LUMEN ET VIRTUS
ISSN: 2177-2789

A BUSCA DAS TERRAS RARAS PARA O DESENVOLVIMENTO REGIONAL: A NOVA FRONTEIRA DO DESENVOLVIMENTO NO INDUSTRIAL

THE SEARCH FOR RARE EARTHS FOR REGIONAL DEVELOPMENT: THE NEW FRONTIER OF INDUSTRIAL DEVELOPMENT

LA BÚSQUEDA DE TIERRAS RARAS PARA EL DESARROLLO REGIONAL: LA NUEVA FRONTERA DEL DESARROLLO INDUSTRIAL

https://doi.org/10.56238/levv16n50-087

Data de submissão: 30/06/2025

Data de publicação: 30/07/2025

Ricardo Daher Oliveira
Pós-Doutor em Ciências Contábeis
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: ricardo.daher@hotmail.com

David Arllen Silva dos Santos
Bacharel em Administração
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: davidarllensantos@gmail.com

Gicléria Silva Santana
Bacharel em Administração
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: gicleriasilva.s@gmail.com

Iasmim Mendes Paiva
Bacharel em Administração
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: iasmim.paivasm@gmail.com

Iasmin de Souza Muniz
Bacharel em Administração
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: iasmin.m82@gmail.com

Jefferson Messias de Souza
Bacharel em Administração
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: j.souza100@hotmail.com

Josicleia Miranda
Bacharel em Administração
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: josimiranda222@gmail.com

Kalil Amorim de Morais
Bacharel em Administração
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: kalilamorim99@gmail.com

Leide Daiane Santana Medeiros
Bacharel em Administração
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: leydedaianem@gmail.com

Marcos Martins Nunes
Bacharel em Administração
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: markinhos720@gmail.com

Naiara da Silva Jatobá
Bacharel em Administração
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: naiarajatoba6@gmail.com

Patrícia Laurindo da Silva
Bacharel em Administração
Instituição: Universidade Estadual da Bahia
E-mail: patricialaurindo01@hotmail.com

RESUMO

A Indústria 4.0 representa uma transformação significativa nos sistemas produtivos, impulsionada por tecnologias como inteligência artificial, internet das coisas, robótica avançada e big data. No centro dessa revolução estão os Elementos de Terras Raras (ETRs), insumos essenciais para o funcionamento de dispositivos de alta performance, como motores elétricos, turbinas eólicas, sensores e baterias. Este artigo discute a relevância estratégica dos ETRs para a inovação tecnológica, produtividade industrial e sustentabilidade ambiental, destacando suas aplicações e o papel fundamental que desempenham na transição energética global. Analisa-se o panorama geopolítico, marcado pela concentração da produção na China, e os riscos associados à dependência internacional desses recursos. O Brasil, embora detenha a segunda maior reserva mundial de ETRs, enfrenta desafios estruturais, como a ausência de uma cadeia produtiva consolidada, limitações regulatórias, déficit tecnológico e falta de incentivos à pesquisa e ao investimento. O trabalho defende a necessidade de políticas públicas integradas, marcos regulatórios específicos e cooperação entre governo, setor privado e instituições de pesquisa como caminho para transformar esse potencial em desenvolvimento regional e protagonismo global. Além disso, destaca-se a importância da gestão sustentável dos ETRs, tanto na extração quanto na reciclagem, como vetor de competitividade e justiça socioambiental. Conclui-se que o domínio da cadeia produtiva das Terras Raras é estratégico para garantir a autonomia tecnológica, fortalecer a indústria nacional e posicionar o Brasil como ator relevante na economia verde e digital do século XXI.

Palavras-chave: Terras Raras. Indústria 4.0. Desenvolvimento Regional. Geopolítica. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Industry 4.0 represents a significant transformation in production systems, driven by technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things, advanced robotics, and big data. At the core of this revolution are Rare Earth Elements (REEs), essential inputs for the operation of high-performance devices such as electric motors, wind turbines, sensors, and batteries. This article discusses the strategic

relevance of REEs for technological innovation, industrial productivity, and environmental sustainability, highlighting their applications and fundamental role in the global energy transition. It analyzes the geopolitical landscape, marked by production concentration in China, and the risks associated with international dependence on these resources. Although Brazil holds the second-largest REE reserve in the world, it faces structural challenges such as the absence of a consolidated production chain, regulatory limitations, technological gaps, and lack of incentives for research and investment. The paper advocates for the need for integrated public policies, specific regulatory frameworks, and cooperation between government, the private sector, and research institutions as a path to transform this potential into regional development and global prominence. Furthermore, it emphasizes the importance of sustainable REE management, both in extraction and recycling, as a vector of competitiveness and socio-environmental justice. It concludes that mastering the rare earth production chain is strategic for ensuring technological autonomy, strengthening national industry, and positioning Brazil as a key player in the green and digital economy of the 21st century.

Keywords: Rare Earth Elements. Industry 4.0. Regional Development. Geopolitics. Sustainability.

RESUMEN

La Industria 4.0 representa una transformación significativa en los sistemas de producción, impulsada por tecnologías como la inteligencia artificial, el Internet de las Cosas (IoT), la robótica avanzada y el big data. En el corazón de esta revolución se encuentran las tierras raras (TER), insumos esenciales para dispositivos de alto rendimiento como motores eléctricos, aerogeneradores, sensores y baterías. Este artículo analiza la relevancia estratégica de las TER para la innovación tecnológica, la productividad industrial y la sostenibilidad ambiental, destacando sus aplicaciones y el papel fundamental que desempeñan en la transición energética global. El artículo analiza el panorama geopolítico, marcado por la concentración de la producción en China, y los riesgos asociados a la dependencia internacional de estos recursos. Brasil, a pesar de poseer la segunda mayor reserva mundial de TER, enfrenta desafíos estructurales, como la ausencia de una cadena de producción consolidada, limitaciones regulatorias, un déficit tecnológico y la falta de incentivos para la investigación y la inversión. El artículo argumenta la necesidad de políticas públicas integradas, marcos regulatorios específicos y la cooperación entre el gobierno, el sector privado y las instituciones de investigación para transformar este potencial en desarrollo regional y prominencia global. Además, se destaca la importancia de la gestión sostenible de las tierras raras, tanto en la extracción como en el reciclaje, como motor de la competitividad y la justicia socioambiental. Se concluye que el dominio de la cadena de producción de tierras raras es estratégico para garantizar la autonomía tecnológica, fortalecer la industria nacional y posicionar a Brasil como un actor relevante en la economía verde y digital del siglo XXI.

Palabras clave: Tierras Raras. Industria 4.0. Desarrollo Regional. Geopolítica. Sostenibilidad.

1 INTRODUÇÃO

A busca contínua por inovação e crescimento econômico global tem impulsionado a transição para a Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0. Este fenômeno, que redefine os paradigmas de produção e automação, é intrinsecamente ligado à disponibilidade e ao desenvolvimento de materiais estratégicos, entre os quais os Elementos de Terras Raras (ETR) se destacam como um componente crucial e insubstituível para o avanço das novas indústrias. Longe de serem meras "curiosidades de laboratório", como foram tratadas até o início da década de 1950 devido à dificuldade de obtenção de seus compostos puros, as Terras Raras são agora reconhecidas como um pilar fundamental para as tecnologias de ponta que caracterizam a Indústria 4.0 e para o avanço de uma sociedade mais sustentável.

O termo "Terras Raras" originou-se do aspecto terroso de seus óxidos insolúveis e da crença equivocada de que eram escassos na natureza. No entanto, elementos como o Cério (Ce), por exemplo, são tão abundantes na crosta terrestre quanto o zinco ou o cobre, com 67 partes por milhão (ppm), demonstrando que a raridade está mais na dificuldade de extração do que na sua ocorrência.

Com o advento da Indústria 4.0, que se manifestou através de avanços em áreas como Inteligência Artificial (IA), surgiram nova técnicas e máquinas para realizar tarefas complexas com níveis de desempenho superiores aos humanos. O que foi fundamental para a flexibilidade e a eficiência em ambientes de alta complexidade que, possibilitou um a produção individualizada de peças complexas com economia de materiais e tempo.

As propriedades únicas das Terras Raras, como suas características magnéticas, ópticas e catalíticas, tornam-nas insubstituíveis em componentes essenciais para produção de sistemas de alta tecnologia. Exemplos concretos incluem o neodímio (Nd) e o praseodímio (Pr) em ímãs de alta potência para motores elétricos e geradores eólicos , o lantânio (La) e o cério (Ce) em catalisadores para refino de petróleo e ligas para baterias Ni-MH , o ítrio (Y) e o európio (Eu) em luminóforos para telas de cristal líquido (LCD) e LEDs, além de aplicações em lasers, fibra óptica e equipamentos médicos como ressonância magnética. Essa ampla gama de aplicações evidencia como as Terras Raras são um elemento-chave para a promoção e consolidação da Indústria 4.0 no Brasil e no mundo.

No entanto, a concentração das reservas e da produção desses elementos em poucas nações, notadamente a China, introduz uma complexa dimensão geopolítica e desafios de suprimento global. Para o Brasil, detentor da segunda maior reserva mundial de Terras Raras, este cenário apresenta tanto um desafio quanto uma oportunidade singular para impulsionar seu desenvolvimento industrial e tecnológico, alinhando-se às demandas da Indústria 4.0 e contribuindo para a transição global rumo à sustentabilidade.

Desta forma, este trabalho se propõe a aprofundar a compreensão sobre a intrínseca relação entre a descoberta e aplicação das Terras Raras e o fomento da Indústria 4.0, explorando suas definições

e tecnologias, o panorama global de reservas e produção, e sua relevância para as tecnologias sustentáveis e o contexto geopolítico.

2 DESENVOLVIMENTO TEMÁTICO

Nesta seção, será aprofundado a análise da intrínseca relação entre os Elementos de Terras Raras (ETR) e a Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0), desdobrando-se em aspectos cruciais que delineiam o cenário atual e futuro. Serão exploradas as dimensões que conferem às Terras Raras seu caráter estratégico e sua relevância para as tecnologias de ponta, bem como o complexo panorama geopolítico que envolve seu suprimento global. Adicionalmente, será detalhado o potencial do Brasil nesse contexto, juntamente com os desafios e as oportunidades que se apresentam para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva nacional robusta. Por fim, será discutido o papel fundamental das políticas públicas e da colaboração multissetorial para transformar o vasto potencial mineral em um diferencial competitivo na era da inovação industrial.

2.1 A IMPORTÂNCIA ESTRATÉGICA DAS TERRAS RARAS PARA A INDÚSTRIA 4.0 E TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

A Indústria 4.0, também conhecida como a quarta revolução industrial, é um conceito que engloba a integração de tecnologias digitais avançadas à manufatura, incluindo inteligência artificial, automação, internet das coisas, big data, computação em nuvem, e sistemas ciber-físicos. Essa transformação tecnológica promete aumentar a eficiência produtiva, a personalização de produtos, a redução de custos e a sustentabilidade.

Contudo, para que essa revolução aconteça de forma concreta e perene, torna-se indispensável a disponibilidade de materiais tecnológicos específicos, entre os quais os elementos de terras raras (ETRs) se destacam como insumos críticos. Estes elementos químicos, embora relativamente abundantes na crosta terrestre, são difíceis de extrair e processar, demandando tecnologia avançada e cuidados ambientais rigorosos. Mais do que meros insumos minerais, os ETRs são considerados o "petróleo do século XXI", pela sua importância estratégica e pelo papel vital que desempenham em tecnologias de ponta utilizadas em setores como energia, defesa, saúde, transporte e comunicação.

A relevância dos ETRs na Indústria 4.0 é indiscutível. Segundo Souza, Oliveira e Lima (2021), esses elementos são essenciais para a produção de componentes fundamentais como ímãs permanentes de alta potência, catalisadores, semicondutores, sensores inteligentes e dispositivos de armazenamento de energia. A miniaturização e a eficiência desses componentes possibilitam a construção de equipamentos mais leves, potentes e energeticamente eficientes, como veículos elétricos, drones, robôs autônomos, equipamentos de realidade aumentada, e sistemas inteligentes de controle e monitoramento industrial. Para além disso, os ETRs permitem avanços em áreas emergentes, como a

computação quântica, sensores biomédicos e tecnologias espaciais, consolidando-se como pilares do desenvolvimento tecnológico global. Dessa forma, a produção e a disponibilidade desses elementos não só sustentam a inovação, como influenciam diretamente a competitividade industrial de países e empresas no cenário mundial.

A demanda global por tecnologias sustentáveis, impulsionada pelas crescentes preocupações ambientais e pela necessidade de mitigar as mudanças climáticas, reforça a importância estratégica das terras raras. Conforme explicam Andrade e Fonseca (2020), a transição energética rumo a matrizes renováveis, especialmente energia solar e eólica, depende intensamente do uso de ETRs em componentes como ímãs de neodímio em turbinas eólicas e semicondutores em painéis solares de alta eficiência.

Além disso, as baterias de íon-lítio usadas em veículos elétricos e sistemas de armazenamento estacionário requerem elementos como lantânio, cério e neodímio para melhorar sua capacidade, segurança e durabilidade. Sem esses materiais, a viabilidade técnica e econômica da expansão das energias renováveis e da eletrificação do transporte seria severamente comprometida. Os autores destacam que "os ETRs não são apenas insumos tecnológicos, mas facilitadores cruciais da sustentabilidade energética e da redução das emissões de gases de efeito estufa em escala global".

Porém, apesar da importância crescente, o mercado global de terras raras é marcado por desafios e vulnerabilidades estruturais. A cadeia produtiva desses elementos é altamente concentrada, com a China liderando o mercado em termos de extração, processamento e exportação. Isso cria riscos geopolíticos significativos para países que dependem do fornecimento externo. O episódio ocorrido em 2010, quando a China restringiu as exportações de ETRs para o Japão durante um conflito diplomático, evidenciou o potencial uso desse recurso como instrumento de poder econômico e político.

Santos e Ribeiro (2022) afirmam que "a concentração da produção mundial de terras raras implica em uma dependência tecnológica que pode comprometer o desenvolvimento industrial e a soberania nacional de países que não detêm esses recursos ou as capacidades para seu processamento". Essa dependência torna a diversificação das fontes e o desenvolvimento de cadeias produtivas locais objetivos estratégicos para países emergentes e desenvolvidos.

O Brasil possui um grande potencial para desempenhar um papel relevante nesse contexto. Com reservas minerais expressivas distribuídas em estados como Minas Gerais, Amazonas, Bahia, Goiás e Pará, o país detém um patrimônio geológico significativo. Contudo, o potencial brasileiro ainda é subaproveitado, pois o país enfrenta desafios relacionados à infraestrutura tecnológica, ao investimento em pesquisa aplicada, à capacitação técnica e à falta de uma política pública clara voltada para o desenvolvimento da cadeia produtiva de terras raras.

Andrade e Fonseca (2020) destacam que “o Brasil necessita estruturar políticas industriais integradas que promovam o aproveitamento sustentável dos recursos minerais, aliadas ao desenvolvimento científico e tecnológico para agregar valor e fomentar a inovação local”. A inexistência de uma indústria nacional consolidada que transforme o minério bruto em produtos tecnológicos limita o ganho econômico e científico do país, mantendo-o dependente da importação de componentes e equipamentos.

Além dos desafios econômicos e tecnológicos, a exploração dos ETRs levanta importantes questões ambientais e sociais. A mineração tradicional de terras raras envolve processos que podem causar impactos ambientais severos, incluindo poluição de águas e solos, geração de resíduos tóxicos e riscos à saúde humana. A China, que é o maior produtor mundial, já enfrentou graves problemas de contaminação e degradação ambiental em áreas mineradoras.

Em contrapartida, o Brasil dispõe de um marco regulatório ambiental mais rigoroso e instituições capazes de monitorar e controlar a exploração mineral. Isso abre espaço para que o país desenvolva um modelo de mineração responsável e sustentável, que concilie a extração mineral com a conservação ambiental e a justiça social. A reciclagem de ETRs, especialmente a partir de resíduos eletrônicos, surge como uma alternativa complementar, que pode reduzir a pressão sobre os recursos naturais e fomentar uma economia circular. Souza, Oliveira e Lima (2021) ressaltam que “o futuro da cadeia de terras raras está intrinsicamente ligado à sustentabilidade ambiental, exigindo inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental em todas as etapas produtivas”.

No campo geopolítico, a gestão estratégica das terras raras demanda que o Brasil defina e implemente uma estratégia nacional que integre interesses econômicos, ambientais e tecnológicos. O país precisa fortalecer suas instituições de pesquisa, ampliar os investimentos em ciência e tecnologia, e criar incentivos para o desenvolvimento de indústrias que utilizem ETRs em seus processos produtivos.

A articulação entre governo, setor privado e academia é fundamental para que o Brasil possa se inserir nas cadeias globais de valor, não apenas como fornecedor de matéria-prima, mas como produtor de tecnologia avançada. Conforme destacado por Santos e Ribeiro (2022), “o desenvolvimento tecnológico e a segurança no fornecimento de terras raras são fatores decisivos para a competitividade e a autonomia estratégica nacional, especialmente frente a um cenário internacional volátil e competitivo”.

Assim, os elementos de terras raras assumem uma importância estratégica multifacetada. Eles são insumos indispensáveis para a consolidação da Indústria 4.0 e para a expansão das tecnologias sustentáveis que definirão o futuro das economias globais. No Brasil, sua exploração e aproveitamento representam uma oportunidade singular de alavancar o desenvolvimento tecnológico, econômico e

ambiental, desde que acompanhados de políticas públicas eficientes, investimentos em inovação e compromisso com a sustentabilidade.

Superar os desafios técnicos, ambientais e institucionais existentes será fundamental para que o país transforme seu potencial mineral em riqueza tecnológica e protagonismo no cenário mundial. A gestão adequada das terras raras, portanto, é parte integrante de uma estratégia nacional que busca a modernização industrial, a segurança energética e a preservação ambiental, garantindo um futuro mais competitivo, inovador e sustentável para o Brasil.

2.2 PANORAMA GEOPOLÍTICO E DESAFIOS NO SUPRIMENTO DAS TERRAS RARAS

O atual panorama geopolítico referente aos elementos de terras raras (ETRs) reflete a complexidade da economia global e os desafios inerentes à segurança de suprimento desses materiais estratégicos. Constituindo um grupo de 17 elementos químicos, os ETRs têm propriedades únicas que os tornam insubstituíveis em tecnologias de ponta, como turbinas eólicas, carros elétricos, equipamentos médico-hospitalares, catalisadores e sistemas de defesa (Cuadros-Muñoz et al., 2024; CGEE, 2013).

Desde a década de 2010, a China tem exercido um controle substancial sobre a produção e o mercado de ETRs, sendo responsável por mais de 80% da produção global (Morato, 2019). As medidas restritivas impostas pelo governo chinês, como quotas de exportação e redução de licenças, provocaram instabilidade nos preços e preocupantes incertezas quanto à continuidade do fornecimento internacional desses elementos. Tais ações foram interpretadas por muitos analistas como uma estratégia de domínio tecnológico e comercial, favorecendo a instalação de indústrias estrangeiras em solo chinês e consolidando sua posição na cadeia de valor (CGEE, 2013; Cuadros-Muñoz et al., 2024).

Além das implicações comerciais, a geopolítica das terras raras insere-se no centro dos debates sobre soberania energética e autonomia tecnológica. Os ETRs tornaram-se estratégicos para a transição energética global, sendo essenciais na fabricação de motores elétricos, turbinas eólicas, baterias de alta eficiência e sistemas eletrônicos militares. A Agência Internacional de Energia (IEA) estima que, até 2040, a demanda global por neodímio e disprósio dobrará ou triplicará, impulsionada pelo setor de energia limpa e mobilidade elétrica (Cuadros-Muñoz et al., 2024).

A pressão sobre o fornecimento global tem incentivado a intensificação de pesquisas sobre a distribuição geológica das ETRs e a viabilidade de exploração em novas regiões. A publicação “Recursos Minerais do Brasil: problemas e desafios” (Formoso et al., 2016) destaca que, embora o mundo disponha de depósitos identificados em mais de 30 países, apenas um pequeno número detém capacidade tecnológica e infraestrutura para processá-los economicamente. Essa limitação técnica, aliada à concentração da cadeia de valor na China, gera uma assimetria de poder comercial.

Nesse cenário, a China tem utilizado seu domínio sobre a cadeia produtiva de ETRs como instrumento de influência geopolítica. Segundo Morato (2019), as ameaças chinesas de interrupção no fornecimento a países como o Japão, durante crises diplomáticas, evidenciam o caráter estratégico do controle desses recursos. A ausência de substitutos viáveis para muitos dos elementos utilizados em aplicações industriais reforça a dependência dos países consumidores e amplia o risco de vulnerabilidades econômicas em caso de ruptura na cadeia de suprimento.

A resposta de países industrializados à hegemonia chinesa tem se dado por meio da busca por fontes alternativas de suprimento, incentivo à economia circular (reciclagem de ETRs), desenvolvimento de materiais substitutos e políticas públicas de fomento à mineração crítica. A União Europeia, por exemplo, elaborou o "Critical Raw Materials Act", enquanto os Estados Unidos reativaram mecanismos de incentivo à mineração doméstica e ao refino de ETRs, como o “Defense Production Act”. Austrália, Canadá, Vietnã e Índia também têm desenvolvido projetos de exploração e beneficiamento (CGEE, 2013; Cuadros-Muñoz et al., 2024).

No Brasil, apesar do significativo potencial geológico, a exploração de terras raras ainda se encontra em estágio incipiente. De acordo com o CGEE (2013), o país possui importantes depósitos em Araxá (MG), Catalão (GO), Pitinga (AM) e ocorrências relevantes na Bahia, mas enfrenta limitações técnicas, institucionais e ambientais. A presença de minerais como a monazita, frequentemente associados ao tório — um elemento radioativo, impõe barreiras à liberação de projetos, dada a ausência de um marco regulatório específico que trate da mineração de ETRs com segurança radiológica (Formoso et al., 2016).

A cadeia produtiva nacional também carece de estrutura industrial consolidada. Segundo dados de Morato (2019), o Brasil ainda não domina etapas críticas como a separação individual de ETRs, a produção de ligas metálicas ou a fabricação de componentes de alto valor agregado, como ímãs permanentes. A dependência de tecnologia estrangeira, aliada à escassez de investimentos em pesquisa aplicada e infraestrutura laboratorial, dificulta a criação de uma cadeia verticalizada e tecnicamente autônoma.

Mesmo assim, o estudo prospectivo coordenado pelo CGEE (2013) propôs estratégias claras para o fortalecimento do setor no horizonte até 2030. Entre os principais direcionadores estratégicos destacam-se: a criação de um marco regulatório específico; o mapeamento sistemático de jazidas e ampliação das reservas conhecidas; o incentivo à formação de consórcios público-privados; a promoção de PD;I em parceria com universidades e institutos tecnológicos; e a integração progressiva da cadeia nacional à indústria global de terras raras. O documento também aponta a importância de capacitar recursos humanos especializados e criar incentivos fiscais para atrair empresas intensivas em tecnologia.

Outro ponto relevante diz respeito à sustentabilidade ambiental. A exploração de ETRs requer grande controle sobre rejeitos minerais, emissões atmosféricas e uso de reagentes químicos, especialmente no processo de separação e purificação. A adoção de melhores práticas ambientais é condição essencial para a inserção do Brasil em mercados exigentes e ambientalmente conscientes, como os da União Europeia. O desenvolvimento de tecnologias limpas, a rastreabilidade da produção e a certificação de sustentabilidade podem agregar valor ao produto nacional e tornar o país um fornecedor competitivo em um mercado cada vez mais regulado.

Em termos de competências científicas, o Brasil conta com centros de excelência em diversas regiões. Segundo o CGEE (2013), há mais de 490 especialistas e 113 grupos de pesquisa com atuação direta nas cadeias de TRs, sobretudo nas regiões Sudeste e Nordeste. A consolidação de redes de colaboração, o financiamento de programas de pós-graduação e o fortalecimento de instituições como o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) são passos fundamentais para que o conhecimento acumulado se traduza em capacidade produtiva.

Cabe ainda destacar a importância de articulações internacionais. O Brasil pode beneficiar-se de alianças com países que também buscam reduzir sua dependência da China, estabelecendo parcerias tecnológicas e comerciais em torno de uma exploração sustentável dos ETRs. Participar de fóruns multilaterais sobre minerais estratégicos e estabelecer acordos bilaterais pode fortalecer a diplomacia mineral e abrir novas oportunidades para a indústria nacional.

Por fim, é imprescindível que o Brasil desenvolva uma política nacional para minerais críticos, articulando os ministérios da Ciência e Tecnologia, Minas e Energia, Meio Ambiente, Indústria e Comércio. A definição de áreas prioritárias, a simplificação dos trâmites para exploração e a criação de uma diplomacia mineral ativa podem posicionar o país como fornecedor estratégico em um mercado dominado por incertezas e tensões geopolíticas.

2.3 POTENCIAL E DESAFIOS DO BRASIL NO CENÁRIO DAS TERRAS RARAS E INDÚSTRIA 4.0

O panorama geopolítico atual dos Elementos de Terras Raras (ETRs) reflete a complexidade da economia global e os desafios para a segurança de seu suprimento. Com 17 elementos químicos de propriedades únicas, os ETRs são insubstituíveis em tecnologias de ponta, como turbinas eólicas, carros elétricos, equipamentos médico-hospitalares, catalisadores e sistemas de defesa (Cuadros-Muñoz et al., 2024; CGEE, 2013).

Desde 2010, a China tem dominado a produção e o mercado de ETRs, sendo responsável por mais de 80% da produção global (Morato, 2019). Medidas restritivas chinesas, como cotas de exportação, causaram instabilidade nos preços e incertezas no fornecimento internacional. Muitos analistas veem essas ações como uma estratégia para o domínio tecnológico e comercial, incentivando

a instalação de indústrias estrangeiras em solo chinês e consolidando sua posição na cadeia de valor (CGEE, 2013; Cuadros-Muñoz et al., 2024).

A geopolítica das terras raras é central nos debates sobre soberania energética e autonomia tecnológica, pois esses elementos são cruciais para a transição energética global em motores elétricos, turbinas eólicas, baterias de alta eficiência e sistemas eletrônicos militares. A Agência Internacional de Energia (IEA) projeta que, até 2040, a demanda global por neodímio e disprósio dobrará ou triplicará, impulsionada pelos setores de energia limpa e mobilidade elétrica (Cuadros-Muñoz et al., 2024).

A pressão sobre o fornecimento global tem incentivado a pesquisa sobre a distribuição geológica dos ETRs e a viabilidade de exploração em novas regiões. A publicação “Recursos Minerais do Brasil: problemas e desafios” (Formoso et al., 2016) aponta que, embora existam depósitos em mais de 30 países, poucos possuem capacidade tecnológica e infraestrutura para processá-los economicamente. Essa limitação técnica, junto à concentração da cadeia de valor na China, cria uma assimetria de poder comercial. A China usa seu domínio sobre a cadeia produtiva de ETRs como instrumento de influência geopolítica, como evidenciado pelas ameaças de interrupção no fornecimento a países como o Japão em crises diplomáticas (Morato, 2019). A falta de substitutos viáveis para muitos ETRs reforça a dependência dos países consumidores, aumentando o risco de vulnerabilidades econômicas.

Países industrializados têm respondido à hegemonia chinesa buscando fontes alternativas, incentivando a economia circular (reciclagem de ETRs), desenvolvendo materiais substitutos e implementando políticas de fomento à mineração crítica. A União Europeia criou o "Critical Raw Materials Act", e os Estados Unidos reativaram mecanismos de incentivo à mineração doméstica e refino de ETRs, como o “Defense Production Act”. Austrália, Canadá, Vietnã e Índia também desenvolvem projetos de exploração e beneficiamento (CGEE, 2013; Cuadros-Muñoz et al., 2024).

No Brasil, apesar do significativo potencial geológico, a exploração de terras raras está em estágio inicial. O país possui importantes depósitos em Araxá (MG), Catalão (GO), Pitinga (AM) e ocorrências na Bahia (CGEE, 2013), mas enfrenta limitações técnicas, institucionais e ambientais. A presença de minerais como a monazita, associada ao tório (elemento radioativo), impõe barreiras devido à ausência de um marco regulatório específico para a mineração de ETRs com segurança radiológica (Formoso et al., 2016).

A cadeia produtiva nacional também carece de estrutura industrial consolidada. O Brasil ainda não domina etapas críticas como a separação individual de ETRs, a produção de ligas metálicas ou a fabricação de componentes de alto valor agregado, como ímãs permanentes (Morato, 2019). A dependência de tecnologia estrangeira e a escassez de investimentos em pesquisa aplicada e infraestrutura laboratorial dificultam a criação de uma cadeia verticalizada e tecnicamente autônoma.

O estudo prospectivo do CGEE (2013) propôs estratégias claras para fortalecer o setor até 2030, incluindo: criação de um marco regulatório específico; mapeamento sistemático de jazidas; incentivo a consórcios público-privados; promoção de PD&I com universidades; e integração da cadeia nacional à indústria global. O documento também destaca a importância de capacitar recursos humanos e criar incentivos fiscais para atrair empresas de tecnologia.

A sustentabilidade ambiental é crucial. A exploração de ETRs exige controle rigoroso sobre rejeitos minerais, emissões atmosféricas e uso de reagentes químicos. A adoção de melhores práticas ambientais é essencial para a inserção do Brasil em mercados exigentes. O desenvolvimento de tecnologias limpas, rastreabilidade e certificação de sustentabilidade podem agregar valor ao produto nacional, tornando o país um fornecedor competitivo em um mercado cada vez mais regulado.

Em termos de competências científicas, o Brasil possui centros de excelência, com mais de 490 especialistas e 113 grupos de pesquisa atuando nas cadeias de TRs, principalmente no Sudeste e Nordeste (CGEE, 2013). A consolidação de redes de colaboração, financiamento de programas de pós-graduação e fortalecimento de instituições como o Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) são passos fundamentais para transformar o conhecimento em capacidade produtiva.

A formação de profissionais qualificados é outro aspecto essencial, já que o setor exige conhecimento técnico especializado desde a mineração até o refino e uso industrial. A carência de cursos específicos pode ser suprida por universidades e institutos federais, criando programas de capacitação em parceria com empresas e centros de pesquisa, o que ampliaria a qualificação da mão de obra e a manteria atualizada.

O Brasil pode se beneficiar de articulações internacionais, buscando alianças com países que também visam reduzir sua dependência da China, estabelecendo parcerias tecnológicas e comerciais para uma exploração sustentável dos ETRs. Participar de fóruns multilaterais e acordos bilaterais pode fortalecer a diplomacia mineral e abrir novas oportunidades para a indústria nacional (Almeida; Gomes, 2021).

Do ponto de vista da indústria nacional, a estruturação de uma cadeia produtiva de terras raras no Brasil pode impactar positivamente diversos setores, como a indústria automobilística (com a eletrificação de veículos e produção local de ímãs permanentes para motores elétricos) e o setor de energias renováveis (turbinas eólicas). A produção interna pode baratear insumos e tornar produtos mais acessíveis. Outros setores beneficiados seriam o eletroeletrônico, de defesa e médico (Andrade et al., 2020). Dominar essas tecnologias permitiria ao Brasil reduzir importações, fortalecer a indústria local e gerar produtos com maior valor agregado, contribuindo para empregos qualificados e aumento de renda (Andrade. et al., 2020).

É vital que o avanço da cadeia das terras raras ocorra de forma integrada ao planejamento ambiental e social. O diálogo com comunidades tradicionais, o respeito aos direitos ambientais e a adoção de práticas sustentáveis são indispensáveis para garantir que o crescimento seja inclusivo, sustentável e responsável, sem impactos negativos.

Por fim, é imprescindível que o Brasil desenvolva uma política nacional para minerais críticos, articulando ministérios como Ciência e Tecnologia, Minas e Energia, Meio Ambiente, Indústria e Comércio. A definição de áreas prioritárias, a simplificação de trâmites e uma diplomacia mineral ativa podem posicionar o país como fornecedor estratégico em um mercado volátil e com tensões geopolíticas. Os benefícios da indústria das terras raras vão além da economia, envolvendo soberania nacional, segurança energética e protagonismo tecnológico. Um país que domina sua própria cadeia de produção de elementos estratégicos tem mais liberdade para decidir os rumos do seu desenvolvimento, sem depender tanto de fatores externos. Assim, as terras raras devem ser vistas não apenas como um recurso mineral, mas como um pilar para o fortalecimento da indústria, da inovação e da independência tecnológica do Brasil.

2.4 O PAPEL DAS POLÍTICAS PÚBLICAS E DA COLABORAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DA CADEIA DE TERRAS RARAS NO BRASIL

O desenvolvimento de uma cadeia de valor robusta para os Elementos de Terras Raras (ETR) no Brasil, especialmente no contexto da Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, é uma empreitada complexa que exige a sinergia entre políticas públicas eficazes e uma colaboração multissetorial intensa. Os ETRs, reconhecidos como "ouro do século XXI" e "minerais estratégicos", são cruciais para o avanço de tecnologias de ponta, incluindo aquelas que caracterizam a Indústria 4.0 (Silva et al., 2017). Embora o Brasil possua reservas significativas e já tenha sido um grande produtor de monazita, sua participação atual no mercado global é incipiente, resultando em uma dependência considerável da China, que domina mais de 95% do comércio desses compostos (Filho; Serra, 2014; Silva et al., 2017). Superar essa condição e transformar o potencial geológico em protagonismo industrial e tecnológico demanda um planejamento estratégico que transcende a mera extração mineral. A cadeia de valor das terras raras é complexa, abrangendo desde a prospecção e extração até o beneficiamento, a separação em compostos individuais e a fabricação de produtos finais de alta tecnologia. As ETRs são indispensáveis em diversas aplicações da Indústria 4.0, como ímãs permanentes para motores e turbinas de energia eólica, catalisadores de automóveis, refino de petróleo, e componentes de equipamentos eletroeletrônicos como televisores e lâmpadas fluorescentes (Silva et al., 2017; Filho; Serra, 2014). A importância desses elementos para o desenvolvimento de tecnologias limpas e estratégicas ressalta a necessidade de garantir sua disponibilidade para a soberania de uma nação (Filho; Serra, 2014).

O desenvolvimento de uma cadeia de terras raras no Brasil requer um marco regulatório robusto e políticas públicas assertivas que incentivem o investimento, a pesquisa e a inovação. Historicamente, o direito minerário brasileiro tem sido complexo e fragmentado, com normas esparsas que dificultam a ampliação da atividade (RIBEIRO, 2018). No entanto, a percepção da importância estratégica das terras raras tem levado a iniciativas de reforma. O Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM-2030), anunciado em 2011 pelo Ministério de Minas e Energia, é um exemplo de ferramenta estratégica que busca nortear as políticas de incentivo à sustentabilidade do setor mineral, com foco nos minerais estratégicos e nas pesquisas de viabilidade econômica (BRASIL, 2011, citado por Silva et al., 2017; Filho; Serra, 2014). Este plano visa a um crescimento equilibrado, sem danos ambientais, e aliado a programas de recuperação e reciclagem (Filho; Serra, 2014). Complementarmente, o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico dos Minerais de Elementos Terras-Raras e à Criação da Cadeia Produtiva (PADETR), previsto no Projeto de Lei nº 529-2013, tem como objetivo fomentar projetos de pesquisa aplicada à cadeia produtiva de ETR, apoiando empresas, universidades e centros de pesquisa no Brasil (BRASIL, 2013, citado por Silva et al., 2017). Essas iniciativas demonstram um reconhecimento governamental da importância de promover a produção nacional e agregar valor à cadeia produtiva dos ETRs, visando à independência do monopólio chinês (Silva et al., 2017).

Além da mineração primária, a mineração urbana representa uma fonte secundária de ETRs de crescente importância, diretamente influenciada por políticas públicas. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010, é fundamental nesse contexto, pois determina as ações necessárias para a gestão de resíduos sólidos e a implementação de sistemas de logística reversa para Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) (BRASIL, 2010, citado por Silva et al., 2017). A recuperação de ETRs a partir de REEE não apenas contribui para a redução dos impactos ambientais causados pelo descarte incorreto, mas também gera emprego e renda na cadeia reversa dos produtos eletroeletrônicos (Silva et al., 2017). A viabilidade técnica e econômica da recuperação de ETRs de REEE, especialmente de lâmpadas fluorescentes e monitores de tubo de raios catódicos (CRT), é um ponto crucial que justifica o investimento e o desenvolvimento de processos de recuperação e políticas de reciclagem (Silva et al., 2017).

A sustentabilidade na atividade minerária é um aspecto central das políticas públicas. O Banco Mundial, em 2011, apresentou recomendações de práticas sustentáveis para financiamento e desenvolvimento da atividade minerária, visando acelerar o crescimento econômico nacional através da atividade minerária sustentável (Ribeiro, 2018). Essas recomendações impulsionam a produção minerária no país diante da cooperação entre entes públicos e particulares para promoção e ampliação de tecnológica, infraestrutura, instrumentos normativos e financeiros (Ribeiro, 2018). A regulação da atividade minerária deve eliminar os abusos dos agentes envolvidos para que os detentores das estruturas não criem restrições, sob pena de inviabilizar o desenvolvimento local (Ribeiro, 2018).

A efetividade das políticas públicas, no entanto, depende fortemente da colaboração entre os diversos atores envolvidos. A colaboração entre governo, universidades e empresas é essencial para impulsionar a pesquisa e o desenvolvimento (P;D), desde a prospecção até o beneficiamento e a aplicação dos ETRs (Ribeiro, 2018). A academia brasileira já produz pesquisa de alto nível na área de TR, com publicações de grande impacto científico internacional, mas é necessário que o governo direcione esses esforços para objetivos comuns aos setores acadêmico e industrial (Filho; Serra, 2014). O Brasil conta com centros de excelência e grupos de pesquisa dedicados às terras raras, com mais de 490 especialistas e 113 grupos de pesquisa atuando nas cadeias de TRs (CGEE, 2013, citado por Filho; Serra, 2014). Iniciativas como as do Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI), subordinado ao Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), que desenvolve projetos voltados à reciclagem de REEE, buscando a melhor relação entre custos, rendimentos e impacto ambiental na recuperação de metais preciosos, ilustram a sinergia necessária (Silva et al., 2017). A Rede Paulista de Extensão Tecnológica, parte do Sistema Brasileiro de Tecnologia (SIBRATEC), também demonstra a colaboração ao auxiliar micro, pequenas e médias empresas a aumentarem sua competitividade através da adoção de tecnologias mais limpas e adequação a normas ambientais (Lima et al., 2016, citado por Silva et al., 2017). Tais iniciativas são cruciais para a capacitação e inovação no setor, demonstrando que a sinergia entre diferentes esferas pode gerar resultados concretos.

A cooperação internacional é outro pilar fundamental. Países como Japão, Estados Unidos, Austrália e Alemanha, que buscam reduzir sua dependência da China, têm incentivado a produção de ETRs em nações que possuem reservas, visando à diversificação do fornecimento e à transferência de tecnologia (Filho; Serra, 2014). O Brasil, com suas vastas reservas, pode se beneficiar dessas alianças, atraindo investimentos e se posicionando como um fornecedor estratégico (Filho; SERRA, 2014). Para isso, é imprescindível que o governo brasileiro garanta segurança jurídica e financeira ao mercado de TR, superando a percepção de projetos esparsos e sem interconexão entre empresas e institutos de pesquisa (Filho; Serra, 2014; Ribeiro, 2018). A definição de um marco regulatório específico e a simplificação dos trâmites para exploração são medidas que podem atrair investimentos e fomentar a formação de consórcios público-privados (Ribeiro, 2018). A integração da cadeia nacional à indústria global de terras raras também passa pela promoção de P;D e pela capacitação de recursos humanos especializados (Filho ; Serra, 2014). O setor de ETRs exige conhecimento técnico aprofundado, desde a mineração até o refino e o uso industrial dos elementos (Filho; Serra, 2014). A carência de profissionais especializados na prospecção e separação desses elementos é um desafio que o Brasil, assim como outros países, enfrenta, exigindo uma ação governamental no sentido de direcionar esforços a objetivos comuns aos setores acadêmico e industrial (Filho ; Serra, 2014). A sustentabilidade ambiental é uma condição essencial para a inserção do Brasil em mercados exigentes e ambientalmente

conscientes. A exploração de ETRs, especialmente de minerais como a monazita, que podem estar associados a elementos radioativos como o tório, impõe desafios regulatórios e ambientais significativos (Filho; Serra, 2014). A adoção de melhores práticas ambientais, o desenvolvimento de tecnologias limpas para separação e purificação, a rastreabilidade da produção e a certificação de sustentabilidade podem agregar valor ao produto nacional e tornar o país um fornecedor competitivo (Ribeiro, 2018). O desenvolvimento regional promovido pela cadeia de terras raras precisa ser inclusivo, sustentável e responsável, com diálogo e respeito aos direitos ambientais e das comunidades. Em suma, o desenvolvimento da cadeia de terras raras no Brasil para atender às demandas da Indústria 4.0 é um desafio que exige uma política nacional para minerais críticos bem articulada, envolvendo os ministérios pertinentes. A definição de áreas prioritárias, a simplificação dos trâmites para exploração e a criação de uma diplomacia mineral ativa podem posicionar o país como fornecedor estratégico em um mercado global volátil e competitivo (Ribeiro, 2018). A integração entre políticas públicas que incentivem a inovação e a sustentabilidade, e uma colaboração efetiva entre governo, academia e setor privado, é a chave para transformar o vasto potencial mineral brasileiro em riqueza tecnológica, autonomia industrial e desenvolvimento regional sustentável.

3 A IMPORTÂNCIA DO TEMA PARA A GESTÃO DA PRODUÇÃO

A gestão da produção no contexto da Indústria 4.0 está intrinsecamente ligada à disponibilidade e ao uso estratégico dos Elementos de Terras Raras (ETRs). Estes materiais, anteriormente vistos como curiosidades científicas, tornaram-se hoje insumos críticos para a operacionalização de tecnologias essenciais à automação, conectividade e digitalização dos processos produtivos. Sua presença é indispensável em motores de alto desempenho, catalisadores, sensores, lasers, baterias avançadas e dispositivos ópticos, o que os posiciona como elementos estruturantes da produtividade industrial contemporânea.

A relevância dos ETRs transcende a engenharia de produto e alcança o planejamento estratégico da produção. Em tempos de cadeias globais vulneráveis, marcadas por disrupções logísticas e tensões comerciais, a gestão eficiente desses insumos torna-se uma medida de segurança operacional. A alta concentração da produção global em poucos países, notadamente a China, impõe riscos sistêmicos que precisam ser enfrentados com inteligência estratégica, diversificação de fornecedores e construção de estoques reguladores.

A gestão da produção moderna precisa, portanto, operar com uma visão preditiva e integrada, incorporando os ETRs como variáveis críticas em diversas esferas: desde compras e controle de estoques até engenharia de processos, sustentabilidade e inovação. A ausência ou escassez desses elementos pode comprometer linhas inteiras de montagem, elevar custos operacionais e travar ciclos

de inovação, impactando diretamente a competitividade industrial. A capacidade de antecipar essas ameaças e agir de forma preventiva é o que diferencia organizações resiliêntes daquelas vulneráveis.

Além da preocupação com o suprimento, torna-se essencial incorporar uma abordagem sustentável à gestão dos ETRs. A baixa capacidade de reciclagem atual, não é apenas um desafio técnico, mas também uma limitação de design e de modelo de negócios. A produção precisa evoluir para práticas circulares, com produtos projetados para facilitar o desmonte e o reaproveitamento dos materiais críticos. Essa lógica não apenas reduz a dependência externa como alinha as operações industriais às exigências ambientais e às metas globais de desenvolvimento sustentável.

Nesse sentido, a gestão da produção assume papel central na articulação entre recursos naturais, ciência dos materiais, logística global e compromissos ecológicos. A capacidade de compreender os ETRs em toda a sua complexidade, técnica, econômica, ambiental e geopolítica, é um sinal claro de maturidade industrial. Empresas que negligenciam essa variável estratégica expõem-se a rupturas operacionais, elevação de custos e perda de inserção competitiva.

Para países como o Brasil, que possui a segunda maior reserva mundial de ETRs, o desafio se transforma também em oportunidade. O desenvolvimento de uma cadeia produtiva nacional para extração, processamento e aplicação tecnológica desses elementos é um passo crucial para fortalecer a autonomia industrial e a inserção do país nas cadeias de valor da Indústria 4.0. A construção dessa autonomia, contudo, requer sinergia entre políticas públicas, investimentos privados e gestão produtiva altamente qualificada.

Como afirmam Binnemans e Jones (2023), os ETRs são pilares silenciosos, porém fundamentais, da economia digital e sustentável. Sua ausência ou gestão inadequada compromete não apenas a produção atual, mas a capacidade futura de inovar. De forma semelhante, Gutfleisch et al. (2022) alertam que a segurança da cadeia de suprimento de ETRs deve ser tratada como uma prioridade estratégica, não apenas por governos, mas pelas indústrias que deles dependem.

Conclui-se, portanto, que a importância dos Elementos de Terras Raras para a gestão da produção reside não apenas em sua função tecnológica, mas no seu papel como eixo articulador entre eficiência operacional, soberania industrial e sustentabilidade. Compreendê-los, integrá-los e administrá-los com inteligência é mais do que uma vantagem competitiva, é uma exigência para liderar os rumos da produção no século XXI.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. F.; GOMES, L. A. Elementos de terras raras e o potencial brasileiro na Indústria 4.0. Revista Brasileira de Recursos Minerais, v. 10, n. 2, p. 45-58, 2021.

ANDRADE, M. J. F.; FONSECA, A. A. Terras raras e a transição energética: desafios e oportunidades para o Brasil. Revista de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente, v. 18, n. 2, p. 121–135, 2020.

ANDRADE, V. H. S. et al. Geologia e potencial das terras raras no Brasil: novas fronteiras para o desenvolvimento nacional. Geociências, v. 39, n. 4, p. 739-752, 2020.

BINNEMANS, K.; JONES, P. T. Rare Earths: Market Disruption, Innovation and Global Supply Chains. Sustainability, v. 15, n. 3, p. 1919, 2023. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/1919. Acesso em: 18 jul. 2025.

Centro De Gestão E Estudos Estratégicos (CGEE). Usos e aplicações de terras raras no Brasil: 2012-2030. Brasília: CGEE, 2013.

CUADROS-MUÑOZ, J. R. et al. Contribution of Rare Earth Elements Is Key to the Economy of the Future. Land, v. 13, n. 1220, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/land13081220. Acesso em: 18 jul. 2025.

FILHO, P. C.; SERRA, O. A. Terras Raras no Brasil: Histórico, Produção e Perspectivas. Química Nova, 2014, v. 37, n. 4, p. 753-760.

FORMOSO, M. L. L. et al. Os elementos terras raras e sua importância para o setor mineral do Brasil. In: MELFI, A. J. et al. (org.). Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. p. 331-363.

GUTFLEISCH, O. et al. Recent advances in the global rare-earth supply chain. MRS Bulletin, v. 47, n. 6, p. 491–500, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1557/s43577-022-00305-6. Acesso em: 18 jul. 2025.

MARINHO, Douglas Yusuf; ESPINOSA, José Waldo Martínez; SILVA, André Carlos. Os Elementos Terras Raras E Seu Papel Em Uma Sociedade Sustentável. In: Gestão da Produção em foco. [S. l.]: Atena Editora, 2018. cap. 17, p. 159-164. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323469252_OS_ELEMENTOS_TERRAS_RARAS_E_SEU_PAPEL_EM_UMA_SOCIEDADE_SUSTENTAVEL.

MELO, Filipe Reis. A geopolítica das terras raras. Revista Carta Internacional, Belo Horizonte, v. 12, n. 2, p. 219-243, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/323469252_OS_ELEMENTOS_TERRAS_RARAS_E_SEU_PAPEL_EM_UMA_SOCIEDADE_SUSTENTAVEL. Acesso em: 19 jul. 2025.

MORATO, V. de O. A importância dos elementos de terras raras para o mercado brasileiro e internacional. Catalão: Universidade Federal de Goiás, 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Minas).

PAUL, J. et al. Challenges and Opportunities in Global Supply Chains: The Role of Critical Minerals. PRISM - National Defense University Press, 2023. Disponível em: https://ndupress.ndu.edu/Media/News/News-Article-View/Article/3512099/challenges-and-opportunities-in-global-supply-chains-the-role-of-critical-miner/. Acesso em: 18 jul. 2025.

RIBEIRO, R. L. S. Direito Minerário Brasileiro: aspectos regulatórios e estratégicos na exploração de terras raras na Bahia. 2018. 153 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Urbano) – Universidade Salvador, Salvador, 2018.

SANTOS, L. P.; RIBEIRO, D. M. Geopolítica dos elementos de terras raras: implicações para o Brasil na Indústria 4.0. Revista Brasileira de Geopolítica, v. 13, n. 1, p. 88–104, 2022.

SILVA, J. T. da; BARRETO, J. C. G.; OLIVEIRA, C. R. M. de; SILVA, J. R. A. da. A Importância no Brasil da Mineração Urbana de Terras Raras nos Resíduos Eletroeletrônicos: Cenário atual, Políticas, Extração e Perspectivas. Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão, Curitiba, PR, v. 2, n. 2, p. 42-1–42-25, jul./dez. 2017.

SILVA, Ryan de Albuquerque da. Terras Raras (TR): Um Elemento-chave para a Promoção da Quarta Revolução Industrial no Brasil? Seropédica, RJ: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2021. Dissertação (Mestrado em Economia Regional e Desenvolvimento) – Instituto de Ciências Sociais Aplicadas, Departamento de Economia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

SOUZA, V. C.; OLIVEIRA, F. G.; LIMA, T. A. Aplicações de elementos de terras raras na indústria de alta tecnologia: uma análise da dependência global. Cadernos de Engenharia e Tecnologia, v. 7, n. 3, p. 55–70, 2021.