo, deixa abertas algumas questões importantes cuja resolução são condições de competitividade e acesso aos mercados de maior valor. No momento de fechamento deste documento, o PL encontrava-se em debate no Senado, com recomendações de alteração no texto.

13.6 Síntese: a janela operacional dos próximos 24 meses

Os quatro acontecimentos, lidos em conjunto, definem uma janela operacional concentrada nos próximos vinte e quatro meses. A aquisição da Serra Verde reduz a margem de tempo para implantação do elo nacional de separação e refino, ao subtrair feedstock potencial. O veto à TerraBras subtraiu a rota legislativa de constituição de entidade operacional com mandato de offtake soberano, transferindo essa função para arranjos institucionais alternativos que permanecem por definir. O Acordo Mercosul–União Europeia abre janela de mercado qualificada para produtos industrializados — não para concentrado mineral — em horizonte compatível com a transição tecnológica dos parceiros europeus. A aprovação do PL 2780/2024, consolidada no PL 2.840/2024 sob exame do Senado, produz o primeiro marco legal específico do setor, com arquitetura institucional mais densa do que a proposição original — CIMCE vinculado à Presidência, mecanismo de triagem societária, sistema obrigatório de rastreabilidade —, mas mantém em aberto as duas lacunas estruturais identificadas no Roadmap: o floor price soberano para terras raras pesadas e a função operacional de offtake.

A combinação dos quatro eventos não compromete a viabilidade da estratégia consolidada; intensifica, contudo, a exigência de execução. O vácuo institucional diagnosticado nas seções anteriores deixou de ser pleno e tornou-se parcial: as funções de coordenação, escrutínio societário e rastreabilidade ganharam ancoragem legal; permanecem sem instrumento as funções de proteção da renda mineral e de presença pública na ponta comercial da cadeia. Os instrumentos identificados nos capítulos anteriores — coordenação interministerial, financiamento de longo prazo, encomenda industrial, segurança jurídica, rastreabilidade, competência ampliada — continuam pertinentes. Sua ativação, antes tratada como prioridade do horizonte de curto prazo, torna-se condição de viabilidade no horizonte imediato. O prazo de noventa dias para instalação do CIMCE e o de cinco anos para vigência dos incentivos tributários previstos no PL 2.840/2024 deslocam o eixo crítico da decisão legislativa para a decisão regulamentar: o calendário do decreto que estruturará o conselho, das normas infralegais da rastreabilidade e da habilitação dos projetos prioritários passa a ser o cronograma operacional do biênio. O Capítulo 3 havia identificado a estreiteza da janela; os acontecimentos de abril e maio de 2026 a tornaram operacionalmente visível.

A oportunidade permanece. O País detém a segunda maior reserva mundial, dispõe de competência científica madura, conta com demanda industrial doméstica articulável e enfrenta um ambiente internacional ativamente em busca de diversificação. Conta, agora, com arcabouço legal específico cuja implementação está sob mandato presidencial e prazo definido. As condições para uma estratégia de inserção industrial efetiva — não apenas extrativista — estão dadas. A decisão deixou, em parte, de ser legislativa. Tornou-se regulamentar. E é imediata.

Capítulo 14

Síntese estratégica: do diagnóstico à teoria da mudança

Os capítulos anteriores deste bloco — Mineração (Cap. 10), Refino (Cap. 11), Eixos estratégicos (Cap. 12) e Acontecimentos recentes (Cap. 13) — desenham, em conjunto, as ações estruturantes e os instrumentos que a estratégia brasileira para terras raras requer. Este capítulo fecha o Bloco III articulando esse desenho em uma leitura conceitual única: a passagem de uma situação atual, marcada por potencial mineral relevante e capacidade industrial incipiente, para uma situação futura de inserção industrial efetiva depende de algo além da soma das ações setoriais. Depende de uma teoria da mudança — um conjunto explícito de hipóteses sobre como as ações desenhadas, articuladas no tempo e no espaço institucional, produzem o resultado pretendido.

14.1 Do diagnóstico mineral ao desenho de estratégia nacional

O processo de produção deste estudo passou, em seu trajeto, por uma inflexão metodológica decisiva. O exercício original, ainda nos moldes do estudo de 2012, organizava-se em torno de um diagnóstico técnico do setor — o que o País tem em reservas, o que a ciência nacional sabe fazer, quais cadeias produtivas a jusante são tecnologicamente acessíveis. Esse diagnóstico permanece necessário e está consolidado nos Blocos I e II e nos seis capítulos setoriais do Bloco II. Ele responde, contudo, a um conjunto de perguntas diferente do que a atualização 2026–2040 efetivamente precisa responder.

A pergunta que sustentou a atualização não foi “o que o País tem” nem “o que a ciência sabe”. Foi “como transformar conhecimento disperso e ativos minerais em capacidade nacional organizada”. Essa mudança de chave reposiciona o problema. O fundamento mais profundo do esforço coletivo dos especialistas foi deslocar o debate de um inventário mineral para uma teoria de mudança nacional: estratégia não é documento estático; capacidades não existem prontas no ponto de partida; o contexto é móvel e precisa ser lido em tempo, espaço e escala; e a liderança estratégica depende de coordenação em rede, aprendizagem contínua e atuação sob incerteza.

Desse enquadramento decorre o argumento central deste capítulo: o problema brasileiro de terras raras não se reduz a escassez de potencial. Reduz-se a insuficiência de coordenação, capacidade industrial contínua e governança estável. O País dispõe de reservas, projetos, competências científicas e experiências piloto, mas permanece com pouca capacidade de transformar esses ativos em presença industrial sustentada. A simples existência de minério, carbonato ou concentrado não resolve a inserção nacional em cadeias de maior valor. A riqueza mineral, isoladamente, não gera soberania tecnológica nem captura relevante de valor.

14.2 Aspirações e capacidades: a definição operacional

Estratégia é o processo de transformação de aspirações em capacidades. Essa definição econômica — e, exatamente por isso, exigente — organiza tudo o que se segue. Aspirações são configurações desejadas, formuladas de modo declarativo: o que deveria existir, o que deveria acontecer. Capacidades são competências, habilidades e recursos necessários e suficientes para realizar aspirações. A estratégia existe porque essas capacidades não estão dadas no ponto de partida; precisam ser construídas no caminho. Se estivessem prontas, a estratégia seria desnecessária.

A distinção entre aspiração e estratégia é, ela mesma, operacional. Declarar que o Brasil deve ser protagonista global em terras raras é aspiração. Desenhar as capacidades de mineração, separação, metalurgia, manufatura e reciclagem — com prazos, responsáveis e indicadores definidos — é estratégia. Os Blocos I, II e III deste documento, lidos em conjunto, constituem o passo do segundo registro: identificam as aspirações, mapeiam o diagnóstico setorial e organizam a sequência de ações que sustentam a construção das capacidades faltantes.

Aspirações, contudo, não são alvos fixos. São vetores dinâmicos. Mudam à medida que a realidade reage à tentativa de transformá-la. A gestão das aspirações é, ela mesma, parte da execução da estratégia. O Roadmap apresentado no Capítulo 3 reconhece essa característica ao adotar revisão periódica como parte do desenho: as metas para H2 (2031–2035) e H3 (2036–2040) não são deterministicamente fixadas em H1; serão recalibradas conforme as capacidades construídas e as condições contextuais o exigirem.

14.3 Tempo, espaço, escala: o contexto não é estático

O contexto em que uma estratégia se desenrola é a combinação de três dimensões — tempo, espaço e escala — que não param de se mover. O tempo, em estratégia, é simultaneamente escolha (quando fazer algo) e encadeamento (a sequência de eventos em que se faz). É também tríplice: passado, presente e futuro acontecem juntos no presente. Heranças mal liquidadas consomem o presente; experimentos não realizados deixam o futuro vir só quando já é tarde. A liderança estratégica precisa, ao mesmo tempo, resolver legados, orquestrar a operação e antecipar futuros — três tarefas que nenhuma dispensa as outras.

O espaço de uma estratégia para terras raras é, no caso brasileiro, simultaneamente físico (jazidas geograficamente concentradas em poucos estados), institucional (a articulação interministerial e federativa requerida) e internacional (acordos, alianças, diplomacia econômica). A escala do impacto pretendido combina amplitude (quantos elos da cadeia serão afetados), profundidade (qual o grau de domínio doméstico em cada elo) e velocidade (em que ritmo as transformações acontecem). Aspirações baixas raramente aumentam a competitividade; é melhor mirar alto e não atingir do que mirar raso e atingir, contanto que o desenho comporte aprendizagem efetiva.

O contexto, finalmente, é nem estático nem determinístico. O próprio processo de construir capacidades modifica o ambiente em que essas capacidades operarão. A criação de novas capacidades abre caminho para novas aspirações. A percepção da estratégia pela concorrência cria novos desafios. Os acontecimentos discutidos no Capítulo 13 — a aquisição da Mineração Serra Verde, o veto à TerraBras, a

entrada em vigor do Acordo Mercosul–União Europeia — ilustram exatamente esse padrão: o contexto muda no exato momento em que a estratégia tenta se consolidar. Agilidade na escolha de opções e experimentação contínua, em vez de parálise analítica, são respostas adequadas a esse fluxo.

14.4 Conhecidos, probabilísticos e desconhecidos: os níveis de ignorância

Toda estratégia depende de fatores conhecidos, probabilísticos e desconhecidos. Cada tipo exige tratamento diferente. Cada um deles é fonte de risco se tratado como outro. Fatores conhecidos exigem pesquisa e experimentação para confirmar continuamente sua vigência — mesmo o conhecido tem probabilidade não nula de se tornar irrelevante. Fatores probabilísticos exigem conhecimento causal, ou seja, a capacidade de prever resultado da ação de algum agente com base em observações de situações em que essa ação ainda não se realizou. Fatores desconhecidos exigem reconhecimento dos limites do conhecimento próprio e mecanismos para aprender.

A distinção entre quem sabe que não sabe e quem não sabe que não sabe é, em estratégia, decisiva. Cinco níveis distintos podem ser atribuídos a um agente cognitivo: (i) sabe e faz; (ii) sabe, mas não executa; (iii) sabe que não sabe e tem meios para aprender; (iv) não sabe que não sabe; (v) nem detém mecanismos para descobrir que não sabe que não sabe. Estratégias desenhadas ou executadas por agentes nos níveis 4 e 5 quase sempre fracassam — mesmo quando, por acaso, produzem algum resultado.

Para a estratégia brasileira de terras raras, a implicação é operacional. O País tem competência científica madura em praticamente todos os elos da cadeia, conforme demonstram o mapa de competências (Anexo A.1) e o quadro de projetos (Anexo A.4). Tem, portanto, base para operar nos níveis 1 a 3 nas dimensões técnicas. Onde o risco se concentra é nas dimensões institucional, política, financeira e geopolítica — campos em que decisões recentes (Cap. 13) sugerem operação intermitente em níveis inferiores. A construção de mecanismos permanentes de inteligência estratégica, monitoramento internacional e revisão periódica do Mapa do Caminho (instrumentos detalhados no Cap. 12) é resposta direta a esse risco.

14.5 Ecossistemas e colisões: terras raras como rede

A estratégia acontece em ecossistemas — complexos de instituições, organizações e agentes em um ambiente simultaneamente físico e digital, sujeitos a efeitos de rede e a estados de equilíbrio instáveis. Para terras raras, o ecossistema é particularmente denso: geologia, química, metalurgia, manufatura de ímãs, motores, defesa, eletrônica, reciclagem — camadas interdependentes em que atacar apenas uma é falhar em todas. O argumento estruturante do Anexo A.2 (matriz comparativa) deriva precisamente dessa interdependência: a separação e o refino habilitam, ou não, todas as cadeias a jusante.

Grandes estratégias modificam o ecossistema em que se desenrolam. Podem cindir ecossistemas existentes, criar novos ou produzir colisões entre ecossistemas — com resultados difíceis de prever. Entrar com peso na cadeia global de terras raras é, necessariamente, colidir com agendas estabelecidas: a

chinesa, centrada na manutenção do quase-monopólio do refino; a norte-americana, focada em segurança de suprimento e em alianças de redução de risco; a europeia, orientada por critérios ESG e diversificação; a japonesa e coreana, ambas dependentes de insumos críticos para suas indústrias estratégicas. Essas colisões produzem efeitos colaterais previsíveis — pressões diplomáticas, condições contratuais agressivas, tentativas de captura via aquisição de ativos. Os instrumentos identificados nos Capítulos 1 e 12 (alianças bilaterais, mapeamento de riscos, diplomacia econômica) são respostas à dimensão geopolítica das colisões antecipáveis.

14.6 De t1 a t2: a teoria da mudança ausente

Uma transformação estratégica pode ser descrita formalmente como o trajeto de uma teoria do negócio vigente (t1) para uma teoria do negócio futura (t2), guiado por uma teoria da mudança (tm) que articula como sair de uma e chegar à outra. As três peças são necessárias. Sem t1 clara, não se sabe o que se está abandonando. Sem t2 clara, não se sabe para onde se vai. Sem tm clara, não se sabe como fazer a travessia — e o sistema fica oscilando entre as duas configurações sem efetivamente sair da primeira.

O caso brasileiro de terras raras pode ser lido nessa gramática. A teoria do negócio vigente (t1) é razoavelmente legível: o País extrai minério ou concentrado, exporta-o a preços de *commodity*, e abriga uma fração mínima da cadeia de valor a jusante. A teoria do negócio futura (t2) também está esboçada — o Roadmap (Cap. 3) e os Eixos estratégicos (Cap. 12) descrevem uma cadeia integrada, com refino doméstico, manufatura de ímãs e demais cadeias setoriais operando em escala comercial, e inserção internacional negociada a partir de posição de força. O que falta explicitar, com a mesma clareza, é a teoria da mudança (tm): como, exatamente, se sai de t1 e se chega a t2.

Os capítulos anteriores fornecem boa parte dos elementos dessa teoria. O Capítulo 11 articula o refino como vetor de habilitação transversal — a decisão técnica e institucional que destrava as demais cadeias. O Capítulo 12 organiza eixos, prazos e instrumentos de política pública em três horizontes temporais. O Capítulo 13 identifica os ajustes operacionais demandados por acontecimentos recentes que estreitam a janela de execução. O que ainda precisa ser declarado, com firmeza institucional, é o encadeamento desses elementos em uma teoria explícita: quais agentes, com quais recursos, em que sequência, sob quais condições, produzem efetivamente a transição de t1 para t2. Toda teoria da mudança é, ela mesma, uma estratégia. Sem ela explícita, há *roadmap* mas não há trajetória.

14.7 Dez princípios para a estratégia brasileira de terras raras

Este capítulo encerra o documento com dez princípios operacionais que se distinguem, em natureza e função, das oito prioridades nacionais (Seção 1.6.8) e dos oito eixos estratégicos (Seção 12.1). As prioridades são ações concretas com prazos e responsáveis — "o que fazer e quando". Os eixos são áreas estruturais que organizam a execução do Mapa do Caminho — "em quais frentes se organizar para fazer".

Os princípios apresentados a seguir são critérios metaestratégicos de teste de coerência — "como pensar sobre o fazer para não errar". Os três conjuntos não se substituem nem reproduzem uns aos outros: operam em níveis lógicos distintos (ação, estrutura, método) e se reforçam mutuamente quando lidos em

conjunto. Funcionam como critérios de teste: cada decisão importante na execução da estratégia pode ser confrontada com a lista para verificar se permanece coerente com o desenho de fundo.

Primeiro, não confundir aspiração com estratégia. Declarar ambição global em terras raras é aspiração. Desenhar capacidades específicas de mineração, separação, metalurgia e manufatura — com prazos, responsáveis e indicadores — é estratégia. A diferença é operacional, não retórica.

Segundo, mapear o ecossistema inteiro. Terras raras formam uma rede, não uma commodity. Geologia, química, ímãs, motores, defesa, eletrônica, reciclagem — camadas interdependentes. Atacar apenas uma é falhar em todas, como demonstra a matriz comparativa do Anexo A.2.

Terceiro, ter modelo causal dos concorrentes. Compreender por que a China detém cerca de 90% do refino global, o que exatamente Estados Unidos, Austrália e Japão tentaram nos últimos quinze anos e por que esses esforços não consolidaram uma alternativa robusta. Decisões brasileiras tomadas sem esse modelo causal reproduzem erros já conhecidos.

Quarto, operar nos níveis 1 a 3 de ignorância. Reconhecer o que não se sabe, criar mecanismos para descobrir, evitar a transposição acrítica de benchmarks externos. Experimentar antes de decidir em escala — com agilidade e velocidade, não com lentidão burocrática.

Quinto, criar tempo, no presente, para o futuro. Separação química, óxidos individuais com alta pureza, ímãs de Nd-Fe-B, reciclagem urbana, recuperação de disprósio — todos requerem experimentação iniciada hoje, não projetos relegados a 2040. O futuro não chega automaticamente; é construído por experimentos no presente.

Sexto, flexibilidade verdadeira, não oscilação. Política de Estado com aprendizado acumulado entre governos, e não anúncios novos a cada ciclo eleitoral. Oscilação sem aprendizado é desorientação travestida de agilidade. Os instrumentos de coordenação interministerial permanente (Cap. 12) atendem exatamente a essa exigência.

Sétimo, definir explicitamente a teoria do negócio-país para terras raras. Uma tríade: ambiente (qual mercado global, quais aliados possíveis), missão (para que o Brasil faça isso) e competências nucleares (em que o País é, ou pretende ser, único). Sem essa declaração explícita, as ações se dispersam.

Oitavo, exercer liderança dialógica em rede. Academia, indústria, comunidades locais, povos indígenas afetados, governo federal, governos estaduais, capital privado nacional, capital internacional, instituições financeiras de desenvolvimento. Sem rede articulada, não há poder de rede. Sem poder de rede, não há defesa nem vantagem efetiva — apenas decreto.

Nono, calcular as colisões de ecossistemas. Entrar com peso na cadeia global é colidir com agendas estabelecidas. Haverá efeitos colaterais previsíveis: pressões diplomáticas, ofertas agressivas de aquisição, tentativas de captura via offtake. Mitigá-los — diplomacia coordenada, alianças seletivas, reservas estratégicas, instrumentos de proteção a preços — faz parte do desenho, não é subsidiário a ele.

Décimo, escrever parte da estratégia como código. Ecossistemas contemporâneos exigem rastreabilidade digital, sustentabilidade certificada, telemetria de operação, contratos inteligentes em alguns elos da cadeia. Em ambientes desse tipo, escrever código é, em boa parte, escrever cultura — e a cultura,

executada como código, reescreve a si mesma. Isso recupera, no plano operacional, o que o Capítulo 4 trata sobre rastreabilidade e certificação socioambiental.

14.8 A pergunta que organiza a próxima década

Os Blocos I, II e III deste documento, lidos em conjunto, respondem a um conjunto extenso de perguntas técnicas. O que este capítulo final propõe é deslocar a pergunta governante. A questão decisiva, para a próxima década, não é se o Brasil já tem uma estratégia para terras raras. Não é, tampouco, se vai escrever uma. Os elementos para a estratégia estão consolidados ao longo deste estudo. A questão decisiva é se o País tem uma teoria da mudança — e se essa teoria já está sendo escrita no presente, em decisões institucionais concretas.

Toda teoria da mudança é, em si, uma estratégia. Se ainda não se tem uma, o trabalho começa agora — e, com ele, retorna-se à definição de partida: estratégia é o processo de transformação de aspirações em capacidades. O capítulo seguinte abre o anexo técnico que reúne os instrumentos analíticos transversais — mapa de competências, matriz comparativa, consolidação autoral e quadro de projetos — que apoiam a tradução desse princípio em execução.

ANEXO A — PAINEL TRANSVERSAL

Mapa de competências, matriz comparativa, consolidação autoral e quadro de projetos

O Anexo A reúne quatro instrumentos analíticos transversais que apoiam a leitura do documento e o uso operacional do material consolidado nos blocos anteriores. A Seção A.1 organiza um mapa de competências por elo da cadeia, identificando onde o País dispõe de massa crítica utilizável, onde a competência existe, mas está descontinuada da escala industrial, e onde a lacuna é estrutural. A Seção A.2 apresenta a matriz comparativa das cinco cadeias setoriais contra o vetor transversal de separação e refino. A Seção A.3 fornece consolidação autoral capítulo a capítulo, funcionando como mapa de leitura. A Seção A.4 sistematiza, em quadro único, os projetos nacionais identificados ao longo do estudo.

Anexo A.1

Mapa de competências por elo da cadeia

O diagnóstico transversal dos capítulos setoriais permite organizar as competências instaladas no Brasil em uma matriz que cruza os cinco grandes elos da cadeia produtiva — exploração e mineração, beneficiamento e concentração, separação e refino, metalurgia e ligas, manufatura final — com a tipologia de competência mobilizada em cada um deles: técnico-científica, operacional-industrial, regulatória e de mercado. O objetivo não é exaustivo nem inventarial; é estratégico. Trata-se de identificar onde o País dispõe de massa crítica utilizável, onde a competência existe mas está descontinuada da escala industrial e onde a lacuna é estrutural e exige construção de capacidade nova.

A leitura conjunta dos capítulos revela um padrão recorrente: a competência técnico-científica brasileira é mais madura do que a base industrial. Centros de pesquisa como CETEM, INT, CDTN, USP, UFSC, UNICAMP, IPEN, CBPF/MCTI, UFMG, IFSC, UFRJ, UFG e UFRGS sustentam programas continuados em geometalurgia, hidrometalurgia, separação por solventes, troca iônica, produção de óxidos de alta pureza, redução metalotérmica, ligas avançadas, ímãs sinterizados, catalisadores e fósforos. Há domínio em escala laboratorial ou de bancada em praticamente todos os elos da cadeia. O descompasso aparece quando se procura, no mesmo perfil de elo, capacidade operacional contínua em escala semicomercial ou comercial: ela existe apenas em mineração e em segmentos pontuais de manufatura final.

A.1.1 Competências por elo

No elo de exploração e mineração, o País reúne competências consolidadas tanto científicas (Serviço Geológico do Brasil, CPRM, programas geológicos regionais) quanto operacionais (CBMM, Mineração Serra Verde até abril de 2026, projetos avançados em Araxá, Catalão, Caldas, Nova Roma, Buriti e outras localidades). A produção de concentrados está em curso, com perfil de competência consolidado, embora

concentrado em poucos atores. O elo produz, exporta e detém domínio técnico, mas opera majoritariamente como fornecedor de matéria-prima sem agregação subsequente realizada em território nacional.

No elo de beneficiamento e concentração, a competência é difusa e fortemente acoplada às operações de mineração existentes. CETEM, CDTN e grupos universitários sustentam pesquisa aplicada em rotas de beneficiamento — flotação, lixiviação ácida, separação magnética, concentração por gravidade — adaptadas aos tipos de depósito brasileiros, particularmente argilas iônicas, monazita e ETR associados a fosfatos. A capacidade de escalonamento existe em projetos específicos, mas não há rede industrial nacional autônoma de beneficiamento de terras raras operando independentemente das mineradoras.

No elo de separação e refino, encontra-se a lacuna estrutural mais significativa da cadeia brasileira. O domínio científico do processo de extração por solventes — a tecnologia dominante no mundo para separação de ETR individuais — está consolidado em institutos como CETEM, INT, IPEN e em universidades. Há produção de óxidos individuais em escala laboratorial. Não há, contudo, planta industrial em operação contínua. Tentativas anteriores de implantação industrial não se consolidaram. A ausência desse elo é a barreira de entrada para todas as cadeias a jusante: sem óxidos individuais de alta pureza produzidos no País, ímãs, ligas, catalisadores e fósforos brasileiros dependem necessariamente de importação de insumos críticos.

No elo de metalurgia e ligas, a competência técnico-científica é expressiva — em parte legada da experiência nacional com nióbio, alumínio e ligas especiais — mas a base industrial específica para ETR é incipiente. Há domínio laboratorial de redução metalotérmica e fusão de ligas Nd-Fe-B em escala de bancada e piloto. A indústria nacional de ligas metálicas convencionais (CBMM, Aperam, Villares Metals, Eletrometal) constitui base utilizável para extensão à produção de ligas portadoras de ETR, condicional à disponibilidade de óxidos individuais e metais elementares produzidos no País ou em condições contratuais estáveis.

No elo de manufatura final, o quadro é heterogêneo. Em ímãs permanentes, a competência industrial é restrita a projetos demonstradores e plantas piloto, com domínio científico em sinterização, magnetização e tratamento térmico. Em catalisadores, há base industrial consolidada na FCC (Petrobras, Fábrica Carioca de Catalisadores) e expressiva competência em P&D em catálise ambiental, automotiva e em rotas de hidrogênio. Em fósforos, o País possui grupos de pesquisa de classe internacional em óptica de terras raras (USP-São Carlos, UFPE, UNESP), com produção laboratorial estabelecida, mas sem indústria nacional. Em pós para polimento e materiais ópticos, há demanda industrial nacional consolidada (indústria petroquímica, vidreira, óptica de precisão) sem produção doméstica correspondente.

A.1.2 Síntese: do potencial à capacidade

A síntese do mapa de competências repete um diagnóstico que atravessa todos os capítulos setoriais: o País dispõe de potencial — reservas, competência científica, nichos de domínio tecnológico, infraestrutura instalada utilizável — e carece de capacidade industrial contínua. O elo estrutural ausente é a separação e refino. Sua construção é condição necessária, embora não suficiente, para todos os elos posteriores. As competências necessárias para fechamento da cadeia existem distribuídas no País; o que não existe é a coordenação institucional, o instrumento financeiro e o ator industrial capazes de articulá-las em uma

planta operacional. A passagem de potencial para capacidade não ocorrerá por espontaneidade de mercado: depende de uma decisão estratégica deliberada, que articule encomenda pública, redução de risco, financiamento de longo prazo e coordenação interministerial estável.

Anexo A.2

Matriz comparativa das cadeias versus refino

A análise transversal dos cinco capítulos setoriais — ímãs, ligas, catalisadores, fósforos e materiais para aplicações ópticas avançadas — mostra que cada cadeia possui dinâmica própria de captura de valor, concentração geográfica de oferta, maturidade tecnológica nacional e horizonte de viabilização. A matriz comparativa que se segue organiza essas dimensões em uma base comum para permitir a comparação entre cadeias e, em especial, evidenciar a posição estratégica do elo de separação e refino como vetor comum de habilitação.

O elo de separação e refino é tratado, neste contexto, como condicionante transversal: a viabilidade industrial de qualquer das cinco cadeias a jusante depende do acesso a óxidos individuais de terras raras com especificação técnica adequada. A matriz organiza as cadeias segundo quatro dimensões críticas e, em cada uma delas, registra o grau de dependência da etapa de separação e refino, o estágio de maturidade da base industrial brasileira e o horizonte plausível para fechamento doméstico do elo.

A.2.1 Matriz comparativa

O Quadro A.2.1 sistematiza a comparação entre as cinco cadeias setoriais analisadas neste estudo, contrastando-as quanto à dependência da etapa de separação e refino, ao grau de maturidade da base industrial brasileira, ao horizonte plausível de fechamento doméstico e à elasticidade de captura de valor pelo País caso a etapa de refino seja implantada em território nacional.

Quadro A.2.1: Matriz comparativa das cadeias setoriais versus etapa de separação e refino

Cadeia	Dependência do refino doméstico	Maturidade da base industrial nacional	Horizonte de fechamento doméstico	Elasticidade de captura de valor
Ímãs permanentes	Crítica: ligas dependem de óxidos individuais de Nd, Pr, Dy, Tb	Plantas-piloto; competência científica madura; sem produção comercial	H2 (2031–2035) com refino operando em H1	Alta: multiplicação de 15× a 45× sobre concentrado
Ligas metálicas portadoras de TR	Crítica: matéria-prima são óxidos individuais separados	Domínio laboratorial; base industrial em ligas convencionais extensível	H2 (2031–2035) após óxidos individuais disponíveis	Alta: principal vetor de valor agregado da cadeia
Catalisadores à base de TR	Parcial: alguns produtos admitem óxidos mistos ou de menor pureza	Base industrial consolidada em FCC; P&D forte em catálise ambiental	H1–H2 com possibilidade de início parcial antes do refino completo	Média: agregação significativa, dependente do tipo de catalisador
Fósforos à base de TR	Crítica: exige óxidos de alta pureza (Eu, Tb, Y) em especificação rigorosa	Competência científica internacional; sem produção industrial	H2–H3 (2031–2040), condicional ao refino e a demanda nacional articulada	Alta para nichos específicos; mercado global concentrado
Pós para polimento e materiais ópticos	Crítica: pureza de óxidos define qualidade do produto final	Demanda industrial nacional consolidada; sem produção doméstica	H1–H2 (início parcial em H1, escala em H2)	Média-alta: substituição de importações e nichos de exportação

A leitura horizontal do Quadro A.2.1 revela que, das cinco cadeias analisadas, quatro apresentam dependência crítica do elo de separação e refino. Apenas a cadeia de catalisadores admite início parcial sem fechamento completo dessa etapa, e mesmo assim em segmentos específicos. A leitura vertical, por sua vez, evidencia que a maturidade da base industrial é heterogênea: catalisadores possuem base mais consolidada do que as demais cadeias, ainda que dependente de insumos importados; ímãs operam em escala-piloto; ligas dispõem de base industrial extensível, mas não específica; fósforos e materiais ópticos exibem o maior descompasso entre maturidade científica e ausência de capacidade produtiva.

A.2.2 O refino como vetor de habilitação transversal

A síntese da matriz reforça o argumento estruturante do Roadmap: a etapa de separação e refino não é uma cadeia setorial isolada, mas o vetor de habilitação transversal sobre o qual repousa a viabilidade industrial de todas as demais. Sua ausência converte qualquer estratégia de manufatura downstream em dependência continuada de fornecedores externos, particularmente da China, que detém aproximadamente 90% da capacidade global de separação. A presença do elo no País, ao contrário, multiplica as opções estratégicas: viabiliza cadeias diversas a jusante, permite negociação com posição mais favorável em acordos internacionais e abre espaço para captura de valor próximo às proporções praticadas em jurisdições com cadeia integrada.

Dáí decorre uma implicação de política pública diretamente operacional: a decisão de implantação da separação e refino em escala industrial precede, logicamente, qualquer decisão sobre quais cadeias a jusante priorizar. Sem o vetor habilitador, a priorização entre ímãs, ligas, catalisadores, fósforos ou materiais ópticos torna-se uma questão de gestão de importações, não de construção de capacidade industrial nacional.

Anexo A.3

Consolidação das contribuições por capítulo

Os onze capítulos autorais que compõem os Blocos I, II e III foram redigidos por especialistas com trajetórias distintas em diferentes elos da cadeia de terras raras. A consolidação que se segue não substitui a leitura desses capítulos; tem função operacional, articulando para o leitor a contribuição central de cada um deles e suas conexões com os demais. Trata-se de um mapa de leitura que orienta o uso do documento como instrumento de referência para decisão pública.

A.3.1 Bloco I — Fundamentos

Os Capítulos 1, 2 e 3 estabelecem o quadro analítico, o panorama de mercado e o roadmap estratégico no qual a estratégia se inscreve. O Capítulo 1 examina o rearranjo geopolítico das terras raras a partir das estratégias declaradas das potências produtoras (China, Austrália, EUA, Vietnã, Mianmar, Rússia, Índia, países africanos), das potências consumidoras (União Europeia, Japão, Coreia do Sul) e dos principais atores corporativos. Sua contribuição central é a identificação de oito prioridades nacionais que operam como pré-condições institucionais para qualquer estratégia setorial.

O Capítulo 2 organiza o cenário global de demanda, oferta, tipologia mineralógica e mecanismos de reorganização da cadeia, projeta cenários prospectivos para 2026–2040 e situa a posição brasileira no quadro comparado. Sustenta a tese de que a janela de oportunidade é estreita e que sua exploração depende de decisões institucionais que precedem a execução setorial.

O Capítulo 3 consolida a análise dos Capítulos 1 e 2 em um Roadmap estratégico organizado em três horizontes temporais — fundações institucionais e ativação dos elos críticos (H1, 2026–2030), escalonamento rumo à consolidação da cadeia (H2, 2031–2035) e consolidação industrial e maior protagonismo internacional (H3, 2036–2040). O capítulo desenvolve, para cada horizonte, as dimensões de análise — regulatória, institucional, técnico-industrial, financeira, de mercado, ambiental e diplomática — e identifica os condicionantes críticos de execução. Sua contribuição central é a articulação operacional entre o diagnóstico setorial e a sequência decisória recomendada.

A.3.2 Bloco II — Direcionadores

O Capítulo 4 trata da economia circular e da sustentabilidade. Sua contribuição é dupla: identifica os impactos socioambientais característicos da cadeia (rejeitos com elementos radioativos, uso intensivo de reagentes, geração de efluentes) e apresenta o conjunto de instrumentos disponíveis para mitigação

(recuperação de resíduos industriais, reciclagem de ímãs em fim de vida, rastreabilidade e certificação socioambiental, gestão responsável de rejeitos). A perspectiva da sustentabilidade é tratada como parte constitutiva do desenho da estratégia, não como restrição externa adicional.

Os Capítulos 5 a 9 cobrem, sucessivamente, as cinco cadeias setoriais a jusante: ímãs permanentes (Cap. 5), catalisadores (Cap. 6), ligas metálicas portadoras de TR (Cap. 7), fósforos (Cap. 8) e pós para polimento e materiais para aplicações ópticas avançadas (Cap. 9). Cada um deles segue estrutura comparável: importância estratégica, principais usos industriais, cadeia produtiva e análise de patentes, competência instalada no Brasil e visão de futuro com horizonte 2040. O conjunto fornece a matéria-prima analítica que alimenta a matriz comparativa apresentada no Anexo A.2 e o quadro de projetos consolidado no Anexo A.4.

A.3.3 Bloco III — Estratégia

Os Capítulos 10 e 11 desenvolvem os dois elos estruturantes da cadeia produtiva: mineração e refino. O Capítulo 10 estabelece a base mineral — tipologia de depósitos, reservas, produção, cadeia de valor e principais polos mundiais — e situa o Brasil como detentor da segunda maior reserva global, com predominância de depósitos de argila iônica, monazita e ETR associados a complexos carbonatíticos. O Capítulo 11 desenvolve a proposta técnica e institucional para o elo de separação e refino, com análise comparada internacional, evolução de patentes, configurações de planta e considerações regulatórias e ambientais. É o capítulo que articula a viabilidade do vetor transversal identificado no Anexo A.2: a decisão de implantação da separação e refino precede, logicamente, qualquer decisão sobre quais cadeias a jusante priorizar.

O Capítulo 12 organiza os eixos estratégicos, prazos e instrumentos de política pública em uma articulação operacional. Estrutura oito eixos — expansão e qualificação da base mineral, desenvolvimento do midstream, metalurgia e ímãs, integração com cadeias usuárias, ciência e tecnologia, sustentabilidade, governança e inserção internacional — e os relaciona a três horizontes temporais e a seis famílias de instrumentos. O Capítulo 13 atualiza o quadro de execução à luz dos acontecimentos ocorridos entre abril e maio de 2026: a aquisição da Mineração Serra Verde por empresa norte-americana, o veto presidencial às propostas de criação da TerraBras e a entrada em vigor provisória do Acordo Mercosul–União Europeia.

O Capítulo 14 fecha o documento com uma síntese conceitual que articula os blocos anteriores à luz de uma definição operacional de estratégia. O capítulo recupera a inflexão metodológica do workshop CGEE/especialistas, sistematiza as cinco dimensões contextuais que organizam qualquer estratégia (tempo, espaço, escala, fluxo, dependências), discute os níveis de ignorância como vetor de risco, trata o caráter sistêmico do ecossistema de terras raras e propõe a explicitação da teoria da mudança como condição de coerência da execução. Encerra-se com dez princípios operacionais que funcionam como critérios de teste para decisões concretas.

A.3.4 Conexões transversais entre capítulos

A leitura integrada revela conexões que merecem registro explícito. As oito prioridades nacionais identificadas no Capítulo 1 são operacionalizadas no Capítulo 3 como ações estruturantes do H1 e detalhadas no Capítulo 12 como eixos e instrumentos. A proposta técnica de separação e refino do

Capítulo 11 é tratada nos Capítulos 3, 12 e 14 como vetor de habilitação transversal das cadeias setoriais. Os diagnósticos setoriais dos Capítulos 5 a 9 alimentam, nos Capítulos 3 e 12, a definição de cadeias a serem ativadas em cada horizonte. O Capítulo 4 atravessa horizontalmente todos os demais ao tratar a sustentabilidade como dimensão constitutiva. O Capítulo 14, por fim, articula o conjunto em uma síntese conceitual que explicita a teoria da mudança requerida para que o desenho estratégico produza efetivamente os resultados pretendidos. O documento, portanto, opera como um sistema: cada capítulo só revela plenamente seu sentido quando lido em relação aos demais.

Anexo A.4

Quadro consolidado de projetos nacionais

Os capítulos setoriais identificam, de forma dispersa, dezenas de projetos nacionais em estágios variados de maturidade. A consolidação que se segue organiza esse conjunto em quadro único, por elo da cadeia e por estágio de execução, com registro do principal ator responsável, localização e horizonte plausível de operação comercial. A função do quadro é dupla: orientar o leitor para o panorama atual de projetos concretos e permitir aos formuladores de política pública identificar lacunas de cobertura territorial e tecnológica.

O quadro consolidado a seguir foi construído a partir da informação explícita nos capítulos setoriais e dos relatórios públicos disponíveis até a data de corte da análise. Não constitui inventário oficial nem substitui levantamentos setoriais específicos. Sua organização por elo permite a leitura cruzada com o mapa de competências do Anexo A.1 e a matriz comparativa do Anexo A.2.

Quadro A.4.1: Projetos nacionais em terras raras, por elo da cadeia (até maio de 2026)

Elo da cadeia	Projeto / iniciativa	Localização	Estágio	Horizonte de operação
Mineração	Mineração Serra Verde — Mina Pela Ema	Minaçu (GO)	Produção comercial em curso	Operacional
Mineração	CBMM — Rejeitos de nióbio (monazita)	Araxá (MG)	Aproveitamento secundário em estudo	H1 (2026–2030)
Mineração	Aclara Resources — Projeto Carina	Goiás	Estudos avançados	H1–H2
Mineração	Brazil Rare Earths — Rocha da Rocha	Bahia	Exploração avançada	H1–H2
Mineração	Viridis Mining — Colossus	Poços de Caldas (MG)	Desenvolvimento	H1–H2
Mineração	Meteoric Resources — Caldeira	Poços de Caldas (MG)	Estudos avançados	H1–H2

Elo da cadeia	Projeto / iniciativa	Localização	Estágio	Horizonte de operação
Mineração	Mineração Buriti / projetos correlatos	Minas Gerais / Goiás	Estágios variados	H1–H2
Beneficiamento	INB — Processamento de monazita (legado)	Buena (RJ) / São Paulo	Histórico, com instalações remanescentes	Reativação em análise
Beneficiamento	Curimbaba — Concentração de TR	Poços de Caldas (MG)	Operação em escala intermediária	Operacional / expansão
Separação e refino	CETEM — Plantas-piloto de separação por solventes	Rio de Janeiro (RJ)	Pesquisa aplicada e escalonamento piloto	Operacional em escala piloto
Separação e refino	INT — Hidrometalurgia de TR	Rio de Janeiro (RJ)	Pesquisa aplicada	Operacional em P&D
Separação e refino	IPEN — Separação de ETR	São Paulo (SP)	Pesquisa e produção laboratorial	Operacional em escala laboratorial
Separação e refino	Planta industrial nacional de separação (proposta Cap. 11)	A definir	Proposta técnica e institucional	H1–H2 sujeita a decisão
Metalurgia e ligas	CDTN — Redução metalotérmica de ETR	Belo Horizonte (MG)	Pesquisa aplicada e bancada	Operacional em escala piloto
Metalurgia e ligas	USP-EEL — Ligas portadoras de TR	Lorena (SP)	Pesquisa aplicada	Operacional em P&D
Metalurgia e ligas	UFSC / MAGMA — Ligas para ímãs	Florianópolis (SC)	Pesquisa aplicada	Operacional em P&D
Ímãs permanentes	Projeto MAGBRAS — Demonstrador industrial Nd-Fe-B	Minas Gerais / Santa Catarina	Demonstrador industrial em implantação	H1–H2
Ímãs permanentes	CIT SENAI ITR — Ímãs de TR	Santa Catarina	Pesquisa aplicada e piloto	Operacional em P&D
Catalisadores	Fábrica Carioca de Catalisadores (FCC SA)	Rio de Janeiro (RJ)	Produção comercial	Operacional
Catalisadores	Petrobras / CENPES — Catalisadores avançados	Rio de Janeiro (RJ)	P&D e produção interna	Operacional
Catalisadores	UFRJ / NUCAT — Catálise heterogênea	Rio de Janeiro (RJ)	Pesquisa aplicada	Operacional em P&D
Catalisadores	UFSCar / LACAT — Catálise ambiental	São Carlos (SP)	Pesquisa aplicada	Operacional em P&D
Fósforos	USP-São Carlos — Fósforos e materiais luminescentes	São Carlos (SP)	Pesquisa aplicada	Operacional em P&D

Elo da cadeia	Projeto / iniciativa	Localização	Estágio	Horizonte de operação
Fósforos	UFPE — Materiais luminescentes	Recife (PE)	Pesquisa aplicada	Operacional em P&D
Fósforos	UNESP / IPEN — Fósforos de TR	São Paulo (SP)	Pesquisa aplicada	Operacional em P&D
Materiais ópticos	UFRJ / Unicamp — Vidros e materiais ópticos	Rio de Janeiro / Campinas	Pesquisa aplicada	Operacional em P&D
Materiais ópticos	Indústrias vidreiras nacionais (demanda)	Diversos estados	Demanda industrial consolidada sem produção doméstica	Substituição de importações em H1–H2

A.4.1 Leituras do quadro consolidado

Três padrões emergem da leitura do Quadro A.4.1. O primeiro é a concentração geográfica em três regiões: Minas Gerais e Goiás (com predominância em mineração e beneficiamento), São Paulo e Rio de Janeiro (com predominância em pesquisa aplicada e em catálise) e Santa Catarina (com presença significativa em ímãs e ligas). Outras regiões — Norte, Nordeste, Centro-Oeste — aparecem em projetos isolados, sugerindo oportunidades de expansão territorial articulada ao mapeamento geológico em curso pelo Serviço Geológico do Brasil.

O segundo padrão é a heterogeneidade de estágio: enquanto o elo de mineração apresenta projetos em produção comercial e em desenvolvimento avançado, o elo de separação e refino permanece em escala laboratorial ou piloto, sem projeto industrial em implantação efetiva. Esse descompasso confirma o diagnóstico do Anexo A.2: a estratégia depende, antes de tudo, da decisão de viabilizar o vetor habilitador transversal.

O terceiro padrão é a predominância de competência técnico-científica sobre capacidade industrial nas cadeias a jusante. À exceção de catalisadores, em que existe produção comercial consolidada, todas as demais cadeias dependem de demonstradores e plantas-piloto que, sem encomenda industrial estável e financiamento de longo prazo, dificilmente transitarão para a escala comercial.

Anexo A.5

Correspondência entre prioridades nacionais, eixos estratégicos e princípios operacionais

Ao longo deste estudo, o argumento estratégico é organizado por três conjuntos de itens enumerados que o leitor encontra em pontos distintos da obra: as oito prioridades nacionais (Seção 1.6.8), os oito eixos estratégicos (Seção 12.1) e os dez princípios operacionais (Seção 14.7). Os três conjuntos não são versões um do outro, nem se sobrepõem por acaso: operam em níveis lógicos distintos, conforme a Seção 14.7 já

explicita. As prioridades são ações concretas, com prazo e responsável — *o que fazer e quando*. Os eixos são frentes estruturais que organizam a execução do Roadmap — *em que frentes se organizam para fazer*. Os princípios são critérios metaestratégicos de teste de coerência — *como pensar sobre o fazer para não errar*. Este anexo reúne os três conjuntos em um único quadro de correspondência, de modo a tornar visíveis, em um só lugar, tanto as convergências temáticas — pontos em que ação, estrutura e método incidem sobre o mesmo problema — quanto às assimetrias, isto é, as frentes cobertas por um conjunto e não pelos demais.

O quadro organiza-se por domínio estratégico, e não pela ordem de enumeração de cada conjunto, justamente porque não há correspondência um-a-um entre os itens: uma mesma prioridade pode atravessar mais de um eixo, e um princípio pode informar várias prioridades simultaneamente. A leitura por domínio revela o desenho de fundo. Há domínios de convergência plena — governança de Estado, base mineral, sustentabilidade —, em que os três registros se reforçam. E há assimetrias instrutivas: a integração com a demanda industrial doméstica é estruturada como eixo (E4), mas não recebeu prioridade nacional dedicada na Seção 1.6.8, sinalizando uma frente cuja urgência institucional ainda não foi traduzida em ação datada; já o primeiro princípio — não confundir aspiração com estratégia — é critério-raiz que se aplica a todos os domínios e, por isso, não se deixa reduzir a nenhuma prioridade ou eixo isolado.

Quadro A.5.1 — Matriz de correspondência temática

Domínio estratégico	Prioridades nacionais (Cap. 1.6.8)	Eixos estratégicos (Cap. 12.1)	Princípios operacionais (Cap. 14.7)
Governança e coordenação de Estado	P1 — arcabouço regulatório faseado; P8 (dimensão institucional)	E7 — governança e coordenação estratégica	6 — flexibilidade verdadeira, não oscilação; 7 — teoria do negócio-país; 8 — liderança dialógica em rede
Base mineral e conhecimento geológico	P2 — caracterização analítica dos depósitos prioritários; P6 — mapeamento geológico da Amazônia (PlanGeo)	E1 — expansão e qualificação da base mineral	4 — operar nos níveis 1 a 3 de ignorância

Domínio estratégico	Prioridades nacionais (Cap. 1.6.8)	Eixos estratégicos (Cap. 12.1)	Princípios operacionais (Cap. 14.7)
Separação, refino e agregação de valor	P3 (planta de separação como objeto do acordo)	E2 — desenvolvimento do midstream; E3 — metalurgia, ligas e ímãs	5 — criar tempo, no presente, para o futuro
Proteção da renda mineral e financiamento	P4 — preço mínimo soberano; P5 — reforma da destinação da CFEM (FSMC)	E2 e E1 (via instrumentos de financiamento e mitigação de risco)	9 — calcular as colisões de ecossistemas (proteção a preços)
Inserção internacional e diplomacia	P3 — acordo bilateral com offtake soberano; P7 — diplomacia mineral ativa	E8 — inserção internacional e política externa	3 — modelo causal dos concorrentes; 9 — colisões de ecossistemas
Demanda doméstica e integração industrial	<i>(sem prioridade dedicada — ver nota)</i>	E4 — integração com cadeias industriais usuárias	2 — mapear o ecossistema inteiro
Ciência, tecnologia e capacidades	P2 e P3 (componentes de capacitação técnica)	E5 — ciência, tecnologia e inovação	4 — operar sob ignorância; 5 — criar tempo para o futuro
Sustentabilidade, rastreabilidade e ESG	P8 — sustentabilidade e rastreabilidade como condição de acesso a mercados	E6 — sustentabilidade e economia circular	10 — escrever parte da estratégia como código
Crítério transversal de coerência	<i>(aplica-se a todas)</i>	<i>(aplica-se a todos)</i>	1 — não confundir aspiração com estratégia

Três características do quadro merecem registro. A primeira é que os domínios de maior convergência — governança de Estado e sustentabilidade — são também aqueles em que o diagnóstico do estudo é mais enfático: quando ação, estrutura e método apontam para o mesmo ponto, trata-se de condição cuja

ausência compromete todo o restante. A segunda é que a proteção da renda mineral aparece como prioridade dupla (P4 e P5) e como princípio (9), mas não como eixo autônomo — o financiamento e a proteção a preços operam, na arquitetura do Capítulo 12, como família de instrumentos que atravessa os eixos, e não como eixo em si; a matriz torna essa opção de desenho explícita. A terceira é a assimetria já apontada na integração com a demanda doméstica: estruturada como eixo, sustentada pelo princípio de mapear o ecossistema inteiro, mas sem prioridade nacional datada — lacuna que a revisão periódica do Mapa do Caminho Estratégico, prevista para 2030, poderá endereçar.

Posfácio

A análise dos atores globais, dos cenários prospectivos e dos diagnósticos setoriais converge para uma conclusão única: a janela estratégica para o Brasil existe e tem prazo. O que diferencia os países que construíram cadeias relevantes de terras raras fora da China dos que permaneceram exportadores de concentrado não é a dotação geológica, que o Brasil tem em abundância, nem a competência técnica e científica, presente nas instituições de pesquisa nacionais e mapeada ao longo dos capítulos. É a velocidade e a consistência da decisão política de Estado.

Quatro elementos institucionais são insubstituíveis para que a janela seja capturada: marco regulatório estável de longo prazo, mecanismo soberano de proteção a preços, acordos bilaterais com transferência efetiva de tecnologia e uma entidade operacional de Estado com mandato contratual claro. A forma jurídica dessa entidade é flexível; sua função, não. O Mapa do Caminho Estratégico apresentado no Bloco III propõe uma sequência operacional para construir essas quatro condições no horizonte de curto prazo, abrindo caminho para os elos de maior valor agregado no horizonte seguinte.

Este documento não esgota o tema. Ele consolida o estado da arte do diagnóstico e oferece uma estratégia integrada de execução. Sua atualização periódica — prevista para 2030 e 2035 nos termos do *roadmap* — será necessária à medida que premissas se alterarem e novas evidências emergirem. O convite que se faz ao leitor é o de tratar o documento como uma referência viva, retornando a capítulos específicos conforme as decisões setoriais se aproximarem dos prazos críticos identificados.

Bibliografia consolidada

A bibliografia consolidada deste documento está organizada por capítulo, preservando a estrutura de referências adotada por cada autor. Dentro de cada capítulo, as referências estão dispostas em ordem alfabética pelo sobrenome do primeiro autor (ou, na ausência, pelo nome da entidade autora). Foram preservados os formatos originais de citação adotados por cada autor — predominantemente ABNT, com variações pontuais de estilo de numeração — tendo sido aplicada apenas normalização tipográfica e eliminação de duplicatas dentro de cada capítulo.

A organização por capítulo permite ao leitor (i) rastrear cada citação até a fonte original do autor que a introduziu; (ii) comparar bases bibliográficas entre os capítulos setoriais; (iii) identificar lacunas de fontes que merecem ser preenchidas em uma futura edição revista. A consolidação alfabética de toda a bibliografia em uma única lista — sem segmentação por capítulo — pode ser produzida em uma terceira iteração editorial caso a coordenação assim decida.

ATORES E PRIORIDADES NACIONAIS NO CENÁRIO GLOBAL DE TERRAS RARAS

(70 referências)

- AL CIRCLE. Lynas and Japan's JARE sign rare earth supply deal to reduce reliance on China. 2026. Disponível em: <https://www.alcircle.com/news/lynas-and-japans-jare-sign-rare-earth-supply-deal-to-reduce-reliance-on-china-117613>. Acesso em: 09 abr. 2026.
- ARAFURA RARE EARTHS LIMITED. Arafura signs cornerstone NdPr *offtake* agreement. Perth: Arafura Rare Earths, 7 nov. 2022. (ASX Announcement). Disponível em: https://cdn-api.markitdigital.com/apiman-gateway/ASX/asx-research/1.0/file/2924-02594581-6A1120816?access_token=83ff96335c2d45a094df02a206a39ff4. Acesso em: 09 abr. 2026.
- ARCTIC TODAY. Why are the Russians rushing to mine rare earths in the Arctic? Arctic Today, 12 dez. 2025. Disponível em: <https://www.arctictoday.com/why-are-the-russians-rushing-to-mine-rare-earths-in-the-arctic/>. Acesso em: 09 abr. 2026.
- AUSTRALIAN STRATEGIC POLICY INSTITUTE (ASPI). US and Australia deepen critical-minerals engagement to counter China. The Strategist, 18 nov. 2025. Disponível em: <https://www.aspistrategist.org.au/us-and-australia-deepen-critical-minerals-engagement-to-counter-china/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Edital do BNDES e Finep tem R\$ 85,2 bi em propostas para transformação de minerais estratégicos. Jun. 2025. Disponível em: [https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/industria/Edital-do-BNDES-e-Finep-tem-R\\$-852-bi-em-propostas-para-transformacao-de-minerais-estrategicos/](https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/industria/Edital-do-BNDES-e-Finep-tem-R$-852-bi-em-propostas-para-transformacao-de-minerais-estrategicos/). Acesso em: 10 abr. 2026.
- BRASIL MINERAL. Serra Verde assegura US\$ 465 milhões dos EUA para ampliar produção. 21 nov. 2025. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/serra-verde-assegura-us-465-milhoes-dos-eua-para-ampliar-producao>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BRASIL. Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. Institui a Política de Apoio ao Licenciamento Ambiental de Projetos de Investimentos para a Produção de Minerais Estratégicos e cria o Comitê Interministerial de Análise de Projetos de Minerais Estratégicos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 mar. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Decreto/D10657.htm. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Mapeamento geológico: cobertura nacional. Brasília: MME, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/brasil-lider-mundial-na-transicao-energetica/gestao/mapeamento-geologico>. Acesso em: 10 abr. 2026.

- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Comitê interministerial habilita seis novos projetos na Política Pró-Minerais Estratégicos. Brasília, DF: MME, 24 nov. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/comite-interministerial-habilita-seis-novos-projetos-na-politica-pro-minerais-estrategicos>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Portaria nº 120, de 14 de novembro de 2025. Regulamenta a Política de Debêntures a Projetos de Transformação de Minerais Estratégicos para a Transição Energética. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 nov. 2025. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202511/governo-brasil-titulos-estimular-investimentos-minerais-estrategicos-terras-raras>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BRUEGEL. Ending European Union imports of Russian uranium. Bruxelas: Bruegel, abr. 2025. Disponível em: <https://www.bruegel.org/analysis/ending-european-union-imports-russian-uranium>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CARESTER. Caremag secures €216 million in financing. Lyon: Carester, mar. 2025. Disponível em: <https://www.carester.fr/en/caremag-launch/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CENÁRIO ENERGIA. Brasil entra na corrida global por minerais críticos com *joint venture* entre NBEPAR e Uranium One. 2026. Disponível em: <https://cenarioenergia.com.br/2026/03/24/brasil-entra-na-corrida-global-por-minerais-criticos-com-joint-venture-entre-nbepar-e-uranium-one/>. Acesso em: 10 abr.. 2026.
- CENTER FOR STRATEGIC AND INTERNATIONAL STUDIES (CSIS). Developing rare earth processing hubs: An analytical approach. 30 jul. 2025b. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/developing-rare-earth-processing-hubs-analytical-approach>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CENTER FOR STRATEGIC AND INTERNATIONAL STUDIES (CSIS). The geopolitics of Russia's civil nuclear exports four years into the war. Washington, D.C.: CSIS, mar. 2026. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/geopolitics-russias-civil-nuclear-exports-four-years-war>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CENTER FOR STRATEGIC AND INTERNATIONAL STUDIES (CSIS). Unpacking Trump's New Critical Minerals Executive Order. 24 mar. 2025a. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/unpacking-trumps-new-critical-minerals-executive-order>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS (CEBRI). 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: CEBRI, 2025. ISBN 978-85-89534-13-0.
- CHATHAM HOUSE. China's new restrictions on rare earth exports send a stark warning to the West. 2 dez. 2025. Disponível em: <https://www.chathamhouse.org/2025/10/chinas-new-restrictions-rare-earth-exports-send-stark-warning-west>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CHEMCOPILOT. India's quiet race for rare-earth chemical processing. 2025. Disponível em: <https://www.chemcopilot.com/blog/indias-quiet-race-for-rare-earth-chemical-processing-the-story-no-one-is-really-telling>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CHINA. Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). Supplementary regulations on the rare earth traceability system. Beijing: MIIT, Feb. 2025. Disponível em: <https://www.miit.gov.cn>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CNN BRASIL. NBEPAR e estatal russa Rosatom formam *joint venture* para minerais críticos. São Paulo: CNN Brasil, mar. 2026. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/infra/nbepar-e-estatal-russa-rosatom-formam-joint-venture-para-minerais-criticos/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- COLUMBIA UNIVERSITY / CENTER ON GLOBAL ENERGY POLICY (CGEP). How the US–Japan critical minerals partnership is a long-overdue step toward real supply-chain security. Nova York: Columbia SIPA, out. 2025. Disponível em: <https://www.energypolicy.columbia.edu/how-the-us-japan-critical-minerals-partnership-is-a-long-overdue-step-toward-real-supply-chain-security/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- COMISSÃO EUROPEIA. Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council establishing a framework for ensuring a secure and sustainable supply of critical raw materials (*Critical Raw Materials Act*). Official Journal of the European Union, L, 03 May 2024.
- DEFENCE HORIZON JOURNAL. India's strategic leap in rare earths. 2026. Disponível em: <https://tdhj.org/blog/post/india-geo-economics-rare-earth/>. Acesso em: 10 abr. 2026.

DISCOVERYALERT. India's rare earth processing bottlenecks and strategic solutions. 2025. Disponível em: <https://discoveryalert.com.au/strategic-mineral-supply-chain-vulnerabilities-2025/>. Acesso em: 10 abr. 2026.

FASTMARKETS. Rare earth magnet recycling technology branches out. Londres: Fastmarkets, abr. 2024. Disponível em: <https://www.fastmarkets.com/insights/rare-earth-magnet-recycling-technology-branches-out/>. Acesso em: 10 abr. 2026.

GAZETA DO POVO. Rússia firma parceria no Brasil para explorar minerais críticos. Curitiba, mar. 2026. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/mundo/estatal-russa-firma-parceria-empresa-brasileira-exploracao-minerais-criticos/>. Acesso em: 10 abr. 2026.

GLOBENEWSWIRE. BRE and Carester sign 10-year heavy rare earth *offtake* and partnership to deliver BRE's rare earth separation plant. Out. 2025. Disponível em: <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/10/09/3164137/0/en/BRE-and-Carester-sign-10-year-Heavy-Rare-Earth-Offtake-and-Partnership-to-deliver-BRE-s-Rare-Earth-Separation-Plant.html>. Acesso em: 10 abr. 2026.

GOVERNMENT OF BRITISH COLUMBIA. B.C., South Korea will collaborate on critical minerals opportunities. Victoria: Province of British Columbia, 2023. Disponível em: <https://news.gov.bc.ca/releases/2023EMLI0033-000855>. Acesso em: 10 abr. 2026.

HURST, C. China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn? Institute for the Analysis of Global Security (IAGS), mar. 2010. Disponível em: <http://www.iags.org/rareearth0310hurst.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2026.

INDIA. Ministry of Mines. AMD). India's Rare Earth Strategy: Manufacturing, Corridors, and Global Integration. Nova Deli: Press Information Bureau (PIB), 3 fev. 2026. Disponível em: <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2222413>. Acesso em: 10 abr. 2026.

INFOMONEY. Governo discute projeto que cria estatal para minerar terras raras. InfoMoney, São Paulo, 27 mar. 2026. Disponível em: <https://www.infomoney.com.br/politica/governo-discute-projeto-que-cria-estatal-para-minerar-terras-raras/>. Acesso em: 10 abr. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global Critical Minerals Outlook* 2025. Paris: IEA, jun. 2025. CC BY 4.0. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>. Acesso em: 10 abr. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14040: environmental management — life cycle assessment — principles and framework. Geneva: ISO, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 14044: environmental management — life cycle assessment — requirements and guidelines. Geneva: ISO, 2006b.

JAPAN. Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). The Japanese and French governments work together to support a heavy rare earth project in France. Tóquio: METI, mar. 2025. Disponível em: https://www.meti.go.jp/english/press/2025/0317_002.html. Acesso em: 10 abr. 2026.

JOC LLC. S Korea's Star Group to operate \$80 mln magnet factory in Vietnam. [S.l.]: JOC LLC, 2024. Disponível em: <https://jocllc.com/f/s-korea%E2%80%99s-star-group-to-operate-80-mln-magnet-factory-in-vietnam>. Acesso em: 10 abr. 2026.

KED GLOBAL. POSCO Int'l to build permanent magnet factory in US with Star Group. Seoul: KED Global, 3 out. 2023. Disponível em: <https://www.kedglobal.com/electric-vehicles/newsView/ked202310030002>. Acesso em: 10 abr. 2026.

KLINGER, J. M. *Rare Earth Frontiers: From Terrestrial Subsoils to Lunar Landscapes*. Ithaca: Cornell University Press, 2017.

KNIGHTSBRIDGE SG. Assessing Russia's nuclear export diplomacy in the context of its geopolitical rivalries. Set. 2024. Disponível em: <https://www.knightsbridgesg.com/post/assessing-russia-s-nuclear-export-diplomacy-in-the-context-of-its-geopolitical-rivalries-september>. Acesso em: 10 abr. 2026.

KOREA. Ministry of Trade, Industry and Energy. Press release: rare earth supply chain task force and critical minerals stabilization fund. Sejong: MOTIE, 31 out. 2025. Disponível em: <https://english.motir.go.kr/eng/article/EATCLdfa319ada/2382/view>. Acesso em: 10 abr. 2026.

LOWY INSTITUTE. Japan's bid to build a "de-Chinified" rare earth supply system — with Australia and Brazil on-board. Sydney: Lowy Institute, mar. 2026. Disponível em: <https://www.lowyinstitute.org/the-interpreter/japan-s-bid-build-de-chinified-rare-earth-supply-system-australia-brazil-board>. Acesso em: 10 abr. 2026.

- LOWY INSTITUTE. Rare earth showdown: Why the West must learn to pick winners and partners. Sydney: Lowy Institute, 2025. Disponível em: <https://www.lowyinstitute.org/the-interpreter/rare-earth-showdown-why-west-must-learn-pick-winners-partners>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MAGNETICS MAGAZINE. Korean magnet manufacturer Star Group rises in prominence. [S.l.]: Magnetism Magazine, 8 abr. 2024. Disponível em: <https://magnetismmag.com/korean-magnet-manufacturer-star-group-rises-in-prominence>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MANCHERI, N. A. et al. Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 142, p. 101-112, 2019.
- McNULTY, T.; HAZEN, N.; PARK, S. et al. Processing the ores of rare-earth elements. *MRS Bulletin*, v. 47, n. 3, p. 258-266, 2022.
- METAL TECH NEWS. Lynas, JARE upgrade Japan rare earth deal. 2026. Disponível em: <https://www.metaltechnews.com/story/2026/03/11/tech-metals/lynas-jare-upgrade-japan-rare-earth-deal/2679.html>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MINE. Caremag project puts Europe back in the REE game. Issue 153, jun. 2025. Disponível em: https://mine.nridigital.com/mine_jun25/caremag-project-ree. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MINING TECHNOLOGY. Caremag project puts Europe back in the REE game. Mai. 2025. Disponível em: <https://www.mining-technology.com/analysis/caremag-project-puts-europe-back-in-the-ree-game/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MINING.COM. Rare earth startups eye slice of \$1 billion bounty from Brazil. [S.l.]: Mining.com, 24 jun. 2025. Disponível em: <https://www.mining.com/web/rare-earth-startups-eye-slice-of-1-billion-bounty-from-brazil/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MINING.COM. Rosneft acquires Russia's largest rare earth deposit. 21 maio 2025. Disponível em: <https://www.mining.com/rosneft-acquires-russias-largest-rare-earth-deposit/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- NEWSWIRE. Korea Resources Corporation completes acquisition of a 10% interest in Frontier Rare Earths' Zandkopsdrift project for C\$23.8 million. [S.l.]: CNW Newswire, 2012. Disponível em: <https://www.newswire.ca/news-releases/korea-resources-corporation-completes-acquisition-of-a-10-interest-in-frontiers-zandkopsdrift-project-for-c238-million-511381941.html>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- OBSERVER RESEARCH FOUNDATION (ORF). India's REE strategy: Turning resources into capacity. 11 ago. 2025. Disponível em: <https://www.orfonline.org/expert-speak/india-s-ree-strategy-turning-resources-into-capacity>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- OBSERVER RESEARCH FOUNDATION (ORF). Rare earths armistice: India's shift from mining to processing. Nova Delhi: ORF, nov. 2025b. Disponível em: <https://www.orfonline.org/expert-speak/rare-earths-armistice-india-s-shift-from-mining-to-processing>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- PODER360. Planalto discute criação de estatal para minerar terras-raras. Poder360, Brasília, 27 mar. 2026. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/poder-governo/planalto-discute-criacao-de-estatal-para-minerar-terras-raras/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- PRESS INFORMATION BUREAU INDIA (PIB INDIA). India's Rare Earth Strategy: Manufacturing, Corridors, and Global Integration. 3 fev. 2026. Disponível em: <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2222413&reg=3&lang=2>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- PROACTIVE INVESTORS. Australian Strategic Materials signs joint statement for Korean cooperation on critical metals. [S.l.]: Proactive Investors, 2021. Disponível em: <https://www.proactiveinvestors.com.au/companies/news/969227/australian-strategic-materials-signs-joint-statement-for-korean-cooperation-on-critical-metals-969227.html>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- RARE EARTH EXCHANGES. Korea's rare earth stagnation: a warning shot in Asia's supply chain chessboard. [S.l.]: Rare Earth Exchanges, 9 jan. 2026. Disponível em: <https://rareearthexchanges.com/news/koreas-rare-earth-stagnation-a-warning-shot-in-asias-supply-chain-chessboard/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- RESOURCES FOR THE FUTURE (RFF). The strategic game of rare earths: Why China May only be in favor of temporary export restrictions. RFF Issue Brief, 7 out. 2025. Disponível em: <https://www.rff.org/publications/issue-briefs/the-strategic-game-of-rare-earths-why-china-may-only-be-in-favor-of-temporary-export-restrictions/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- S&P GLOBAL. Global Mining Industry Outlook: Market Analysis and Forecasts 2025. New York: S&P Global, 2025. Disponível em: <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/industries/metals-mining>. Acesso em: 10 abr. 2026.

- S&P GLOBAL. India ups the ante on the rare earth value chain. 2026. Disponível em: <https://www.spglobal.com/automotive-insights/en/blogs/2026/03/india-ups-the-ante-on-the-rare-earth-value-chain>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- SALVADOR, R. A estratégia de Lula para transformar o Brasil em potência em terras-raras. Revista Fórum, São Paulo, 27 mar. 2026. Disponível em: <https://revistaforum.com.br/brasil/a-estrategia-de-lula-para-transformar-o-brasil-em-potencia-em-terras-raras/>. Acesso em: 29 mar. 2026.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil. Brasília: SGBb, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2026/marco/estudo-detalha-panorama-do-potencial-de-minerais-estrategicos-no-brasil>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). PlanGeo 2025-2034: Plano Decenal de Mapeamento Geológico Básico. Brasília: SGBa, 2025. Disponível em: https://www.sgb.gov.br/mapeamento_geologico/plangeo.html. Acesso em: 10 abr. 2026.
- SFA OXFORD. Japan–US rare earths deal: securing critical minerals and redefining global supply chains. Oxford: SFA Oxford, out. 2025. Disponível em: <https://www.sfa-oxford.com/market-news-and-insights/japan-us-rare-earths-deal-critical-minerals-supply-chain/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- SHANGHAI METALS MARKET (SMM). Lynas and JARE sign long-term rare earth supply deal with floor price and profit-sharing mechanisms. Xangai: SMM, mar. 2026. Disponível em: <https://news.metal.com/newscontent/103808279>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Rare earths. Mineral Commodity Summaries 2026. Reston: USGS, 2026. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-rare-earths.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- UNITED STATES. Department of State. 2026 Critical Minerals Ministerial. Washington, D.C.: U.S. Department of State, 04 Feb. 2026. Disponível em: <https://www.state.gov/releases/office-of-the-spokesperson/2026/02/2026-critical-minerals-ministerial/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- UNITED STATES. Department of State. United States welcomes new investment in rare earth element production for Serra Verde project in Brazil. Washington, D.C.: U.S. Department of State, 21 out. 2024. Disponível em: <https://2021-2025.state.gov/united-states-welcomes-new-investment-in-rare-earth-element-production-for-serra-verde-project-in-brazil/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- UNITED STATES. *Inflation Reduction Act* of 2022. Public Law 117-169, 136 Stat. 1818. Washington, D.C.: U.S. Government Publishing Office, 16 ago. 2022. Disponível em: <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376/text>. Acesso em: 10 abr. 2026.

CENÁRIO GLOBAL DE TERRAS RARAS E IMPLICAÇÕES PARA O BRASIL: 2026–2040

(16 referências)

- Borges, L.F. EVOLUÇÃO DO PROJETO SERRA VERDE TERRAS RARAS MINAÇU (GO). Apresentação no IV Seminário Brasileiro de Terras Raras, 2017
- Buschow, K.H.J. Rare Earth-Iron Permanent Magnets, in Handbook on physics and chemistry of rare earth v.12, 1989.
- CGEE, Usos e aplicações de terras raras no Brasil: 2012-2030 <https://www.cgee.org.br/web/cgee/w/usuarios-e-aplicacao-de-terras-raras-no-brasil-2012-2030-1>
- Correa, L et alii. Terras raras 25 de novembro de 2025 BTG Pactual Equity Research, 2025 https://content.btgactual.com/research/files/file/pt-BR/2025-11-25T144513.013_Minera_o_Siderurgia_Terras_raras.pdf
- COSTA, ERICK CARDOSO ; LIMA, ARNALDO OLIVEIRA ; DOS SANTOS, MARCIONILA NELI LIMA ; SOUZA, ROBERTO MARTINS ; WENDHAUSEN, PAULO ANTONIO PEREIRA ; XAVIER, FABIO ANTONIO. Exploring the influence of anisotropy and microstructure of the sintered Nd-Fe-B magnet using nanoindentation and scratching tests. Materials Today Communications, v. 39, p. 108857, 2024
- Coura, F. As várias faces da questão: terras raras e a corrida pelo domínio científico-tecnológico. Site do CNPq, 27 de agosto de 2025. <https://www.gov.br/cnpq/pt-br/assuntos/noticias/destaque-em-cti/as-varias-faces-da-questao-terras-raras-e-a-corrida-pelo-dominio-cientifico-tecnologico>

- da Silva, A.L.N.; dos Santos, C.A.L.; de Araújo, R.d.M.R.; Feldhaus, D.; Friedrich, B.; Landgraf, F.J.G.; Guardani, R. Model and Mechanism of Anode Effect of an Electrochemical Cell for Nd or (Nd, Pr) Reduction. *Metals* 2022, 12, 498. <https://doi.org/10.3390/met12030498>
- INCT PATRIA Processamento e Aplicações de Ímãs de Terras Raras para Indústria de Alta Tecnologia. Video de divulgação. <https://www.youtube.com/watch?v=5n2cR6LZUN4>
- International Energy Agency (IEA) Outlook for Rare earth elements. In *Global Critical Minerals Outlook*, p. 161-178. IEA, 2025.
- Lins, F. e Vieira, E.V. Concentração de minérios de terras-raras: uma revisão. <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/127>
- LIU, S. L.; FAN, H. R.; LIU, X.; MENG, J.; BUTCHER, A. R.; YANN, L., YANG, K. F.; LI, X. C. Global rare earth elements projects: new developments and supply chains. *Ore Geology Reviews*, 157, 105428, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105428>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169136823001439?via%3Dihub>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- Murata K.J. e outros, Systematic variation of rare earth in monazite, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, v4, p.292-300
- Nascimento, M. et alii Estudo da separação de terras raras usando sistemas extratantes organofosforados. *Brazilian Applied Science Review*, 2020. <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/10986/9199>
- Shanghai Metals Market. Mercado de NdFeB em 2025: Pressões de Custo e Mudanças nas Políticas de Exportação. Análise SMM. <https://news.metal.com/pt/newscontent/103696189-2025-NdFeB-Market:-Cost-Pressures-and-Export-Policy-Shifts%E3%80%90SMM-Analysis%E3%80%91>
- Takehara, L e Laux, JH organizadores, Terras raras no estado da Bahia : síntese dos principais prospectos. Salvador : CPRM, 2025
- USGS, <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-rare-earths.pdf>

MINERAÇÃO: RESERVAS E PRODUÇÃO DE TERRAS RARAS

(12 referências)

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Sumário Mineral 2025 (ano-base 2024). Brasília: ANM. 87 p., p. 68–73. (2025).
- COMISSÃO BRASILEIRA DE RECURSOS E RESERVAS (CBRR). Guia para Declaração de Informações de Exploração, Recursos Minerais e Reservas Minerais. Edição 2022. 85 p. (2022).
- LAPIDO-LOUREIRO, Francisco E. Terras-Raras no Brasil: depósitos, recursos identificados, reservas. Série Estudos e Documentos, n. 21. Rio de Janeiro: CETEM. 189 p. (1994).
- LAPIDO-LOUREIRO, Francisco E. O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras. Editor: R. Santos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. 216 p. (2013).
- LINS, Fernando F.; VERA, Ysrael M.; DOURADO, Marcelo D. L. Brasil ainda em segundo lugar, com 15% das reservas de terras raras. *Brasil Mineral*, 6 abr. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/ainda-em-segundo-lugar-nova-estimativa-traz-brasil-com-15-das-reservas-de-terras-raras>. (2026).
- LIU, Chunxi et al. Sustainable governance of the global rare earth industry chains: perspectives of geopolitical cooperation and conflict. *Sustainability*, v. 17, art. 4881. 32 p. (2025).
- MATIOLO, Elves. Depósitos minerais e tecnologias aplicadas na concentração de minérios de terras-raras. In: VI Seminário Brasileiro de Terras-Raras. Rio de Janeiro: CETEM, nov. (2023).
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil. 2026 Edition. SGB/CPRM. 82 p., p. 56–58. (2026).
- TIAN-YU ZHAO et al. A comprehensive review on rare earth elements: resources, technologies, applications, and prospects. *Rare Met.*, v. 44, n. 10, p. 7011–7040. (2025).
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral Commodity Summaries 2026. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/mineral-commodity-summaries>. (2026).

VALDIVIEZO, Elbert; LINS, Fernando F. Concentração de minérios de terras-raras: uma revisão. *Série Tecnologia Mineral*, n. 73. 53 p. (1997).

ZHANG, H. et al. *Ecological Economics*, v. 198, art. 107472. (2022).

REFINO: SEPARAÇÃO DOS ÓXIDOS POR EXTRAÇÃO POR SOLVENTE

(67 referências)

ABRÃO, A. Química e tecnologia das terras-raras. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. (1994).

ALEX, P.; SURI, A. K.; GUPTA, C. K. Processing of xenotime concentrate. *Hydrometallurgy*, v. 50, p. 331–338. DOI: 10.1016/S0304-386X(98)00052-8. (1998).

ALMEIDA, S. D. N. Aplicação de nanopartículas superparamagnéticas na tecnologia de terras raras. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/46/46136/tde-08022019-093933/>. (2019).

ALVES, R. C. et al. Selection of a hydrometallurgical process for rare earths extraction from a Brazilian monazite. *Hydrometallurgy*, v. 200, art. 105556. DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105556. (2021).

AMARAL, J. C. B. S.; MORAIS, C. A. Thorium and uranium extraction from rare earth elements in monazite sulfuric acid liquor through solvent extraction. *Minerals Engineering*, v. 23, p. 498–503. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.01.003. (2010).

BRAZILIAN CRITICAL MINERALS. EMA REE Project produces first high grade MREC from field trial. Minas Gerais, Brasil. (2025).

BURTON, M. South Korea, Germany exposed to rare earths shortage, Australia's Arafura says. Reuters. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/energy/south-korea-germany-exposed-rare-earths-shortage-australias-arafura-says-2026-03-25/>. (2026).

CARESTER. Caremag, a subsidiary of Carester, has secured €216 million in financing to build its rare earth recycling and refining facility in France. Disponível em: <https://www.carester.fr/en/caremag-launch/>. (2025).

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR (CDTN). CDTN integra rede de instituições brasileiras para impulsionar soberania tecnológica em terras raras. Disponível em: <https://www.gov.br/cdtm/pt-br/centrais-de-conteudo/noticias/cdtm-integra-rede-de-instituicoes-brasileiras-para-impulsionar-soberania-tecnologica-em-terras-raras>. ([s.d.]).

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM). Projeto do CETEM avança na primeira fase do Desafio GRANIOTER 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/noticias/projeto-do-cetem-avanca-na-primeira-fase-do-desafio-granioter-2024>. (2024).

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM). INPI concede Carta Patente ao CETEM por inovação em tecnologia de terras-raras. Disponível em: <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/noticias/inpi-concede-carta-patente-ao-cetem-por-inovacao-em-tecnologia-de-terras-raras>. ([s.d.]).

COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO (CBMM). Terras raras. In: III Seminário Brasileiro de Terras Raras. (2015).

DEMOL, J. et al. The sulfuric acid bake and leach route for processing of rare earth ores and concentrates: a review. *Hydrometallurgy*, v. 188, p. 123–139. DOI: 10.1016/j.hydromet.2019.05.015. (2019).

DOURADO, M. D. L.; DE CARVALHO, D. G.; VERA, Y. M. Modeling and simulation of samarium and neodymium separation by a solvent extraction process. *Braz. J. Chem. Eng.* DOI: 10.1007/s43153-023-00411-1. (2023).

ENERGY FUELS INC. Energy Fuels announces 2025 results and 2026 guidance. Disponível em: <https://investors.energyfuels.com/2026-02-26-Energy-Fuels-Announces-2025-Results-and-2026-Guidance>. (2026a).

ENERGY FUELS INC. Energy Fuels announces first U.S. primary production of critical “heavy” rare earth material in decades. Disponível em: <https://investors.energyfuels.com/2026-03-25-Energy-Fuels-Announces-First-U-S-Primary-Production-of-Critical-Heavy-Rare-Earth-Material-in-Decades>. (2026b).

ENERGY FUELS INC. Annual Report on Form 10-K for the year ended December 31, 2025. (2026c).

EUR-LEX. Official Journal of the European Union. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/TodayOJ/index.html>. ([s.d.]).

- FELIPE, E. C. B.; BATISTA, K. A.; LADEIRA, A. C. Q. Recovery of rare earth elements from acid mine drainage by ion exchange. *Environmental Technology*, v. 42, p. 2721–2732. DOI: 10.1080/09593330.2020.1713219. (2021).
- GIESE, E. C.; DE SOUZA, A. C. S. P. Recovery of rare-earth elements from Brazilian ion-adsorption clay: a preliminary study. *Orbital: Electron. J. Chem.*, v. 14, p. 10–14. DOI: 10.17807/orbital.v14i1.1569. (2022).
- GUPTA, C. K.; KRISHNAMURTHY, N. *Extractive metallurgy of rare earths*. Boca Raton: CRC Press. (2015).
- HE, J. et al. Leaching of fluorine and rare earths from bastnaesite calcined with aluminum hydroxide and the recovery of fluorine as cryolite. *RSC Adv.*, v. 7, p. 14053–14059. DOI: 10.1039/C6RA28106K. (2017).
- INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL (INB). INB e sua participação em terras raras. (2012).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). *Didímio no Brasil*. São Paulo: IPT. (2016).
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). *Obtenção de didímio metálico a partir dos óxidos de terras raras produzidos em Araxá, Brasil*. São Paulo: IPT. (2022).
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global Critical Minerals Outlook 2025: overview of outlook for key minerals*. Paris: IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025/overview-of-outlook-for-key-minerals>. (2025).
- IREL (INDIA) LIMITED. Request for Proposal for Selection of Manpower Staffing Agency. Índia. (2025).
- IREL (INDIA) LIMITED. OSCOM – Rare Earth Extraction Plant. Disponível em: <https://www.irel.co.in/oscom-rare-earth-extraction-plant>. ([s.d.]a).
- IREL (INDIA) LIMITED. Rare Earths Division, Aluva. Disponível em: <https://www.irel.co.in/rare-earths-division-aluva>. ([s.d.]b).
- IREL (INDIA) LIMITED. RE Division, Aluva, Kerala: Tender. Índia. ([s.d.]c).
- LIU, S.; PATTON, D. China bans export of rare earths processing tech over national security. Reuters. Disponível em: <https://www.reuters.com/markets/commodities/china-bans-export-rare-earths-processing-technologies-2023-12-21/>. (2023).
- LYNAS RARE EARTHS. About us. Disponível em: <https://lynasrareearths.com/about-us/>. ([s.d.]a).
- LYNAS RARE EARTHS. Kuantan, Malaysia. Disponível em: <https://lynasrareearths.com/kuantan-malaysia-2/>. ([s.d.]b).
- LYNAS RARE EARTHS. US markets. Disponível em: <https://lynasrareearths.com/products-our-products/us-markets/>. ([s.d.]c).
- LYNAS RARE EARTHS LTD. Annual report – Appendix 4E. Austrália. (2025a).
- LYNAS RARE EARTHS LTD. Quarterly report. Austrália. (2025b).
- MAGNEQUENCH. Magnequench starts building Estonia RE magnet plant. Argus Media. Disponível em: <https://www.argusmedia.com/en/news-and-insights/latest-market-news/2465359-magnequench-starts-building-estonia-re-magnet-plant>. ([s.d.]).
- MISHRA, N. How Japan's rare earth industry flourished under Shinzo Abe. Disponível em: <https://capssindia.org/how-japans-rare-earth-industry-flourished-under-shinzo-abe/>. ([s.d.]).
- MOFCOM – MINISTRY OF COMMERCE OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. Announcement No. 18 of 2025: decision to implement export control on some medium and heavy rare earth related items. Disponível em: https://english.mofcom.gov.cn/Policies/AnnouncementsOrders/art/2025/art_0dd87cbee7b045bf93fabe6ab2faceee.html. (2025).
- MP MATERIALS CORP. Annual Report on Form 10-K for the fiscal year ended December 31, 2024. Estados Unidos: U.S. Securities and Exchange Commission. (2025).
- MP MATERIALS CORP. mp-20251231. U.S. Securities and Exchange Commission. (2026a).
- MP MATERIALS CORP. MP Materials reports fourth quarter and full year 2025 results. Disponível em: <https://investors.mpmaterials.com/investor-news/news-details/2026/MP-Materials-Reports-Fourth-Quarter-and-Full-Year-2025-Results/default.aspx>. (2026b).
- MP MATERIALS CORP. MP Materials accelerates strategy to reindustrialize the rare earth supply chain. Disponível em: <https://mpmaterials.com/news/mp-materials-accelerates-strategy-to-reindustrialize-the-rare-earth-supply-chain/>. ([s.d.]).

NASCIMENTO, M. et al. Modeling of REE and Fe extraction from a concentrate from Araxá (Brazil). *Minerals*, v. 9, art. 451. DOI: 10.3390/min9070451. (2019).

NEO PERFORMANCE MATERIALS INC. 2024 Annual Information Form. (2025).

PRESS INFORMATION BUREAU (PIB). PIB Headquarters. Disponível em: <http://www.pib.gov.in/PressNoteDetails.aspx?NotelId=155158>. ([s.d.]).

REETEC. REEtec raises NOK 1.2 billion for first industrial plant. Disponível em: <https://www.reetec.no/artikler/reetec-raises-nok-1200-million-for-first-industrial-plant>. ([s.d.]).

REUTERS. China expands rare earths restrictions, targets defense and chips users. Disponível em: <https://www.reuters.com/world/china/china-tightens-rare-earth-export-controls-2025-10-09/>. (2025a).

REUTERS. How China tightened its grip over its rare earth sector. Disponível em: <https://www.reuters.com/world/china/how-china-tightened-its-grip-over-its-rare-earth-sector-2025-07-07/>. (2025b).

REUTERS. Australia's Lynas revamps deal to supply rare earths to Japan. Disponível em: <https://www.reuters.com/world/asia-pacific/australias-lynas-revamps-deal-supply-rare-earths-japan-2026-03-10/>. (2026).

RITCEY, G. M.; ASHBROOK, A. W. Solvent extraction: principles and applications to process metallurgy. Amsterdam; New York: Elsevier/North-Holland. (1979).

ROSENTAL, S. Terras raras. In: Rochas e minerais industriais: usos e especificações. p. 23. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. (2008).

RUSSO, S. C. et al. The fundamentals of rare earth element ion adsorption clay deposits: a mineral systems approach for exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 278, art. 107845. DOI: 10.1016/j.gexplo.2025.107845. (2025).

RYDBERG, J. (org.). Solvent extraction principles and practice. New York: M. Dekker. (2004).

SASKATCHEWAN RESEARCH COUNCIL (SRC). SRC Rare Earth Processing Facility first to produce rare earth metals in North America. Disponível em: <https://www.saskatchewan.ca/government/news-and-media/2024/september/18/src-rare-earth-processing-facility-first-to-produce-rare-earth-metals-in-north-america>. (2024).

SASKATCHEWAN RESEARCH COUNCIL (SRC). Rare Earth Processing Facility. Disponível em: <https://www.src.sk.ca/campaigns/rare-earth-processing-facility>. ([s.d.]a).

SASKATCHEWAN RESEARCH COUNCIL (SRC). Saskatchewan Research Council and REalloys sign historic rare earth partnership agreements. Disponível em: <https://www.src.sk.ca/news/saskatchewan-research-council-and-realloys-sign-historic-rare-earth-partnership-agreements>. ([s.d.]b).

SERRA VERDE. Our operation. Disponível em: <https://www.serraverde.com/operations/>. ([s.d.]).

SHI, Q. et al. Column leaching of ion adsorption rare earth ore at low ammonium concentration. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 19, p. 2135–2145. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.05.199. (2022).

SOLVAY. Solvay third quarter and nine months year 2025 results. França. (2025).

SOLVAY. Solvay advances European rare earths production through capacity expansion. Disponível em: <https://www.solvay.com/en/press-release/solvay-advances-european-rare-earths-production-through-capacity-expansion>. ([s.d.]).

TOYOTA TSUSHO; SOJITZ. Toyota Tsusho and Sojitz to build rare earths processing plant in Vietnam. *Industrial Info*. Disponível em: <https://www.industrialinfo.com/news/article/toyota-tsusho-and-sojitz-to-build-rare-earths-processing-plant-in-vietnam--172752>. ([s.d.]).

UCORE RARE METALS. Ucore will invest US\$ 75 million to establish rare earth metals manufacturing facility in Alexandria. Louisiana Economic Development. Disponível em: <https://www.opportunitylouisiana.gov/news/ucore-will-invest-75-million-to-establish-rare-earth-metals-manufacturing-facility-in-alexandria>. ([s.d.]).

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). Valiosas e versáteis: pesquisas com terras raras mostram caminho para criar cadeia produtiva no Brasil. *Jornal da USP*. Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/valiosas-e-versateis-pesquisas-com-terras-raras-mostram-caminho-para-criar-cadeia-produtiva-no-brasil/>. ([s.d.]).

VERA, Y. M. et al. Processo contínuo para separação de terras-raras leves. (2022).

WALDERSEE, V. et al. China's rare earth export curbs hit the auto industry worldwide. Reuters. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/some-european-auto-supplier-plants-shut-down-after-chinas-rare-earth-curbs-2025-06-04/>. (2025).

XIE, F. et al. A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. *Minerals Engineering*, v. 56, p. 10–28. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.10.021. (2014).

DIRECIONADORES ESTRATÉGICOS PARA UMA ECONOMIA CIRCULAR E SUSTENTÁVEL DE TR

(34 referências)

ALI, S. H. Social and Environmental Impact of the Rare Earth Industries. *Resources*, v. 3, p. 123–134, 2014.

ARSHI, P. S.; VAHIDI, E.; ZHAO, F. Behind the Scenes of Clean Energy: The Environmental Footprint of Rare Earth Products. *ACS SUSTAINABLE CHEMISTRY & ENGINEERING*, v. 6, n. 3, p. 3311–3320, mar. 2018.

BALARAM, V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, v. 10, n. 4, p. 1285–1303, 2019.

BARAKOS, G.; MISCHO, H. Insertion of the social license to operate into the early evaluation of technical and economic aspects of mining projects: Experiences from the Norra Kärr and Bokan Dotson rare earth element projects. *Extractive Industries and Society*, v. 8, n. 2, 1 jun. 2021.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

CHERKEZOVA-ZHELEVA, Zara. Direct Reuse of Spent Nd–Fe–B Permanent Magnets. *Materials*, v. 18, n. 13, p. 2946, 21 jun. 2025. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma18132946>.

CUI, Baozhi; CUI, Jun; BARNARD, Daniel J.; BOND, Leonard J. Internal defect detection and characterization of samarium-cobalt sintered magnets by ultrasonic testing technique. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 570, p. 170524, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170524>.

DÍAZ, Iñaki; BORRO, Diego; IPARRAGUIRRE, Olatz; EIZAGUIRRE, Martxel; RICARDO, Frank A.; MUÑOZ, Nicolás; GIL, Jorge Juan. Robotic system for automated disassembly of electronic waste: unscrewing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 95, p. 103032, out. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103032>.

DOMINIQUE, G. et al. Environmental, health and social acceptability issues associated with rare earth elements: a systematic literature review. *Discover EnvironmentSpringer Nature*, 1 dez. 2025.

GANDHA, Kinjal; NLEBEDIM, Ikenna C.; KUNC, Vlastimil; LARA-CURZIO, Edgar; FREDETTE, Robert; PARANTHAMAN, M. Parans. Additive manufacturing of highly dense anisotropic Nd–Fe–B bonded magnets. *Scripta Materialia*, v. 183, p. 91-95, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.03.012>.

GHEZZI, Francesco; RIZZI, Francesco; ANNUNZIATA, Eleonora; FREY, Marco. Managing dependence on scarce natural resources: how institutional logic and autonomy shape supply chain strategies. *Supply Chain Management: An International Journal*, v. 30, n. 7, p. 38-59, 30 maio 2025. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/scm-05-2024-0358>.

GUARNIERI, Patricia; SILVA, Luiz Paulo de Oliveira; VIEIRA, Valquíria Duarte (org.). *Economia circular: conceitos, dimensões e abordagens*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2026. E-book (275 p.). DOI: <https://doi.org/10.26512/>. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/53703>.

HABIB, Komal. A product classification approach to optimize circularity of critical resources – the case of NdFeB magnets. *Journal of Cleaner Production*, v. 230, p. 90-97, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.048>.

HITACHI, Ltd. Hitachi Constructs and Commences Operation of Elevator Permanent Magnet Motor Recycling Network. Tóquio: Hitachi, 2025. Disponível em: <https://www.hitachi.com/New/cnews/month/2025/12/251223.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2026.

HOGBERG, Stig; PEDERSEN, Thomas Stigsberg; BENDIXEN, Flemming Buus; MIJATOVIC, Nenad; JENSEN, Bogi B.; HOLBOLL, Joachim. Direct reuse of rare earth permanent magnets — Wind turbine generator case study. 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (Icem), p. 1625-1629, set. 2016. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icemach.2016.7732741>.

- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA (2024). Recycling of Critical Minerals. Paris: IEA, 2024.
- LIMA, F. M. R. S.1, CANCHUMANI, G. A. L.1, ALVARADO, L. M. T.1, SAMPAIO, M. S.1 Avaliação do ciclo de vida– ACV da produção de elementos terras raras a partir de um minério brasileiro. XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Belém-PA, 23 a 27 de Outubro 2017.
- LIU, W. S. et al. Water, sediment and agricultural soil contamination from an ion-adsorption rare earth mining area. *Chemosphere*, v. 216, p. 75–83, 1 fev. 2019.
- LONG, F. et al. Leaching Process of Weathered Crust Elution-Deposited Rare Earth Ore by Alkaline Earth Metal Carboxylate. *Minerals*, v. 15, n. 3, 1 mar. 2025.
- MARX, J. et al. Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent Magnet Production from Different Rare Earth Deposits. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, v. 6, n. 5, p. 5858–5867, 2018.
- MCKINSEY & COMPANY. How Apple Is Helping Unearth a Path Toward Increasing the Global Use of Circular Materials. 23 jul. 2025. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/about-us/case-studies/how-apple-is-helping-unearth-a-path-toward-increasing-the-global-use-of-circular-materials>. Acesso em: 4 mar. 2026.
- ORMEROD, John; KARATI, Anirudha; BAGHEL, Ajay Pal Singh; PRODIUS, Denis; NLEBEDIM, Ikenna C.. Sourcing, Refining and Recycling of Rare-Earth Magnets. *Sustainability*, v. 15, n. 20, p. 14901, 16 out. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su152014901>.
- RASPINI, Jéssica Prats; BONFANTE, Mariele Canal; CÔNICO, Franciele Rossetti; ALARCON, Orestes Estevam; CAMPOS, Lucila M. S.. Drivers and barriers to a circular economy adoption: a sector perspective on rare earth magnets. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 24, n. 5, p. 1747-1759, 17 maio 2022. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10163-022-01424-7>
- RIZOS, Vasileios; RIGHETTI, Edoardo; KASSAB, Amin. Developing a supply chain for recycled rare earth permanent magnets in the EU: challenges and opportunities. Brussels: Centre for European Policy Studies – CEPS, Dec. 2022. 57 p.
- SCHÖNFELDT, Mario; OPELT, Konrad; HASAN, Mahmudul; GRÖNINGER, Michael; JAHNKE, Dennis; GASSMANN, Jürgen; GUTFLEISCH, Oliver. Functional Recycling and Reuse of Nd–Fe–B Permanent Magnets from Various Waste Streams for a more Sustainable and Resilient Electromobility. *Advanced Engineering Materials*, v. 27, n. 7, 3 mar. 2025. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/adem.202402815>.
- SMERIGAN, A.; SHI, R. Toward Sustainable Rare Earth Element Production: Key Challenges in Techno-Economic, Life Cycle, and Social Impact Assessment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 14, n. 6, p. 2733–2751, 16 fev. 2026.
- SRIVASTAVA, Ankur; SINGH, Amarendra Kumar; MESHRAM, Arunabh. Underlying advances in rare earth elements recovery from waste: a comprehensive review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 14, n. 1, p. 120957, fev. 2026. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2025.120957>.
- TORTA, Gianluca; CIACCI, Luca; VASSURA, Ivano; PASSARINI, Fabrizio. Exploring mass and economic potentials of rare earth elements recycling from electric vehicles at end-of-life. *Mineral Economics*, v. 37, n. 3, p. 573-587, 15 abr. 2024. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13563-024-00433-2>.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY – DOE. Rare Earth Permanent Magnets: Supply Chain Deep Dive Assessment – Neodymium Magnets Supply Chain Report. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, Office of Policy, Feb. 24, 2022. 82 p.
- U.S. Department of Energy (US DOE). Smith, Braeton J., Riddle, Matthew E., Earlam, Matthew R., Iloeje, Chukwunwike, & Diamond, David (2022). Rare Earth Permanent Magnets: Supply Chain Deep Dive Assessment. <https://doi.org/10.2172/1871577>
- WALTON, A.; YI, Han; ROWSON, N.A.; SPEIGHT, J.D.; MANN, V.s.J.; SHERIDAN, R.s.; BRADSHAW, A.; HARRIS, I.R.; WILLIAMS, A.J.. The use of hydrogen to separate and recycle neodymium–iron–boron-type magnets from electronic waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 104, p. 236-241, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.033>.
- WULF, C. et al. Lessons Learned from a Life Cycle Sustainability Assessment of Rare Earth Permanent Magnets. *Journal of Industrial Ecology*, v. 00, n. 0, p. 1–13, 2017.
- YADAV, Jaishree; SARKER, Shuronjit Kumar; BRUCKARD, Warren; JEGATHEESAN, Veeriah; HAQUE, Nawshad; SINGH, Nahar; PRAMANIK, Biplob Kumar. Greening the supply chain: sustainable approaches for rare earth element recovery from neodymium iron boron magnet waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 12, n. 4, p. 113169, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2024.113169>.

ZHENG, Huandong; DING, Yingui; YOU, Shaowei; DING, Yunji; ZHANG, Shengen; ZHANG, Junping. A comprehensive review of neodymium-iron-boron (NdFeB) waste recycling: processes, mechanisms, and prospects. *Journal of Environmental Management*, v. 391, p. 126513, set. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126513>.

CADEIA PRODUTIVA DE ÍMÃS DE TERRAS RARAS NO BRASIL

(29 referências)

BINNEMANS, Koen et al. Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, v. 51, p. 1–22, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.12.037.

BOLDEA, Ion; NASAR, Syed A. *Electric Drives*. Boca Raton: CRC Press, 2010.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CHEN, Fugang. Recent progress of grain boundary diffusion process of Nd-Fe-B magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 514, 2020. DOI: 10.1016/j.jmmm.2020.167227.

CHEN, Shiyong et al. Progress on grain boundary diffused Nd-Fe-B magnets. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 1050, 2026. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.185724.

Ciência, Tecnologia e Inovação

CONG, Liying et al. Short-process recycling of Nd-Fe-B sintered magnet sludge wastes. *Journal of Rare Earths*, v. 41, n. 10, p. 1467–1477, 2023. DOI: 10.1016/j.jre.2023.04.019.

CROAT, James J. Rapidly solidified rare-earth-iron-boron permanent magnet materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 74, p. 307–314, 1988. DOI: 10.1016/0304-8853(88)90094-5.

GUPTA, Chiranjib Kumar; KRISHNAMURTHY, Nagaiyar. *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. Boca Raton: CRC Press, 2005.

GUTFLEISCH, Oliver et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient. *Advanced Materials*, v. 23, p. 821–842, 2011. DOI: 10.1002/adma.201002180.

HABASHI, Fathi. Extractive metallurgy of rare earths. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 52, n. 3, p. 224–233, 2013. DOI: 10.1179/1879139513Y.0000000091.

HERBST, John F. R2Fe14B materials: Intrinsic properties and technological aspects. *Reviews of Modern Physics*, v. 63, n. 4, p. 819–898, 1991. DOI: 10.1103/RevModPhys.63.819.

HOLCOMBE, Benjamin et al. Sustainable and energy-efficient production of rare-earth metals by chloride-based molten salt electrolysis. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2024. DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c07720.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global Critical Minerals Outlook 2024*. Paris: IEA, 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Paris: IEA, 2021.

ISBN 978-85-60755-64-6

KAYA, Muammer. An overview of NdFeB magnets recycling technologies. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, v. 46, 2024. DOI: 10.1016/j.cogsc.2024.100884.

LIAO, Chao et al. Research status of electrolytic preparation of rare earth metals and alloys. *Metals*, v. 14, n. 4, 2024. DOI: 10.3390/met14040407.

MASSARI, Stefania; RUBERTI, Marcello. Rare earth elements as critical raw materials. *Resources Policy*, v. 38, p. 36–43, 2013. DOI: 10.1016/j.resourpol.2012.06.012.

Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. *Comex Stat: sistema oficial de estatísticas do comércio exterior brasileiro*. Brasília: MDIC, 2026. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2026.

OBSERVATORY OF ECONOMIC COMPLEXITY. *Brazil imports electromagnets and permanent magnets*. Cambridge: OEC, 2024. Disponível em: <https://oec.world>. Acesso em: 10 abr. 2026.

- PAVEL, Claudiu C. et al. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resources Policy*, v. 52, p. 349–357, 2017. DOI: 10.1016/j.resourpol.2017.04.003.
- RESEARCH AND MARKETS. The global rare earth magnets market 2026-2036: strategic positioning, technology capabilities, production capacity and development initiatives. Dublin: Research and Markets, 2025. Disponível em: <https://www.researchandmarkets.com/reports/6113522/the-global-rare-earth-magnets-market>. Acesso em: 9 mar. 2026
- SAGAWA, Masato et al. New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe. *Journal of Applied Physics*, v. 55, n. 6, p. 2083–2087, 1984. DOI: 10.1063/1.333572.
- SEPEHRI-AMIN, H.; OHKUBO, T.; HONO, K. The mechanism of coercivity enhancement by the grain boundary diffusion process of Nd–Fe–B sintered magnets. *Acta Materialia*, v. 60, p. 819–830, 2012. DOI: 10.1016/j.actamat.2011.10.049.
- WIDMER, James D. et al. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 3, p. 7–13, 2015. DOI: 10.1016/j.susmat.2015.02.001.
- WORLD BANK. Brazil imports of permanent magnets (HS 850511). World Integrated Trade Solution (WITS). Disponível em: <https://wits.worldbank.org>. Acesso em: 10 abr. 2026
- XIE, F. et al. Rare earths extraction and separation—An overview. *Journal of Rare Earths*, v. 32, n. 5, p. 409–419, 2014. DOI: 10.1016/S1002-0721(14)60090-3.
- YANG, Yongxiang et al. Recycling of NdFeB permanent magnets. *Journal of Sustainable Metallurgy*, v. 3, p. 122–149, 2017. DOI: 10.1007/s40831-016-0090-4.

CADEIA PRODUTIVA DE LIGAS METÁLICAS PORTADORAS DE TR NO BRASIL

(18 referências)

- GLOBAL MARKET INSIGHTS. Rare Earth Metals Market Size, Share & Growth Report, 2034. Selbyville: Global Market Insights Inc., 2025. Disponível em:
- GUTFLEISCH, O. et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter and more energy efficient. *Advanced Materials*, v. 23, p. 821-842, 2011.
- <https://www.gminsights.com/industry-analysis/rare-earth-metals-market>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- <https://www.verifiedmarketreports.com/product/nickel-metal-hydride-ni-mh-battery-market/>
- IDTECHEx. Rare Earth Magnets 2026–2036: Technologies, Supply Chains and Markets. Cambridge: IDTechEx, 2025.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: IEA, 2021. ISBN 978-85-60755-64-6
- LIU, Z.; LI, H.; WANG, J. Rare earth elements in steel: a review of applications and mechanisms. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 3, p. 4506-4516, 2020.
- MARKETINTELO. Rare Earth Metal Alloy Market Size and Forecast 2024–2033. Pune: MarketIntelto, 2025.
- Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. Comex Stat: sistema oficial de estatísticas do comércio exterior brasileiro. Brasília: MDIC, 2026. Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- NATURAL RESOURCES CANADA. Rare Earth Elements Facts. Ottawa: Government of Canada, 2024. Disponível em: <https://natural-resources.canada.ca/minerals-mining/mining-data-statistics-analysis/minerals-metals-facts/rare-earth-elements-facts>
- NKIAWETE, M. M. et al. Rare earth elements: sector allocations and supply chain implications. *Journal of Rare Earths*, 2025.
- TOMASZ, K. et al. Effect of mischmetal addition on the morphology and composition of inclusions in cast steel. *Archives of Foundry Engineering*, v. 24, n. 3, p. 75-82, 2024.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Rare Earth Permanent Magnets: Supply Chain Deep Dive Assessment. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2022.
- VERIFIED MARKET RESEARCH. Nickel Metal Hydride (Ni-MH) Battery Market Size, Share, Growth & Forecast. Wilmington: Verified Market Research, 2025. Disponível em:

CADEIA PRODUTIVA DE CATALISADORES À BASE DE TR NO BRASIL

(86 referências)

- AITANI, A. M. et al. Maximizing propylene production via FCC technology. *Applied Petrochemical Research*, v. 5, p. 357–392, 2015.
- AKAH, A.; AL-GHRAMI, M. A review on production of light olefins via fluid catalytic cracking. *Energies*, v. 14, n. 4, p. 1089, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE MOTOCICLETAS, CICLOMOTORES, MOTONETAS, BICICLETAS E SIMILARES (ABRACICLO). Declarações sobre evolução tecnológica das motocicletas e emissões de poluentes. In: Agência de Notícias do Acre. *Motos poluem até 17 vezes mais que os automóveis*. Rio Branco, 2006. Disponível em: <https://agencia.ac.gov.br/motos-poluem-at-17-vezes-mais-que-os-automveis/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Minerais críticos: oportunidades e desafios para a indústria brasileira. Agência BNDES de Notícias, Rio de Janeiro, mar. 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/blogdodesenvolvimento/detalhe/Minerais-criticos-oportunidades-e-desafios-para-a-industria-brasileira/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BARTHOLOMEW, C. H.; FARRAUTO, R. J. *Fundamentals of Industrial Catalytic Processes*. 2. ed. Hoboken: Wiley-AIChE, 2006.
- BASF. BASF celebrates 15th anniversary of Indaiatuba, Brazil, emissions catalysts production plant. Iselin, NJ: BASF SE, 24 mar. 2015. Disponível em: <https://catalysts.basf.com/news/basf-celebrates-15th-anniversary-of-indaiatuba-brazil-emissions-catalysts-production-plant>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BASF. Chemical Catalysts and Adsorbents. 2026. Disponível em: <https://chemical-catalysts-and-adsorbents.basf.com/global/en>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BRASIL ENERGIA. FCC S.A. consolida posição como fabricante de referência de catalisadores FCC na América do Sul. [S.l.]: Brasil Energia, 2025.
- BRASIL. Câmara dos Deputados. Projeto de Lei nº 2.780, de 2024. Institui a Política Nacional de Minerais Críticos e Estratégicos (PNMCE), o Comitê de Minerais Críticos e Estratégicos (CMCE), vinculado ao Conselho Nacional de Política Mineral, e dá outras providências. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, 2024. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2447259>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BRASIL. Lei n.º 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 24 set. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9503compilado.htm. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME); Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂). Brasília: MME/EPE, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC). Nova Indústria Brasil (NIB): Política Industrial 2024–2033. Brasília: MDIC, jan. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2024/janeiro/brasil-ganha-nova-politica-industrial-com-metas-e-acoes-para-o-desenvolvimento-ate-2033>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- BRASIL. Presidência da República. Lei n.º 14.948, de 16 de agosto de 2024: institui o marco legal do hidrogênio de baixo carbono. Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14948.htm. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CABRAL NETO, I.; ABRAM, M. B.; ALMEIDA, R. C. et al. (org.). *An overview of critical and strategic minerals potential of Brazil*: 2026 edition. [S. l.]: Geological Survey of Brazil, 2026.
- CERQUEIRA, H. S.; CAEIRO, G.; COSTA, L.; RAMÔA RIBEIRO, F. Deactivation of FCC catalysts. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, v. 292, n. 1-2, p. 1-13, 2008.
- CLARIVATE ANALYTICS. Derwent Innovations Index. Clarivate Analytics, 2026. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CLEAN AIR TASK FORCE (CATF). *Technical and Cost Considerations for Decarbonizing the "Refinery of the Future"*. Boston: CATF, 2025. Disponível em: <https://www.catf.us/resource/refinery-of-the-future/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CLOUGH MASTRY, M. et al. Processing renewable and waste-based feedstocks with fluid catalytic cracking: impact on catalytic performance and considerations for improved catalyst design. *Frontiers in Chemistry*, v. 10, article number 1067488, 2023.

- COLUMBIA GLOBAL ENERGY POLICY (CGEP). Developing a Low-carbon Hydrogen Industry in Brazil: Roundtable Report. New York: Columbia University SIPA/CGEP, set. 2024. Disponível em: <https://www.energypolicy.columbia.edu/publications/developing-a-low-carbon-hydrogen-industry-in-brazil-roundtable-report/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). PROCONVE – Programa de Controle de Emissões Veiculares. São Paulo: CETESB, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/proconve/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). São Paulo lança novo plano de controle de poluição do ar: PCPV 2020-2022. São Paulo: CETESB, 1 fev. 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/blog/2021/02/01/sao-paulo-lanca-novo-plano-de-controle-de-poluicao-do-ar/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Euro 7: Council adopts new rules on emission limits for cars, vans and trucks. Bruxelas: Consilium, 12 abr. 2024. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/04/12/euro-7-council-adopts-new-rules-on-emission-limits-for-cars-vans-and-trucks/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n.º 18, de 6 de maio de 1986. Institui o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jun. 1986.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n.º 256, de 30 de junho de 1999. Dispõe sobre a implementação das inspeções de gases e ruído em veículos automotores em uso. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 ago. 1999.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n.º 297, de 26 de fevereiro de 2002. Estabelece os limites para emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos – PROMOT. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 13 mar. 2002a.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n.º 490, de 16 de novembro de 2018. Estabelece a Fase PROCONVE P8 de exigências para veículos automotores pesados novos de uso rodoviário. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 nov. 2018b.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n.º 492, de 20 de dezembro de 2018. Estabelece as Fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 para veículos automotores leves novos de uso rodoviário. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 dez. 2018a.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução n.º 493, de 24 de junho de 2019. Estabelece a Fase PROMOT M5 para controle de emissões de gases poluentes e de ruído por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 jun. 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-493-de-24-de-junho-de-2019-173020570>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Baseline to Support the Brazilian Hydrogen Strategy. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrog%C3%AAnio_EN_revMAE%20\(1\).pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/NT_Hidrog%C3%AAnio_EN_revMAE%20(1).pdf). Acesso em: 10 abr. 2026.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Hidrogênio e biomassa: oportunidades para produção e uso de hidrogênio em sistemas de bioenergia. Nota Técnica EPE/DPG/SDB/2025/02. Rio de Janeiro: EPE; Ministério de Minas e Energia, jun. 2025.
- FÁBRICA CARIOCA DE CATALISADORES S.A. (FCC). Sobre a FCC S.A. Rio de Janeiro: FCC S.A., 2026. Disponível em: <https://www.fccsa.com.br/en/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- FARRAUTO, R. J.; DEEBA, M. Catalysis for Environmental Control. In: HORVATH, I. T. (ed.). Encyclopedia of Catalysis. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/0471227617.eoc029>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (FAPESP). Projetos Financiados: Reciclagem e Recuperação de Elementos Terras Raras a partir de Catalisadores Exauridos. São Paulo: FAPESP, 2024. Disponível em: <https://www.fapesp.br>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- GANDUGLIA-PIROVANO, M. V.; HOFMANN, A.; SAUER, J. Oxygen vacancies in transition metal and rare earth oxides: current state of understanding and remaining challenges. Surface Science Reports, v. 62, n. 6, p. 219–270, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2006.12.001>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- GARBAYO, I. et al. A review on critical metals used in solid oxide cells for power ⇔ X applications and materials recyclability. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, Washington, D.C., v. 12, n. 14, p. 5387-5409, 2024.
- GLOBAL GROWTH INSIGHTS. FCC Catalyst market: size, share & forecast 2025-2033. Global Growth Insights, 2025. [S.l.]: Disponível em: <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/fcc-catalyst-market-118571>. Acesso em: 10 abr. 2026.

- IEA BIOENERGY TASK 39. Update on drop-in biofuel and co-processing commercialization. Paris: IEA Bioenergy, jun. 2024. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/09/IEA-Bioenergy-Task-39-drop-in-biofuels-and-co-processing-report-June-2024.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Minerais críticos e estratégicos no Brasil: Um passaporte para o futuro. E-book. 1 ed. Brasília: IBRAM, 2025.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. (IBAMA). Air Pollution Control Program by Motor Vehicles (PROCONVE). Brasília, DF: IBAMA, 2011. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/phocadownload/veiculosautomotores/manual_proconve_promot_english.pdf. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). China's Stage VI Emissions Standard for Heavy-duty Vehicles (Final Rule). Washington, DC: ICCT, 2018. Disponível em: <https://theicct.org/publication/chinas-stage-vi-emissions-standard-for-heavy-duty-vehicles-final-rule/>. Acesso em: 20 mar. 2026.
- INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). Euro 7: The New Emission Standard for Light- and Heavy-duty Vehicles in the European Union. Washington, DC: ICCT, mar. 2024. Disponível em: <https://theicct.org/publication/euro-7-emission-standard-ldv-hdv-eu-mar24/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). Norma PROCONVE P-8 de Emissões no Brasil. Washington, DC: ICCT, fev. 2019. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/P8_emission_Brazil_policyupdate_20190227.pdf. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global Critical Minerals Outlook* 2025. Paris: IEA, 2025a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global Hydrogen Review* 2025. Paris: IEA, 2025b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Recycling of critical minerals: strategies to scale up recycling and urban mining. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/recycling-of-critical-minerals>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. Paris: IEA, 2021. (World Energy Outlook Special Report). Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). Compendium of Chemical Terminology: the "Gold Book". 2. ed. (versão 2.3.3). Research Triangle Park: IUPAC, 2014. Disponível em: <https://goldbook.iupac.org>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- JOHNSON MATTHEY PLC. Annual Report and Accounts 2024. Royston: Johnson Matthey, 2024. Disponível em: <https://matthey.com/investors/results-reports-and-presentations-archive>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- JOHNSON MATTHEY. PGM Market Report 25. Londres: Johnson Matthey, 2025. Disponível em: https://matthey.com/documents/161599/509428/PGM_Market_Report_25.pdf/5f4e4078-8e9a-3c96-d334-9d14da9de094?t=1747159713413. Acesso em: 10 abr. 2026.
- KERR, C. The systems approach of strategic roadmapping: Framing challenges and contributions whilst flexing to changing conditions and circumstances. *Systems Research and Behavioral Science*, v.40,p. 701-712, 2023.
- KOLB, G. Fuel Processing for Fuel Cells. Weinheim: Wiley-VCH, 2008.
- KUMAR, A. et al. Automobile pollution control using catalysis. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, v. 8, p. 200013, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2020.200013>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- LIMA, S. M. et al. Hydrogen production from ethanol for PEM fuel cells: an integrated fuel processor comprising ethanol steam reforming and preferential oxidation of CO. *Catalysis Today*, v. 146, p. 110–123, 2009.
- MANKINS, John C. Technology readiness assessments: a retrospective. *Acta Astronautica*, v. 65, n. 9--10, p. 1216--1223, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.03.058>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MARKET.US. Cerium Market: Global Insights, Size, Share & Forecast 2025-2034. [S.l.]: Market.us, 2025. Disponível em: <https://market.us/report/global-cerium-market>. Acesso em: 10 abr. 2026.

- MATTOS, L. V.; JACOBS, G.; DAVIS, B. H.; NORONHA, F. B. Production of hydrogen from ethanol: review of reaction mechanism and catalyst deactivation. *Chemical Reviews*, v. 112, n. 7, p. 4094–4123, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/cr2000114>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MINDREAU, M. The relaunching of industrial policy in Brazil: What have rare earths got to do with it? *The Extractive Industries and Society*, v. 24, article number 101723, 2025.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Brasil apresenta políticas para ampliar a produção e transformação de minerais estratégicos. Notícias MME, Brasília, ago. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-apresenta-politicas-para-ampliar-a-producao-e-transformacao-de-minerais-estrategicos-em-conferencia-internacional>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MONTINI, T.; MELCHIONNA, M.; MONAI, M.; FORNASIERO, P. Fundamentals and catalytic applications of CeO₂-based materials. *Chemical Reviews*, v. 116, n. 10, p. 5987-6041, 2016.
- MORDOR INTELLIGENCE. Automotive Catalytic Converter Market – Size, Share & Trends Analysis Report (2025–2030). [S.l.]: Mordor Intelligence, 2026. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/automotive-catalytic-converter-market>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2024/1257, de 24 de abril de 2024. Relativo à homologação de veículos a motor e motores no que respeita às suas emissões e durabilidade das baterias (Euro 7). *Jornal Oficial da União Europeia*, L 1257, 2024.
- PEREIRA, F. et al. From characterization to discovery: artificial intelligence, machine learning and high-throughput experiments for heterogeneous catalyst design. *ACS Catalysis*, v. 14, n. 15, p. 11749–11779, 2024.
- PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. (PETROBRAS). Petrobras technology enables Riograndense Refinery to process 100% renewable feedstocks. Rio de Janeiro: Agência Petrobras, 8 nov. 2023. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/en/business/petrobras-technology-enables-riograndense-refinery-to-process-100-renewable-feedstocks-08-11-2023/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. (PETROBRAS). Petrobras technology, Riograndense Refinery becomes first to produce fuels with cellulosic content in Brazil. Rio de Janeiro: Agência Petrobras, mar. 2025a. Disponível em: <https://agencia.petrobras.com.br/en/w/negocio/com-tecnologia-petrobras-refinaria-riograndense-e-a-primeira-a-produzir-combustiveis-com-conteudo-celulosico-no-brasil>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. (PETROBRAS). Plano Estratégico 2050 e Plano de Negócios 2026-2030. Rio de Janeiro: Petrobras, 2025b. Disponível em: <https://petrobras.com.br/quem-somos/estrategia>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- PODER360. Cancelada em 2014, inspeção veicular em SP não volta mais. São Paulo: Poder360, 18 set. 2024. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/poder-sustentavel/cancelada-em-2014-inspecao-veicular-em-sao-paulo-nao-volta-mais/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- PwC BRASIL. Brasil na era dos minerais críticos: potencial, desafios e rotas para o protagonismo. São Paulo: PricewaterhouseCoopers Brasil, jan. 2026. Disponível em: <https://www.pwc.com.br/pt/estudos/setores-atividade/mineracao-e-siderurgia/2025/brasil-na-era-dos-minerais-criticos.html>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- SHELL CATALYSTS & TECHNOLOGIES. Shell Catalysts & Technologies announces collaboration with Licella to develop global low-carbon biomass-to-biofuel commercial solutions. Shell Global, 7 nov. 2024. Disponível em: <https://www.shell.com/business-customers/catalysts-technologies/resources-library/shell-catalysts-licella-low-carbon-aviation-fuel.html>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- SINOPEC RESEARCH INSTITUTE OF PETROLEUM PROCESSING. Deep Catalytic Cracking Technology (DCC). Beijing: Sinopec RIPP, 2022. Disponível em: http://ripp.sinopec.com/ripp/en/TechnicalSolutions/RefiningTechnologies/20220907/news_20220907_570604457308.shtml. Acesso em: 10 abr. 2026.
- SIQUEIRA, A. F. et al. A review on the use of catalysis for biogas steam reforming. *Catalysts*, v. 13, n. 12, p. 1482, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/catal13121482>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- SOUSA-AGUIAR, E. F.; TRIGUEIRO, F. E.; ZOTIN, F. M. Z. The role of rare earth elements in zeolites and cracking catalysts. *Catalysis Today*, v. 218-219, p. 115-122, 2013.

- SPHERICAL INSIGHTS & CONSULTING. Top 30 Rare Earth Catalytic Materials Market Share, Size & News Report 2035. [S.l.]: Spherical Insights, 6 out. 2025. Disponível em: <https://www.sphericalinsights.com/blogs/top-30-rare-earth-catalytic-materials-market-companies-in-globe-2025-statistics-view-by-spherical-insights-and-consulting>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- STRAITS RESEARCH. Refinery Catalysts Market: Size, Share & Trends Analysis 2025-2033. [S.l.]: Straits Research, 2025. Disponível em: <https://straitsresearch.com/report/refinery-catalysts-market>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- UMICORE. Automotive Catalysts – Who we are. Bruxelas: Umicore, 2024a. Disponível em: <https://ac.umicore.com/en/about/who-we-are/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- UMICORE. Contact – Umicore Automotive Catalysts. Bruxelas: Umicore, 2024b. Disponível em: <https://ac.umicore.com/en/contact>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- UNIÃO EUROPEIA (UE). Regulamento (UE) 2024/1257 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 24 de abril de 2024, relativo à homologação de veículos a motor e motores, no que diz respeito às suas emissões e durabilidade das baterias (Euro 7). Jornal Oficial da União Europeia, L 2024/1257, 8 maio 2024. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R1257>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral Commodity Summaries 2025: Rare Earths. Reston: USGS, 2025. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-rare-earth.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- VÁSQUEZ, P. I. Brazil's Critical Minerals and the Global Clean Energy Revolution. Wilson Center – Latin American Program, Washington, D.C., set. 2024. Disponível em: <https://www.wilsoncenter.org/article/brazils-critical-minerals-and-global-clean-energy-revolution>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- VOGT, E. T. C.; WECKHUYSSEN, B. M. Fluid catalytic cracking: recent developments on the grand old lady of zeolite catalysis. Chemical Society Reviews, v. 44, p. 7342–7370, 2015.
- WANG, P. et al. Regional rare-earth element supply and demand balanced with circular economy strategies. Nature Geoscience, v. 17, p. 94–102, 2024.
- WENZEL, M. et al. Hydrometallurgical recovery of rare earth metals from spent FCC catalysts. In: ALAM, S. et al. (ed.). Rare Metal Technology 2016. Cham: Springer, 2016. p. 27–34. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-48135-7_4. Acesso em: 10 abr. 2026.
- XU, Y. et al. Targeted catalytic cracking to olefins (TCO). Engineering, v. 25, p. 49–60, jun. 2023.
- YAO, Z. et al. Effective emissions reduction of high-mileage fleets through a catalytic converter and oxygen sensor replacement program. Science of the Total Environment, v. 853, p. 158614, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158614>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- ZHAO, Z. et al. Recovery of rare earth elements from spent fluid catalytic cracking catalysts using leaching and solvent extraction techniques. Hydrometallurgy, v. 167, p. 183–188, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.11.013>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- ZHENG, Y. et al. High temperature solid oxide electrolysis for green hydrogen production. Chemical Reviews, Washington, D.C., v. 124, n. 18, p. 10509–10576, 2024. DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00795.
- ZHONG, M. et al. Automation and machine learning augmented by large language models in a catalysis study. RSC Digital Discovery, 2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11304797/>. Acesso em: 10 abr. 2026.

CADEIA PRODUTIVA DE FÓSFOROS DE TR NO BRASIL

(66 referências)

- ABILUX — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ILUMINAÇÃO. Panorama da indústria de iluminação no Brasil 2023-2024. São Paulo: ABILUX, 2024.
- ABNT — ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16048: Produtos de iluminação — diodos emissores de luz (LED) — Requisitos de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE SAÚDE SUPLEMENTAR (ANS). Dados do setor: equipamentos de diagnóstico por imagem no Brasil 2024. Rio de Janeiro: ANS, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ans>. Acesso em: 10 abr. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Infográfico ABSOLAR: energia solar fotovoltaica no Brasil — panorama 2025. São Paulo: ABSOLAR, 2025. Disponível em: <https://www.absolar.org.br>. Acesso em: 10 abr. 2026.

AUZEL, F. Upconversion and anti-Stokes processes with f and d ions in solids. *Chemical Reviews*, v. 104, n. 1, p. 139-174, 2004.

BHARAT, S.; BHARAT, D. Rare earth-based phosphors for biomedical imaging and diagnostics. *Advanced Materials Reviews*, v. 3, n. 2, p. 78-112, 2024.

BINNEMANS, K. et al. Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production*, v. 51, p. 1-22, 2013.

BLASSE, G.; GRABMAIER, B. C. Luminescent materials. Berlin: Springer-Verlag, 1994. 232 p. ISBN 978-3-540-58019-5.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BÜNZLI, J.-C. G.; ELISEEVA, S. V. Basics of lanthanide photophysics. In: HÄNNINEN, P.; HÄRMÄ, H. (ed.). *Lanthanide luminescence: photophysical, analytical and biological aspects*. Berlin: Springer, 2011.

BÜNZLI, J.-C. G.; ELISEEVA, S. V. Lanthanide luminescence for functional materials and biosciences. *Chemical Science*, v. 4, n. 5, p. 1939-1949, 2013.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). Usos e aplicações de terras raras no Brasil: 2012-2030. Brasília: CGEE, 2013. Disponível em: https://www.cgge.org.br/documents/10195/734063/Terras_Raras_Web_9532.pdf. Acesso em: 10 abr. 2026.

CHAKRABORTY, A.; MITRIĆ, J.; DUBEY, V. A review report on rare earth activated phosphors for bioimaging applications. In: DUBEY, V. et al. (ed.). *Upconversion luminescence of phosphors*. (Progress in Optical Science and Photonics, v. 39). Singapore: Springer, 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-95-1762-6_3

CHEN, M. et al. The recycling of rare earths from waste tricolor phosphors in fluorescent lamps: a review of processes and technologies. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 88, p. 21-31, 2014.

CLARIVATE ANALYTICS. Derwent Innovations Index. Clarivate Analytics, 2026. Acesso em: 10 abr. 2026.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Anuário mineral brasileiro: terras raras. Brasília: CPRM/SGB, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/mineracao/anuario-mineral>. Acesso em: 10 abr. 2026.

DE SÁ, G. F. et al. Spectroscopy of europium(III), terbium(III) and other Ln(III) chelates. *Coordination Chemistry Reviews*, v. 196, n. 1, p. 165-195, 2000.

DE WILD, J. et al. Upconversion solar cells: materials and applications. *Energy & Environmental Science*, v. 4, n. 12, p. 4835-4848, 2011.

DISPLAY SUPPLY CHAIN CONSULTANTS (DSCC). OLED *display* market forecast 2024-2032. Boston: DSCC, 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2025. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2025.

EUROPEAN COMMISSION. *Critical Raw Materials Act: Regulation (EU) 2024/1252*. Brussels: Official Journal of the European Union, 2023. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu>. Acesso em: 10 abr. 2026.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ (FIOCRUZ). Estratégia de inovação em saúde digital e diagnósticos de precisão 2023-2030. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2024.

GLOBAL GROWTH INSIGHTS. Light emitting diode (LED) phosphor market size, share & outlook to 2033. [S.l.]: Global Growth Insights, 2025a. Disponível em: <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/light-emitting-diode-led-phosphor-market-111808>. Acesso em: 10 abr. 2026.

GLOBAL GROWTH INSIGHTS. Rare earth phosphors market. [S.l.]: Global Growth Insights, 2025b. Disponível em: <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/rare-earth-phosphors-market-121353>. Acesso em: 10 abr. 2026.

GRAND VIEW RESEARCH. Inorganic scintillators market size, share & growth report, 2030. San Francisco: Grand View Research, 2024c. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/inorganic-scintillators-market>. Acesso em: 10 abr. 2026.

GRAND VIEW RESEARCH. OLED *display* market size, share & trends analysis report by technology, by application, by *display* size, by region, and segment forecasts, 2025-2033. San Francisco: Grand View Research, 2024b. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/oled-display-industry>. Acesso em: 10 abr. 2026.

- GRAND VIEW RESEARCH. Phosphor market size, share & trends analysis report by product, by application, by region, and segment forecasts, 2024-2032. San Francisco: Grand View Research, 2024a. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- IDRIS, N. M. et al. In vivo photodynamic therapy using upconversion nanoparticles as remote-controlled nanotransducers. *Nature Medicine*, v. 18, n. 10, p. 1580-1585, 2012.
- IMARC GROUP. Rare earth elements market: global industry trends, share, size, growth, opportunity and forecast 2024-2032. [S.l.]: IMARC Group, 2025. Disponível em: <https://www.imarcgroup.com>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Minerais críticos e estratégicos no Brasil: Um passaporte para o futuro. E-book. 1 ed. Brasília: IBRAM, 2025.
- INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES (IPEN). Desenvolvimento de novos materiais dosimétricos. São Paulo: IPEN/CNEN, 2024. Disponível em: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?campo=1699&secao_id=2906. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global Critical Minerals Outlook 2025*. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Lighting report 2023: technology, market and energy trends. Paris: IEA, 2023.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Recycling of critical minerals: strategies to scale up recycling and urban mining. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/recycling-of-critical-minerals>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL MONETARY FUND (IMF). World Economic Outlook database: October 2025. Washington, D.C.: IMF, 2025. Disponível em: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weo-database/2025/October>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Renewable capacity statistics 2025. Abu Dhabi: IRENA, 2025. Disponível em: <https://www.irena.org>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- KERR, C. The systems approach of strategic roadmapping: Framing challenges and contributions whilst flexing to changing conditions and circumstances. *Systems Research and Behavioral Science*, v.40,p. 701-712, 2023.
- KFW DEVELOPMENT BANK. Securing critical raw materials for the net zero and digital transition. Frankfurt am Main: KfW, 2024. Disponível em: <https://www.kfw.de>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- LIGHTNOW. China's new rare earth export controls could impact lighting. LightNOW, out. 2025. Disponível em: <https://www.lightnowblog.com/2025/10/chinas-new-rare-earth-export-controls-could-impact-lighting/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MACHACEK, E. et al. Recycling of rare earths from fluorescent lamps: value analysis of closing-the-loop under demand and supply uncertainties. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 104, p. 76-93, 2015.
- MANKINS, J. C. Technology readiness assessments: a retrospective. *Acta Astronautica*, v. 65, n. 9-10, p. 1216-1223, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.03.058>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MARKET REPORT ANALYTICS (MRA). Rare earth luminescent phosphor material 2025-2033 market analysis. [S.l.]: MRA, 2025. Disponível em: <https://www.marketreportanalytics.com/reports/rare-earth-luminescent-phosphor-material-28935>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- McKITTRICK, J.; SHEA-ROHWER, L. E. Review: down conversion materials for solid-state lighting. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 97, n. 5, p. 1327-1352, 2014.
- NICHIA CORPORATION. Annual report 2024: innovations in phosphor technology. Tokushima: Nichia, 2024. Disponível em: <https://www.nichia.co.jp>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- NIKL, M.; YOSHIKAWA, A. Recent R&D trends in inorganic single-crystal scintillator materials for radiation detection. *Advanced Optical Materials*, v. 3, n. 4, p. 463-481, 2015.
- PHAAL, R.; CHASKEL, C.; NAKAZAWA, R. G.; ROSS, J. Roadmapping roadmapping: strategic planning for roadmapping systems. *Frontiers of Engineering Management*, v. 11, n. 3, p. 516--527, 2024.
- PIMPUTKAR, S. et al. Prospects for LED lighting. *Nature Photonics*, v. 3, n. 4, p. 180-182, 2009.

- PW CONSULTING CHEMICAL & ENERGY RESEARCH CENTER. Rare earth phosphors for LED market. [S.l.]: PW Consulting, 2024. Disponível em: <https://pmarketresearch.com/chemi/rare-earth-phosphors-for-led-market/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- RAINBOW RARE EARTHS. Annual report 2024. [S.l.]: Rainbow Rare Earths Ltd., 2024. Disponível em: <https://www.rainbowrareearths.com>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- ROCHA, G. B. et al. BET, ab initio and natural bond orbital (NBO) studies of the N-donor organics as ligands in rare-earth complexes. *Inorganic Chemistry*, v. 43, n. 7, p. 2346-2354, 2004.
- SAMSUNG RESEARCH. Micro-LED *display*: next generation *display* technology white paper. Seoul: Samsung Research, 2023.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). Potencial de terras raras no Brasil: reservas, lavra e perspectivas. Brasília: SGB/CPRM, 2025.
- SFA OXFORD. Critical minerals in lighting and phosphors. Oxford: SFA, 2024. Disponível em: <https://www.sfa-oxford.com/knowledge-and-insights/critical-minerals-in-low-carbon-and-future-technologies/critical-minerals-in-electronics/critical-minerals-in-lighting-and-phosphors/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- SHANG, M. M. et al. A green phosphor of $\text{SrSi}_2\text{O}_2\text{N}_2\text{:Eu}^{2+}$ for white LEDs: synthesis and luminescence properties. *Journal of Luminescence*, v. 149, p. 271-275, 2014.
- SHEN, Y. et al. Synthesis and luminescence properties of upconversion nanoparticles for bioimaging applications. *Advanced Materials*, v. 34, n. 12, article number 2106949, 2022.
- STRAITS RESEARCH. LED phosphor market size, trends and forecasts 2033. [S.l.]: Straits Research, 2025. Disponível em: <https://straitsresearch.com/report/led-phosphor-market>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- TANG, C. W.; VANSLYKE, S. A. Organic electroluminescent diodes. *Applied Physics Letters*, v. 51, n. 12, p. 913-915, 1987.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (US DOE). Solid-state lighting R&D plan: 2023 update. Washington: US DOE, 2023. Disponível em: <https://www.energy.gov/eere/ssl>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral commodity summaries: rare earths 2025. Reston: USGS, 2025. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/rare-earths-statistics-and-information>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- UNITED STATES INTERNATIONAL TRADE COMMISSION (USITC). Recovering rare earth elements from e-waste. *Journal of International Commerce and Economics*, Washington: USITC, 2024. Disponível em: https://www.usitc.gov/publications/332/journals/jice_recovering_rare_earth_elements_from_e_waste.pdf. Acesso em: 10 abr. 2026.
- VAN EIJK, C. W. E. Inorganic scintillators in medical imaging. *Physics in Medicine and Biology*, v. 47, n. 8, p. R85-R106, 2002.
- VERIFIED MARKET REPORTS. Rare earth phosphors market size & demand analysis: forecast to 2033. [S.l.]: Verified Market Reports, 2025. Disponível em: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/global-rare-earth-phosphors-market-growth-2019-2024/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- WILBURN, D. R. Byproduct metals and rare-earth elements used in the production of light-emitting diodes. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2012-5215. Reston: USGS, 2012.
- WOLFOWICZ, G. et al. Quantum guidelines for solid-state spin defects. *Nature Reviews Materials*, v. 6, n. 10, p. 906-925, 2021.
- WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION (WIPO). Patent landscape report: rare earth phosphors and luminescent materials. Geneva: WIPO, 2024.
- YUKIHARA, E. G.; MCKEEVER, S. W. S. Optically stimulated luminescence: fundamentals and applications. Chichester: Wiley, 2011. 388 p. ISBN 978-0-470-74927-2.

CADEIA PRODUTIVA DE MATERIAIS PARA APLICAÇÕES ÓPTICAS AVANÇADAS NO BRASIL

(42 referências)

ALLIED MARKET RESEARCH. Defense optics market size, share and trends, 2024–2033. Portland: Allied Market Research, 2024.

- ALLIED MARKET RESEARCH. Rare earth glass additives market: global opportunity analysis and industry forecast, 2024–2035. Portland: Allied Market Research, 2024.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI). ANSI Z87.1: Occupational and educational personal eye and face protection devices. New York: ANSI, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO). Relatório setorial da indústria vidreira brasileira 2024. São Paulo: ABIVIDRO, 2024.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM E275: Standard practice for describing and measuring performance of ultraviolet and visible spectrophotometers. West Conshohocken: ASTM, 2022.
- BAMFORD, C. R. Colour generation and control in glass. Amsterdam: Elsevier, 1977.
- BRASIL. Decreto nº 11.740, de 18 de outubro de 2023. Institui o Programa Nacional de Semicondutores. Diário Oficial da União, Brasília, 19 out. 2023.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Lista de minerais críticos e estratégicos do Brasil. Brasília: MME, 2024.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC). Nova Indústria Brasil: política industrial 2024–2033. Brasília: MDIC, 2024.
- BRASIL. Presidência da República. Lei nº 14.792, de 20 de dezembro de 2023. Novo Marco Regulatório Mineral. Brasília, 2023.
- CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL (CETEM). Relatório técnico: rotas hidrometalúrgicas para purificação de óxido de cério de grau óptico. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2024.
- COOK, L. M. Chemical processes in glass polishing. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 120, n. 1–3, p. 152–171, 1990.
- DOWNIE, L. E.; PATEL, C. Ultraviolet-blocking lenses for ocular protection: mechanisms, standards and clinical implications. *Clinical and Experimental Optometry*, v. 106, n. 3, p. 251–260, 2023.
- GOLDMAN, L. M. Transparent spinel: historical development and present status. *Optical Engineering*, v. 49, n. 5, article 055401, 2010.
- GRAND VIEW RESEARCH. Cerium oxide nanoparticles market size, share & trends analysis report, 2024–2034. San Francisco: Grand View Research, 2024a. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- GRAND VIEW RESEARCH. Ophthalmic lenses market size, share & trends analysis report, 2024–2030. San Francisco: Grand View Research, 2024c.
- GRAND VIEW RESEARCH. Optical glass market size, share & trends analysis report, 2024–2033. San Francisco: Grand View Research, 2024b. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- HARRIS, D. C. Durable 3–5 μm transmitting infrared window materials. *Infrared Physics and Technology*, v. 33, n. 1, p. 113–137, 2013.
- HOSHINO, T. et al. Mechanism of polishing of SiO_2 films by CeO_2 particles. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 283, p. 129–136, 2001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). Relatório anual da mineração no Brasil 2025. Brasília: IBRAM, 2025.
- INSTITUTO DE ESTUDOS AVANÇADOS (IEAv/CTA). Relatório de atividades de pesquisa em materiais para defesa e aeroespacial 2024. São José dos Campos: IEAv/CTA, 2024.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). Portaria nº 364, de 22 de setembro de 2009: requisitos de proteção UV para óculos de sol. Rio de Janeiro: INMETRO, 2009. Atualizado em 2023.
- KfW BANKENGRUPPE. Critical raw materials for the green and digital transition. Frankfurt: KfW, 2024. Disponível em: <https://www.kfw.de>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- KRISHNAN, M. et al. Fundamental aspects of silicon dioxide and silicon nitride CMP. *Electrochemical and Solid-State Letters*, v. 13, n. 5, p. H180–H182, 2010.
- MANKINS, J. C. Technology readiness assessments: a retrospective. *Acta Astronautica*, v. 65, n. 9–10, p. 1216–1223, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.03.058>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- MARKETSANDMARKETS. CMP *slurry* market: global forecast to 2030. Northbrook: MarketsandMarkets, 2025. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com>. Acesso em: 30 mar. 2026.

- MARKETSANDMARKETS. Personal protective equipment (PPE) market: global forecast to 2029. Northbrook: MarketsandMarkets, 2024.
- MORDOR INTELLIGENCE. Optical glass market: growth, trends and forecasts (2025–2030). Hyderabad: Mordor Intelligence, 2025. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- NANZ, G.; CAMILLETTI, L. E. Characterization of chemical-mechanical polishing processes. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, v. 8, n. 4, p. 382–389, 1995.
- NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). Standard reference materials: SRM 930, SRM 2065 and SRM 2031 — filters for spectrophotometry. Gaithersburg: NIST, 2024.
- NOHMAN, A. K. H. et al. Advances in rare earth element applications in optical glass: a review. Journal of Rare Earths, v. 41, n. 3, p. 345–361, 2023.
- PARK, J. G. et al. Chemical mechanical planarization (CMP) of advanced semiconductor materials: challenges and prospects. ECS Journal of Solid State Science and Technology, v. 12, n. 4, article number 044005, 2023.
- ROSKILL INFORMATION SERVICES. Rare earths: market outlook to 2030. London: Roskill, 2024.
- SCHOTT AG. Optical glass data sheets: LaK, LaF and LaSF glass families. Mainz: Schott, 2025. Disponível em: <https://www.schott.com/en-gb/products/optical-glass>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). Potencial de terras raras no Brasil: reservas, lavra e perspectivas estratégicas. Brasília: SGB/CPRM, 2025.
- SHELBY, J. E. Introduction to glass science and technology. 2nd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2005. 291 p.
- SILVA, P. R. N. et al. Síntese e caracterização de nanopartículas de CeO₂ para polimento óptico. Química Nova, v. 46, n. 2, p. 180–189, 2023.
- THOMPSON SCIENTIFIC INFORMATION. ISI. Derwent Innovations Index. Disponível em: <https://clarivate.com/derwent/>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral commodity summaries: rare earths 2025. Reston: USGS, 2025. Disponível em: <https://www.usgs.gov>. Acesso em: 30 mar. 2026.
- UNITED STATES PHARMACOPEIA (USP). USP <661>: containers — glass. Rockville: USP, 2023.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Report of the WHO informal consultation on the development of standards for UV-blocking eyewear. Geneva: WHO, 2022.
- ZHONG, M. et al. Progress in rare earth-doped optical glass: preparation, properties, and applications. Materials Today Communications, v. 35, article number 106152, 2023.

ROADMAP ESTRATÉGICO DA CADEIA INTEGRADA DE TERRAS RARAS NO BRASIL: 2026–2040

(15 referências)

- BRUEGEL. Ending European Union imports of Russian uranium. Bruxelas: Bruegel, abr. 2025. Disponível em: <https://www.bruegel.org/analysis/ending-european-union-imports-russian-uranium>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CENTER FOR STRATEGIC AND INTERNATIONAL STUDIES (CSIS). The geopolitics of Russia's civil nuclear exports four years into the war. Washington, D.C.: CSIS, mar. 2026. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/geopolitics-russias-civil-nuclear-exports-four-years-war>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- CENTRO BRASILEIRO DE RELAÇÕES INTERNACIONAIS (CEBRI). 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: CEBRI, 2025. Vários colaboradores. ISBN 978-85-89534-13-0.
- CNN BRASIL. NBEPAR e estatal russa Rosatom formam *joint venture* para minerais críticos. São Paulo: CNN Brasil, mar. 2026. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/infra/nbepar-e-estatal-russa-rosatom-formam-joint-venture-para-minerais-criticos/>. Acesso em: 10 abr. 2026.

- COMISSÃO EUROPEIA. RESourceEU Action Plan: Securing Europe's Access to Critical Raw Materials. Bruxelas: Comissão Europeia, 3 dez. 2025. Disponível em: <https://ec.europa.eu/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- GAZETA DO POVO. Rússia firma parceria no Brasil para explorar minerais críticos. Curitiba, mar. 2026. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/mundo/estatal-russa-firma-parceria-empresa-brasileira-exploracao-minerais-criticos/>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- ÍNDIA. Ministério de Minas (Ministry of Mines); Diretoria de Minerais Atômicos para Exploração e Pesquisa (AMD). India's Rare Earth Strategy: Manufacturing, Corridors, and Global Integration. Nova Déli: Press Information Bureau (PIB), 3 fev. 2026. Disponível em: <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=2222413>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global Critical Minerals Outlook 2025*. Paris: IEA, jun. 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- KERR, C. The systems approach of strategic roadmapping: Framing challenges and contributions whilst flexing to changing conditions and circumstances. *Systems Research and Behavioral Science*, v.40, p. 701-712, 2023.
- METAL TECH NEWS. Lynas, JARE upgrade Japan rare earth deal. 2026. Disponível em: <https://www.metaltechnews.com/story/2026/03/11/tech-metals/lynas-jare-upgrade-japan-rare-earth-deal/2679.html>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- PHAAL, R.; CHASKEL, C.; NAKAZAWA, R. G.; ROSS, J. Roadmapping roadmapping: strategic planning for roadmapping systems. *Frontiers of Engineering Management*, v. 11, n. 3, p. 516--527, 2024.
- S&P GLOBAL. Mine Development Timelines Report 2025. New York: S&P Global, 2025. Disponível em: <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/industries/metals-mining>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- SCHWARTZ, P. *The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World*. New York: Doubleday, 1991.
- SHANGHAI METALS MARKET (SMM). Lynas and JARE sign long-term rare earth supply deal with floor price and profit-sharing mechanisms. Xangai: SMM, mar. 2026. Disponível em: <https://news.metal.com/newscontent/103808279>. Acesso em: 10 abr. 2026.
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Mineral Commodity Summaries 2026: Rare Earths. Reston, VA: USGS, fev. 2026. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2026/mcs2026-rare-earth.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2026.

