

**A CADEIA PRODUTIVA DE TERRAS RARAS (TR): DESAFIOS E
OPORTUNIDADES PARA O BRASIL**

**LA CADENA PRODUCTIVA DE LAS TIERRAS RARAS (TR): DESAFÍOS Y
OPORTUNIDADES PARA BRASIL**

**THE RARE EARTH PRODUCTION CHAIN (RE): CHALLENGES AND
OPPORTUNITIES FOR BRAZIL**



Ryan de Albuquerque da SILVA¹
e-mail: ryanjesus10@hotmail.com

Como referenciar este artigo:

SILVA, Ryan de Albuquerque. A cadeia produtiva de Terras Raras (TR): desafios e oportunidades para o Brasil. **Rev. Iniciativa Econômica**, Araraquara, v. 11, n. 00, e025005, 2025. e-ISSN: 2358-5951. DOI: 10.64997/2358-5951-19892



- | Submetido em: 11/12/2024
- | Revisões requeridas em: 13/12/2024
- | Aprovado em: 08/04/2025
- | Publicado em: 23/12/2025

Editor: Prof. Dr. Gustavo Pereira Serra

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro – RJ – Brasil. Doutorando em Programa de Pós-Graduação em Economia da Indústria e da Tecnologia (UFRJ).

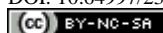
RESUMO: Este artigo visa descrever e analisar a Cadeia Produtiva de Terras Raras - “TR”, destacando os desafios e oportunidades para o seu desenvolvimento no Brasil. As TR são um conjunto de 17 elementos químicos, classificados como minerais estratégicos de importância para o (em curso) processo de transição energética, sofisticação tecnológica e para a indústria de defesa (segurança nacional). A metodologia adotada será uma revisão bibliográfica a respeito das TR no Brasil, ancorada na perspectiva (neo)schumpeteriana setorial no âmbito da Economia Industrial. Neste sentido, este artigo estrutura-se da seguinte maneira: a seção 1 introduz o tema. A seção 2 descreve o conceito de TR, seus campos de aplicação, sua localização no Brasil, bem como realiza um “paralelo” com outras duas indústrias: a de aço e a de silício. A seção 3 reflete, dentro do arcabouço (neo)schumpeteriano, a relação da Taxonomia Setorial de Pavitt (1984, 1989) com a Taxonomia das TR. A seção 4 descreve, de fato, a cadeia produtiva de TR, ressaltando o caso brasileiro para o seu desenvolvimento. Por fim, a seção 5 corrobora com as considerações finais sobre o tema. Em suma, destaca-se a importância de se desenvolver a cadeia produtiva de TR para o adensamento produtivo da indústria brasileira. Todavia, apesar das vantagens/potencialidades do Brasil enquanto detentor deste recurso natural, o mesmo possui desafios a serem superados para o “desenvolvimento pleno” / “verticalização” desta cadeia, no longo prazo, sendo, o maior deles, a produção/separação dos óxidos individualizados de TR na etapa upstream da referida cadeia.

PALAVRAS-CHAVE: Cadeia Produtiva de Terras Raras. Brasil. Verticalização. Taxonomia Setorial de Pavitt. Adensamento Produtivo.

CLASSIFICAÇÃO JEL: L70, O30, Q00.

RESUMEN: *Este artículo tiene como objetivo describir y analizar la Cadena Productiva de las Tierras Raras (TR), destacando los desafíos y las oportunidades para su desarrollo en Brasil. Las TR constituyen un conjunto de 17 elementos químicos, clasificados como minerales estratégicos de relevancia para el actual proceso de transición energética, la sofisticación tecnológica y la industria de defensa (seguridad nacional). La metodología adoptada consiste en una revisión bibliográfica sobre las TR en Brasil, sustentada en la perspectiva (neo)schumpeteriana sectorial en el marco de la Economía Industrial. En este sentido, el artículo se estructura de la siguiente manera: la sección 1 introduce el tema; la sección 2 describe el concepto de TR, sus campos de aplicación, su localización en Brasil, así como establece un “paralelo” con otras dos industrias: la del acero y la del silicio; la sección 3 analiza, dentro del marco (neo)schumpeteriano, la relación entre la Taxonomía Sectorial de Pavitt (1984, 1989) y la Taxonomía de las TR; la sección 4 describe propiamente la cadena productiva de las TR, resaltando el caso brasileño para su desarrollo; finalmente, la sección 5 presenta las consideraciones finales sobre el tema. En síntesis, se destaca la importancia de desarrollar la cadena productiva de las TR para el fortalecimiento y la densificación productiva de la industria brasileña. No obstante, a pesar de las ventajas y potencialidades de Brasil como poseedor de este recurso natural, el país enfrenta desafíos que deben ser superados para el “desarrollo pleno” y la “verticalización” de dicha cadena en el largo plazo, siendo el principal de ellos la producción y separación de los óxidos individualizados de TR en la etapa upstream de la referida cadena.*

PALABRAS CLAVE: Cadena Productiva de Tierras Raras. Brasil. Verticalización. Taxonomía Sectorial de Pavitt. Densificación Productiva.

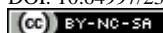


CLASIFICACIÓN JEL: L70, O30, Q00.

ABSTRACT: This article aims to describe and analyze the Rare Earth Production Chain - "RE", highlighting the challenges and opportunities for its development in Brazil. RE are a set of 17 chemical elements, classified as strategic minerals of importance for the (ongoing) process of energy transition, technological sophistication and for the defense industry (national security). The methodology adopted will be a bibliographic review about RE in Brazil, anchored in the (neo) Schumpeterian sectoral perspective within the scope of Industrial Economics. In this sense, this article is structured as follows: section 1 introduces the theme. Section 2 describes the concept of RE, its fields of application, its location in Brazil, as well as draws a "parallel" with two other industries: steel and silicon. Section 3 reflects, within the (neo) Schumpeterian framework, the relationship between Pavitt's Sectoral Taxonomy (1984; 1989) and the RE Taxonomy. Section 4 describes the RE production chain, highlighting the Brazilian case for its development. Finally, section 5 corroborates the final considerations on the subject. In short, the importance of developing the RE production chain for the productive densification of the Brazilian industry is highlighted. However, despite Brazil's advantages/potential as a holder of this natural resource, it has challenges to be overcome for the "full development"/"verticalization" of this chain in the long term, the biggest of which is the production/separation of individualized RE oxides in the upstream stage of the aforementioned chain.

KEYWORDS: Rare Earth Production Chain. Brazil. Verticalization. Pavitt's Sectoral Taxonomy. Productive Densification.

JEL CLASSIFICATION: L70, O30, Q00.



Introdução

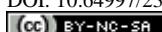
A utilização de recursos naturais numa — ou “como uma” — estratégia de desenvolvimento produtivo não é algo novo. O carvão e o petróleo são clássicos exemplos a serem considerados. Entretanto, o agravamento das condições climáticas do planeta no século XXI aponta para a necessidade de busca por novas matérias-primas capazes de viabilizar fontes alternativas de energia às já existentes, por estas últimas serem geradoras de gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera, agravando assim, a questão do Aquecimento Global.

Somada à esta urgência climática global, determinantes de competitividade cada vez mais criteriosos, aumento da eficiência da produtividade industrial, questões de segurança nacional — num mundo cada vez mais suscetível às guerras — e uma crescente “corrida pela soberania tecnológica” — especialmente entre superpotências — fomentam, ainda mais, essa busca por novas fontes de matérias-primas que respondam, deem conta ou ao menos colaborem com soluções para essas questões.

Mas... e o Brasil? Qual tem sido — ou pode ser — a sua representatividade nesse atual contexto econômico global, marcado por estas três grandes questões: *i) transição e segurança energética, ii) corrida por soberania tecnológica e iii) segurança/defesa nacional?* Será que o país tem condições de, num mundo em transição, ser um dos “pioneiros” a romper limites e paradigmas alternativos para uma nova ordem mundial? Como a questão dos “novos” recursos naturais no Brasil apontariam e apontam para essa direção?

Sob estes questionamentos, o objetivo deste artigo será o de descrever a Cadeia Produtiva de Terras Raras (TR), ressaltando a importância, desafios e oportunidades de desenvolvê-la plenamente no Brasil. À primeira vista, parece-nos tratar-se de um esforço teórico “contraditório”: analisar a cadeia de valor de TR para compreender as possibilidades de rupturas de um paradigma, onde o segundo conceito representa a ruptura e reestruturação do primeiro. No entanto, por outro lado, um “micro” paradigma (Dosi, 1988) requer um novo insumo — disponível em grande quantidade e baixo custo — que possibilita a produção de novos produtos que se difundem transversalmente entre as atividades econômicas; o “macro” paradigma (Freeman; Pérez, 1988) pressupõe sinergias entre as novas tecnologias — vários “micros” paradigmas — que rompem com as “velhas estruturas” (Schumpeter, 1984).

As Terras Raras são um conjunto de 17 elementos químicos, que recebem esta nomenclatura (“raras”) por serem consideradas de difícil extração, concentração e beneficiamento mineral, e não em relação à sua distribuição geográfica (Klinger, 2018). Atualmente, o Brasil é o segundo maior detentor de depósitos de TR do mundo, com cerca de



21 milhões de toneladas em reservas, atrás somente da China — que detém cerca de 44 milhões de toneladas em reservas (USGS, 2025). Obviamente, ser apenas um “detentor de reservas de TR” não garante ao país *inovação, desenvolvimento produtivo e competitividade industrial* — o motivo das “inquietações” deste trabalho.

Sendo assim, este artigo debruça-se sobre tal questão, estruturando-se da seguinte maneira: a seção 2 descreve o conceito de TR, seus campos de aplicação e a sua localização no Brasil; a seção 3 reflete, dentro do arcabouço (neo)schumpeteriano, a relação da Taxonomia Setorial de Pavitt (1984, 1989) com a Taxonomia das TR; a seção 4 descreve, de fato, a cadeia produtiva de TR, ressaltando o caso brasileiro para o seu desenvolvimento; e por fim, a seção 5 corrobora com as considerações finais sobre o tema.

Em suma, destaca-se a importância de se desenvolver a cadeia produtiva de TR para o adensamento produtivo da indústria brasileira. Todavia, apesar das vantagens e potencialidades do Brasil enquanto detentor desse recurso natural, ele possui desafios a serem superados para o “desenvolvimento pleno” e “verticalização” dessa cadeia a longo prazo.

Terras Raras (TR): conceito, aplicações e localização no Brasil

Nas definições de Lapido-Loureiro (1994, p. 189) e da International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC, 2017), os Elementos de Terras Raras (ETR) — doravante Terras Raras (TR) — correspondem ao intervalo da tabela periódica constituído de 15 elementos químicos, denominados lantanídeos, de número atômico Z, compreendido entre os números 57 (lantânio) a 71 (lutécio). Incorporam-se a essa classificação os elementos escândio (Z = 21) e ítrio (Z = 39), por possuírem propriedades semelhantes e, portanto, uma associação ao referido intervalo do ponto de vista mineralógico.

Devido às suas características singulares, os 17 elementos de terras raras são classificados em 3 subgrupos (Figura 1):

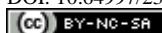
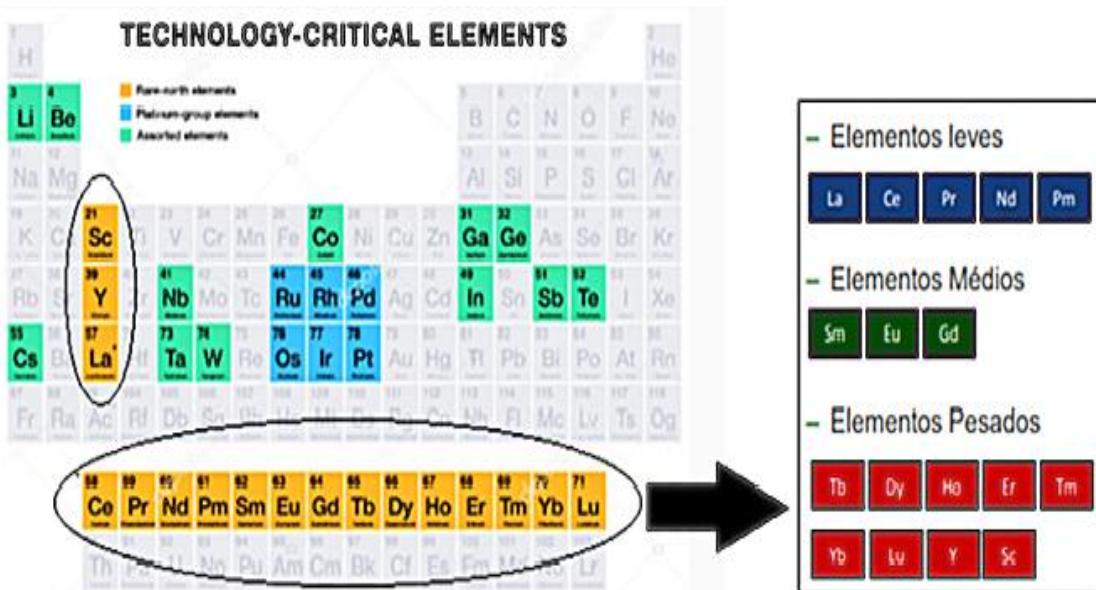


Figura 1 – Apresentação e classificação dos 17 elementos de TR na Tabela Periódica

Fonte: Elaboração própria, com base em IUPAC (2017) e MbAC Fertilizantes (2013, p. 2).

Nessa direção, o que vem chamando a atenção para esse recurso natural seria a sua viabilidade econômica: “atualmente, pode-se afirmar que o desenvolvimento de uma nação é medido pelo consumo de TR para aplicações em tecnologia de ponta” (Sousa Filho; Serra, 2014, p. 753). Ademais, no que refere-se às tecnologias relacionadas a energias limpas e controle de emissões atmosféricas, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) argumenta que as cadeias produtivas são “fortemente dependentes de TR”, sendo essenciais, especialmente na fabricação de quatro produtos e suas respectivas utilidades:

- Ímãs permanentes*, usados em turbinas eólicas e veículos elétricos;
- Baterias avançadas*, utilizadas em veículos elétricos;
- Semicondutores finos-filmes*, usados em sistemas de energia fotovoltaica;
- Fósforos*, utilizados em sistemas de iluminação mais eficientes (CGEE, 2013, p. 29).

Aqui, cabe realizar um “paralelo” com outras duas indústrias: a de aço e a de silício. A primeira vez que o aço foi utilizado de fato na construção civil remonta ao século XIX. A ideia do aço como material de construção foi impulsionada pela *Revolução Industrial*, que trouxe avanços significativos na siderurgia, permitindo a produção em larga escala e a custos reduzidos. O maior avanço do aço na construção ocorreu no início do século XX, permitindo a construção de estruturas muito mais altas e resistentes do que seria possível com materiais tradicionais. Um clássico exemplo é o Edifício Chrysler — concluído em 1930 — que alcançou alturas impressionantes graças à resistência do aço (Awa Comercial, 2025). Atualmente, é possível fazer a usinagem de uma peça em aço na forma ou modelo que precisa para a aplicação

devida. Uma dessas técnicas é em *3D*, que trata-se de um processo que cria peças e protótipos para a indústria por meio de um sistema que interpreta o projeto de uma peça, fazendo uso de um *software*: “a indústria siderúrgica vem aproveitando as oportunidades de melhoria na produção oferecidas pelos sistemas e soluções que fazem parte da *Indústria 4.0*, implantando processos de produção inteligentes” (Sacchelli, 2025, [n. p.]).

Já o silício — principal elemento usado na fabricação de semicondutores — pode ser analisado revisitando sua participação em três marcos tecnológicos (USP, 2025):

- Em 1947, um grupo de Standford inventou o *transistor*. Usando semicondutores, os transistores poderiam substituir as válvulas, sendo menores, mais rápidos e mais duradouros, além de não esquentarem tanto nem consumirem tanta energia. Surgiram assim, os primeiros computadores transistorizados;
- Nos anos 60, sob a influência do programa espacial americano, o desenvolvimento da microeletrônica levou a construção de circuitos transistorizados integrados em uma única pastilha de silício (*chip*) de dimensões reduzidas. Dezenas de milhares de transistores são integrados em um *chip* de alguns milímetros quadrados, dando origem aos circuitos integrados microminiaturizados. Isso possibilitou o surgimento de minicomputadores: computadores poderosos do tamanho de uma escrivaninha;
- Em 1970, a Intel, empresa norte-americana, produziu o primeiro microprocessador. Um microprocessador é um circuito integrado do tipo LSI (*large scale integration*) que contém todo circuito lógico de uma unidade central de processamento em um *chip* do tamanho de uma unha; os microprocessadores foram usados na construção de mini e microcomputadores. Os avanços nessa direção prosseguem até hoje com os circuitos VLSI (*very large scale integration*) e os circuitos ULSI (*ultra large scale integration*). Também nos anos 70, surgiram grandes computadores, conhecidos como *mainframes*, imensamente poderosos. Hoje em dia, temos os chamados supercomputadores, como o *Deep Blue*, com velocidade superior a 500 MIPS — milhões de instruções por segundo. Atualmente, o mesmo ocorre com as TR, no que tange à sua utilização em diversos setores.

O Quadro 1 apresenta a “Taxonomia das TR”, desenvolvida pelo CGEE em 2013:



Quadro 1 – Taxonomia única para o estudo prospectivo de TR

Uso industrial	Aplicação de TRs	Funcionalidade habilitadora	Elementos TRs requeridos
Veículos elétricos, híbridos, <i>plug-in</i>	Ímãs permanentes	Motores de tração elétrica, substituindo ou suplementando motores de combustão interna	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Motores elétricos em veículos convencionais e avançados	Ímãs permanentes	Redução do consumo de combustível pela diminuição do peso do veículo	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Geração de energia eólica e hidrelétrica	Ímãs permanentes	Geradores sem engrenagem para maior confiabilidade e desempenho	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Ferramentas elétricas sem fio	Ímãs permanentes	Motores elétricos compactos, leves e potentes	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Sistema integrado automático de partida	Ímãs permanentes	Sistema integrado automático de partida, reduzindo consumo de combustível	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Unidades de discos rígidos para computadores	Ímãs permanentes	Motores elétricos compactos, leves e potentes	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Dispositivos pessoais móveis sem fio	Ímãs permanentes	Aparelhos compactos, leves e potentes	Nd, Pr, Dy, Tb, Y, Eu, Sm
Equipamentos para diagnóstico por imagem (MRI)	Ímãs permanentes	Geração de campo magnético	Nd, Pr, Dy, Tb, Sm
Unidades de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC)	Catalisadores	Propiciam sítios ácidos para a matriz catalítica	La, Ce, Pr e Nd
Conversores catalíticos e outras tecnologias para redução de emissões atmosféricas	Catalisadores	Capacidade de oxidação de CO e ozônio para CO ₂ e O ₂	Ce, La
Indústria automotiva	Ligas metálicas ferrosas contendo TRs	Modificação de propriedades físicas e químicas para melhoria de desempenho e ampliação do espectro de usos industriais de ligas metálicas	Todos ETRs
Indústria aeroespacial, geração de energia nuclear, fabricação e operação de satélites, linhas de transmissão de energia, sistemas de refrigeração magnética, entre outros	Ligas metálicas não ferrosas contendo TRs	Modificação de propriedades físicas e químicas para melhoria de desempenho e ampliação do espectro de usos industriais de ligas metálicas	Todos ETRs

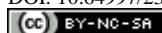


Lâmpadas fluorescentes compactas e lineares, LEDs, entre outros itens de iluminação	Fósforos	Redução no consumo de energia, com melhoria das características de cor e luminescência	Y, Eu, Tb
Dispositivos pessoais móveis sem fio	Fósforos	Displays em telas planas	Y, Eu, Tb, Gd, Ce
Telas planas de TV e displays	Fósforos (excitados por UV em baixa pressão)	Cores brilhantes – vermelha, verde e azul – em grandes telas planas	Y, Eu, Tb, Gd, Pr, Ce
Detectores de raios X e raios gama	Fósforos	Captura de luz de cintilação e sistemas de detecção	Y, Eu, Tb, La, Ce
Pós para polimento de vidros e lentes	Pós para polimento	Melhoria das propriedades ópticas de vidros e lentes	Ce
Fabricação de vidros e lentes	Fabricação de vidros e lentes especiais (mudanças de propriedades físico-químicas de vidros e lentes)	Descoloração de vidros, bloqueio de luz ultravioleta e composição de lentes e vidros especiais (usos em medicina e indústria aeroespacial, dentre outros)	La, Ce, Nd, Pr, Yb, Ho, Er
Fibras ópticas para telecomunicações	Fibras ópticas dopadas com TRs	Amplificação de sinal	Y, Eu, Tb, Er, Nd e Ho
Sensores de gases, incluindo CO	Cerâmicos	Monitoramento e controle de emissões gasosas Melhoria de desempenho de motores a combustão	Y
Lasers para usos diversos (medicina, defesa e outros)	Cerâmicos	Orientação de artefatos de defesa, precisão de corte e incisões	Y, Nd e outros
Dispositivos de armazenagem de energia (capacitores cerâmicos, de tântalo e de outros tipos dopados com TRs)	Cerâmicos	Alta densidade energética em comparação com capacitores convencionais	Todas TRs
Dispositivos de armazenagem de energia	Baterias de níquel - metal -hidreto - (Ni-MH)	Melhor custo-benefício dessa tecnologia, quando comparado a baterias de íons de lítio	La

Fonte: CGEE (2013, p. 50-51).

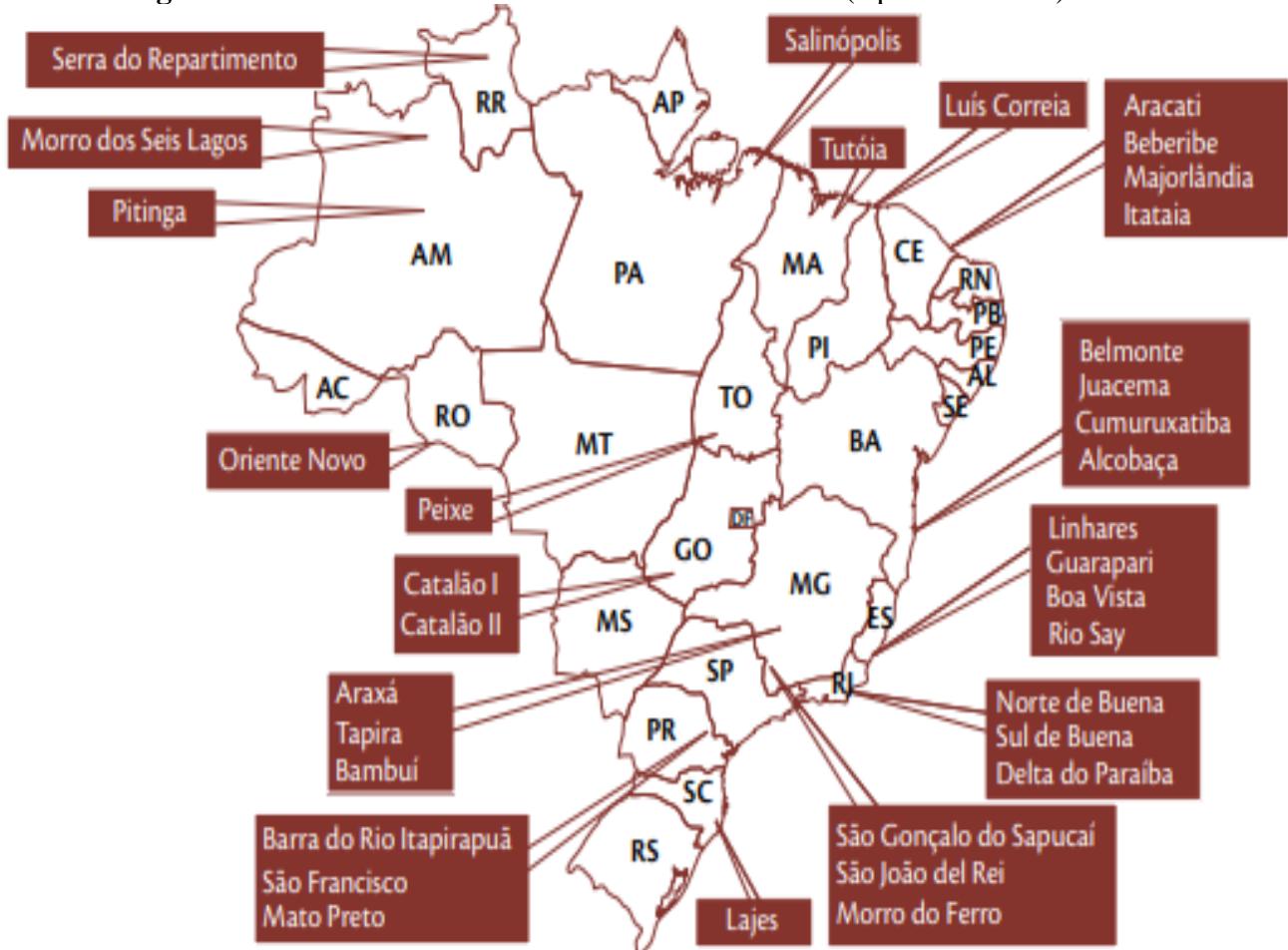
Em linhas gerais, podemos compreender as TR como sendo, essencialmente,

[...] um conjunto de 17 elementos químicos utilizados em muitos processos industriais, especialmente em baterias e equipamentos eletrônicos. Estão presentes em produtos que incorporam tecnologias sofisticadas e nas chamadas *high tech*, como automóveis, em especial carros híbridos e elétricos, motores de aviões, navios, telas LCD e LED, smartphones, computadores, tablets, fibras óticas, turbinas eólicas e placas fotovoltaicas, equipamentos para refinarias de petróleo, iluminação de displays, ímãs de alto rendimento e resistentes a altas temperaturas, íons de TR como agentes de contrastes para diagnósticos não invasivos em tecidos por imagem de ressonância magnética nuclear, marcadores luminescentes na investigação de enzimas, anticorpos, células e hormônios, entre outros produtos e aplicações industriais e biológicas; além do seu uso militar em mísseis e bombas de precisão, sendo, portanto, considerados estratégicos para a defesa e a tecnologia (Melo, 2017, p. 226-227; Martins; Isolani, 2005, p. 111).



A figura 2 a seguir apresenta as ocorrências de TR no Brasil. Observa-se que, desde 2010, o Brasil já vem descobrindo diversos locais que apresentam esses elementos:

Figura 2 – Descobertas de ocorrências de TR no Brasil (a partir de 2010)



Fonte: CGEE (2013, p. 74).

Desde 2010, outros locais que apresentam TR foram descobertos no Brasil. Destaca-se que em 2023 descobriu-se dois grandes depósitos de TR em argilas iônicas: *no norte de Goiás e na região de Poços de Caldas, em Minas Gerais*. Caracterizam-se por serem duas raras localizações no mundo com essas características geológicas fora da China — principal detentor e produtor minerador de TR.

Dada a abundância deste recurso natural em solo brasileiro bem como a sua viabilidade econômica, a seção seguinte discute — dentro do arcabouço (neo)schumpeteriano — a potencial utilização das TR para o *adensamento produtivo da indústria brasileira*.

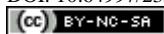
Terras Raras, Padrões Setoriais e Inovação: há relação possível?

Partindo da literatura schumpeteriana sobre “concorrência”, coloca-se como discussão central a lógica da *inovação*. Sendo assim, o impacto do processo inovativo sobre a atividade econômica e demais eventos possuem caráter, essencialmente, de *natureza cumulativa*. Em outras palavras, significa dizer que *o processo evolutivo é associado à noção de trajetória*, e não a posições estáticas. Tal processo é dependente do que foi desenvolvido no período que o antecedeu.

Os avanços neoschumpeterianos realizados nessa direção argumentam que as estruturas de mercado, inovação e competitividade seriam concebidas em um ambiente de inovação tecnológica distinta da vertente neoclássica. Aqui, o campo técnico é visto como um processo *dinâmico* — visão evolucionária —, de natureza acumulativa e irreversível em relação à trajetória tecnológica percorrida (Nelson; Winter, 1982). A resolução de entraves técnicos estaria associada a um conjunto de conhecimentos, informações e capacitações desenvolvidas no tempo, moldando trajetórias formadas a partir de determinantes práticos, científicos ou econômicos (Saviotti; Metcalfe, 1984).

Nessa concepção, Dosi (1988) argumenta serem as trajetórias tecnológicas as “definidoras” das direções prováveis do progresso técnico e respectivas fronteiras, possibilitando excluir as tecnologias anteriores ou rivais. Vale ressaltar que as trajetórias tecnológicas seriam subjacentes às trajetórias industriais (setoriais), porém ambas atuando em plena *sinergia* uma com a outra.

Essa contextualização se fez necessária para entendermos como a temática das TR vincula-se às noções de *inovação*, *trajetória tecnológica* e *competitividade*. Essa relação será mensurada mediante a uma análise baseada na atemporal *Taxonomia Setorial* de Pavitt (1984, 1989). A referida tipologia — relacionada à geração e difusão de inovações — visou e visa identificar semelhanças e diferenças — isto é, “diversidade” — em distintos setores e tecnologias. A base de dados foi o banco de dados do SPRU sobre inovações da indústria britânica entre 1945-1980 — cerca de 2000 empresas, contemplando mais da metade dos setores de 3 a 4 dígitos —, sendo compatível para o Brasil. Mesmo adotando como unidade granular a firma, o objetivo dessa tipologia é identificar padrões (regularidades) setoriais ligados às *trajetórias tecnológicas*, algo que está na “gênese” da cadeia produtiva de TR (seção 4). Assim, ao confrontarmos a Taxonomia Setorial de Pavitt com a Taxonomia das TR desenvolvida pelo CGEE (Quadro 1), podemos observar uma correlação interessante, de caráter essencialmente “sistêmico” e cooperativo entre essas duas taxonomias:



Primeiramente, apresentamos a *tipologia em classes de setores*, desenvolvida por Pavitt (1984, 1989). Essa tipologia visa descrever e explicar similaridades e diferenças entre os setores em relação às fontes, natureza e impactos das inovações, definidas: i) pelas fontes de conhecimento; ii) pelo tamanho; e iii) pelas principais linhas de atividades das firmas inovativas e pelos setores de produção de inovações e seus usuários principais.

Em sua primeira edição, Pavitt (1984) classificou as firmas em “quatro categorias”: a) “setores dominados por fornecedores”; b) “setores intensivos em economias de escala”; c) “setores baseados em ciência”, e d) “setores de fornecedores especializados”. Todavia, como veremos mais adiante, essa classificação foi revisada por Tidd, Bessant e Pavitt (2001) para “cinco categorias”, com a inclusão do *setor intensivo em informação* (Pavitt, 1989).

O Quadro 2 a seguir contempla e analisa as cinco categorias:

Quadro 2 – Classes de setores definidas na Taxonomia Setorial de Pavitt (1984, 1989)

Classes de setores	Setores típicos	Trajetória tecnológica					Tamanho da firma	Tipo de usuário
		foco	fonte	direção	canais de transferência	proteção		
(i) Dominados pelos fornecedores (“ <i>supplier dominated</i> ”)	agrícolas, serviços privados, construção, indústria manufatureira tradicional	redução de custos	fornecedor, aprendizado, serviços técnicos	tecnologia de processo e equipamentos afins → a montante	aquisição de equipamentos e serviços correlatos	não-técnica (marketing, marcas)	pequeno	sensível a preço
(ii) Intensivos em escala (“ <i>scale intensive</i> ”)	intermediários de uso difundido (aço, vidro), duráveis de consumo (automóveis)	misto (preço, qualidade, especificações)	engenharia de produção, aprendizado próprio, fornecedores, projeto	tecnologia de processo e equipamentos afins; a montante	aquisição de equipamentos, licenciamento, treinamento, engenharia reversa	segredo de processo; know-how de projeto e operação	grande	misto
(iii) Intensivos em informação (“ <i>information intensive</i> ”)	financeiro, comércio varejista, turismo, editorial	misto	software e engenharia de sistemas, fornecedores de equipamentos e de software	tecnologia de processo e software correlato; a montante e a jusante (misto)	aquisição de equipamentos e software, engenharia reversa	copyright; know-how de projeto e operação	grande	misto
(iv) Baseados em ciência (“ <i>science based</i> ”)	eletro-eletrônica, química	misto	P&D interno e pesquisa básica, engenharia de produção e de projeto	produtos tecnologicamente relacionados → “concêntrica”	engenharia reversa, P&D, contratação de especialistas	know-how de P&D, patentes, know-how de projeto e operação	grande	misto
(v) Fornecedor especializado (“ <i>specialized supplier</i> ”)	bens de capital, instrumentação científica, software	aperfeiçoamento de produtos	projeto e desenvolvimento de produtos, usuários avançados	aperfeiçoamento de produtos → “concêntrica”	engenharia reversa, aprendizado com usuários	know-how de projeto, patentes, conhecimento de necessidades dos usuários	pequeno	sensível a performance

Fonte: Elaboração própria com base em Pavitt (1984, 1989).

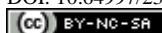
Partindo da Taxonomia Setorial de Pavitt de 1984, obtemos “quatro” das “cinco” as *classes de setores* listadas acima: *i) dominados pelos fornecedores; ii) intensivos em escala; iv)*



baseados e ciência, e v) fornecedor especializado. No entanto, ao longo do tempo, realizaram-se algumas reformulações nessa tipologia:

De acordo com Archibugi (2001), Pavitt (1989), buscando classificar as firmas intensamente vinculadas à informação típicas dos setores de serviços, introduziu um quinto padrão: (*iii) intensivas em informação*. Com o tempo, a introdução desta nova categoria produziu o desaparecimento do padrão *dominados por fornecedores*, que segundo Archibugi (2001) se viam forçadas a tornar-se intensivas em escala ou intensivas em informação (ou então não inovar). Contudo, argumenta Archibugi (2001), a retirada da trajetória tecnológica dominados por fornecedores é um equívoco, pois consiste em padrão distinto e significativo, consistindo de setores inovativos ao adquirir máquinas e equipamentos. Portanto, as várias trajetórias tecnológicas originais possuem papel em representar a realidade como já demonstrado no caso italiano (Archibugi *et al.*, 1991; Evangelista *et al.*, 1997); no caso espanhol, como apresentado por Molero (1994) e Urraca (1997); e, no caso brasileiro por Campos e Ruiz (2009) e Silva e Suzigan (2014). Posteriormente, Tidd *et al.* (2001) revisaram a taxonomia e suas alterações, definindo um modelo com cinco categorias, os originais com a introdução de “intensivos em informação” (Hamberger; Botelho, 2015, p. 3).

Para os propósitos finais deste trabalho, adotaremos a revisão proposta por Tidd, Bessant e Pavitt (2001), levando novamente em consideração as cinco classes de setores descritas (Pavitt, 1984, 1989). Isso porque a Taxonomia das TR pode ser observada, mesmo que “indiretamente”, em algumas destas classes — como os “setores típicos” e a “fonte” para a classe 3, por exemplo. Agora, “espelhando o Quadro 1 sobre o Quadro 2”, conseguimos identificar em quais dessas classes a Taxonomia das TR se enquadra diretamente:



Quadro 3 – A relação entre a Taxonomia Setorial de Pavitt e a Taxonomia das TR

TAXONOMIA SETORIAL DE PAVITT (1984;1989)	TAXONOMIA DAS TERRAS RARAS (TR)
Classes de setores	Se aplica¹ Não se aplica²
(i) Dominados pelos fornecedores (“supplier dominated”)	X
(ii) Intensivos em escala (“scale intensive”)	X
(iii) Intensivos em informação (“information intensive”)	X
(iv) Baseados em ciência (“science based”)	X
(v) Fornecedor especializado (“specialized supplier”)	X

1 e 2: Os critérios “se aplica” e “não se aplica” referem-se à uma potencial **relação direta** da utilização de TR com as classes de setores. Complemento: “Anexo A” e “Anexo B”.

Fonte: Elaboração própria.

Vemos que a Taxonomia das TR se relaciona diretamente com, ao menos, 60% (3/5) dos segmentos ligados às classes setoriais discriminadas por Pavitt. Reitera-se que os critérios “se aplica” e “não se aplica” levaram em consideração uma possível “relação direta” da utilização de TR com as classes elencadas na Taxonomia Setorial de Pavitt (1984, 1989). Como uma indústria extractiva mineral, a cadeia produtiva de TR pode ser — em certa medida — considerada “baseada em ciência” por previamente deter conhecimento científico nos processos de extração, processamento e refino (etapas 1 a 7 – figura 3). A “ciência” também está presente na etapa 8 (figura 3), entre os usuários — e, possivelmente, os desenvolvedores — das ligas minerais. As etapas 1 a 7 podem ser majoritariamente classificadas como “dominadas pelos fornecedores” — máquinas, equipamentos e pesquisas para prospecção (indústrias extractivas) — ou “intensivas em escala” — semelhante às siderúrgicas tradicionais. Nesse último caso, as indústrias brasileiras são pouco competitivas por baixas economias de escala.

Mesmo com um olhar em termos de “firma”, a *Taxonomia Setorial de Pavitt ajuda-nos a identificar em quais setores/segmentos a utilização de TR pode atuar como uma via de encadeamento inter e intrasetorial*. Dado o elevado grau de cumulatividade tecnológica e de valor da cadeia produtiva de TR, depreende-se que o desenvolvimento dessa cadeia com a sua posterior utilização nos *forward threads* (“encadeamentos para frente”) nos demais setores industriais, podem atuar como um mecanismo de *adensamento produtivo* na indústria brasileira



— em especial nas cadeias de produtos — fortalecendo, em certa medida, os “elos” a serem preenchidos pelos atores locais. Isso representa uma alternativa à persistente “reprimarização” ou “especialização regressiva” da indústria brasileira.

Destacada a relevante contribuição das TR para o adensamento setorial e das cadeias produtivas na indústria brasileira, a seção seguinte visa descrever a *Cadeia Produtiva de TR*, discutindo os desafios e oportunidades para o Brasil para a plena verticalização da mesma.

A Cadeia Produtiva de Terras Raras (TR): perspectivas para o Brasil

Mais importante que a atividade de mineração de TR no Brasil é a construção de uma cadeia produtiva para se agregar valor ao recurso natural. Apesar de importantes iniciativas, é clara a falta de uma política industrial para as TR no Brasil. Apesar de muito importantes, as iniciativas não devem se limitar à produção de mais uma mercadoria mineral para exportação, mas devem incluir atividades de pesquisa e desenvolvimento e de processamento das TR, de forma a construir uma indústria de alta tecnologia e de alto valor agregado no Brasil, a exemplo do que ocorreu e ocorre na China (Lima, 2011, p. 34).

Esta seção visa esquematizar a Cadeia Produtiva de Terras Raras (TR). Em linhas gerais, Lima pontua que esta cadeia é e pode ser decomposta em várias etapas:

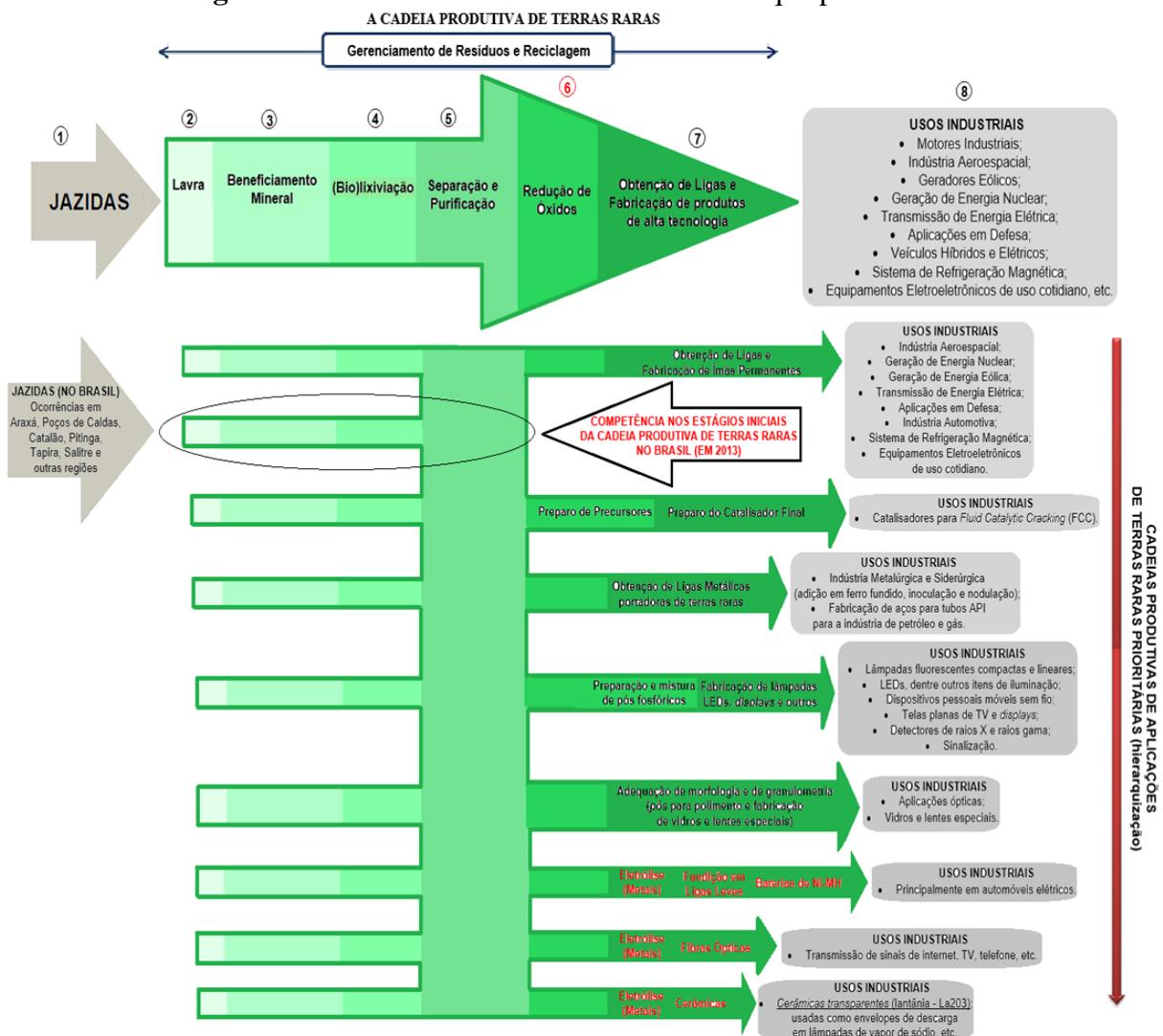
Inicialmente, extraí-se o minério que contém esses elementos. Depois de extraído, o minério é triturado e moído. Em seguida, em geral por um processo de flotação², obtém-se o minério concentrado que contém terras-raras. Depois da concentração, ocorre a separação dos diferentes óxidos de terras-raras. Depois desse processamento primário, os óxidos são refinados e convertidos em metais, que depois são combinados com outros metais para se produzir as ligas contendo terras-raras. Essas ligas são usadas em centenas de aplicação, principalmente na área de alta tecnologia (Lima, 2011, p. 14).

A Figura 3 descreve as etapas para o desenvolvimento pleno da cadeia (“verticalização”) em 8 estágios, bem como a outrora participação do Brasil nesses estágios.

² Processo para a separação dos componentes das misturas heterogêneas, com base nas massas específicas (Lima, 2011, p. 14).



Figura 3 – A Cadeia Produtiva de TR e o destaque para o Brasil



Fonte: Elaboração própria com base em CGEE (2013), Prata (2013) e Salomão (2023).

Como observado na figura 3 acima, para que ocorra a verticalização da cadeia produtiva de TR, necessita-se o domínio desses 8 estágios. A China, em cerca de 20 anos, desenvolveu toda a cadeia produtiva de TR (Salomão, 2023). Ainda na figura 3, observa-se uma “hierarquização”, isto é, um ordenamento das cadeias produtivas de TR prioritárias a serem desenvolvidas, a começar pela *cadeia produtiva de ímãs permanentes de TR*. Para o Brasil, seria essa a cadeia de TR com maior potencial de desenvolvimento pleno (verticalização). Desde 2013, o Brasil já domina os 5 primeiros estágios.

Idealmente, em linhas gerais, o país deveria dispor-se a localizar e enraizar essas atividades internamente (estágio 8), propondo uma Política Industrial (PI) para a etapa 6 — dominamos, no limite, a etapa 5 — etapa de purificação, estágio ligado à extração para exportação —, que atrairia empresas para as etapas seguintes.



No entanto, um dos primeiros grandes desafios para o desenvolvimento da cadeia produtiva de TR no Brasil, o tradicional processo de *lixiviação* (estágio 4), descredibilizando o processo de transição energética que visa colaborar para a “sustentabilidade”:

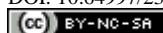
Uma das técnicas de triagem mais utilizadas consiste no *processo de lixiviação seguido da extração por solvente*. [...] Para os minérios de baixo teor, esses métodos convencionais geralmente exigem uma alta demanda de energia para gerar altas temperaturas ou dispendem do uso de maior quantidade de reagentes químicos, o que aumenta o custo do processo e geração de resíduos (Barmettler *et al.*, 2016). Assim, há uma necessidade de se buscar novas metodologias alternativas de extração de TRs a partir destes minerais (Souza; Nascimento; Giese, 2019, p. 4).

Entretanto, novas técnicas — ecologicamente mais sustentáveis — para a extração desse recurso natural já estão sendo difundidas e adotadas — inclusive no Brasil. Uma dessas técnicas é a *biolixiviação* aplicada às TR que, assim como outras mais alternativas sustentáveis, necessita ser consolidada ao longo de toda a cadeia:

A *biohidrometalurgia* pode ser considerada uma tecnologia verde emergente para a recuperação de metais devido ao seu processamento ambiental amigável, simples e econômico. A *biolixiviação* consiste em um processo hidrometalúrgico de água de minerais através da ação de um grupo de microrganismos capazes de produzir ácidos e/ou agentes oxidantes a partir dos constituintes do próprio minério em processo de lixiviação (GIESE, 2017; GIESE, 2019). Seria, portanto, um processo de *biossolubilização*, de diferentes minerais portadores de TRs. [...] Essa rota alternativa para a recuperação de TRs pode apresentar vantagens como a economia de insumos (ácidos e agentes oxidantes), visto que os micro-organismos afetados produzem tais insumos como metabólitos secundários a partir dos constituintes do minério. O processo biohidrometalúrgico apresenta ainda menor requerimento energético, baixo investimento de capital inicial e menor custo operacional (Yamane, 2012, apud Souza *et al.*; 2019). [...] A aplicação de técnicas de *biolixiviação* para o tratamento de resíduos sólidos pode contribuir para uma economia mais sustentável e ecologicamente correta (Souza; Nascimento; Giese, 2019, p. 14-19).

Porém, como maior desafio para a verticalização da cadeia produtiva de TR no Brasil, destaca-se a importação — ou seja, “não-produção” — de óxidos de TR (estágio 6). Para que se tenha o pleno domínio da cadeia de TR, o Brasil precisa desenvolver (“produzir”) esse estágio, com o apoio das universidades, institutos, financiamentos — público e privado — e P&D — estes apoiados pelas esferas municipal, estadual e federal.

Como enfatiza Fernando Landgraf, professor da Escola Politécnica da USP e coordenador do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT), é necessário que o país desenvolva a indústria intermediária para produzir os óxidos de TR: “o Brasil tem os minerais



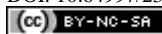
e a ponta do consumo, mas falta o meio, que é a produção dos óxidos” (Landgraf, 2023, [n. p.]). O mesmo ainda alerta: “O óxido de neodímio, por exemplo, que sai da indústria intermediária, custa dez vezes mais que o produto que sai das minas” (Landgraf, 2023, [n. p.]).

Nesse sentido, o INCT já desenvolveu a tecnologia para fabricação de superímãs e o laboratório-fábrica da Codemge, que custou R\$ 80 milhões, financiado pelo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). A demanda por esses minerais pode crescer até seis vezes até 2040. Todavia, a produção *ex-ante* dos óxidos de TR torna-se essencial.

Dada à importância de se desenvolver a cadeia produtiva de TR na indústria brasileira, podemos considerar a cadeia produtiva de ímãs permanentes de TR a mais desenvolvida no Brasil (atualmente). Como destaque, a Universidade de São Paulo (USP) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas criaram o observatório “Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT - Terras Raras)”, desenvolvendo neste uma Linha de Pesquisa que visa o Processamento e Aplicações de Ímãs de Terras Raras para Indústria de Alta Tecnologia (“INCT-PATRIA”) que, essencialmente,

[...] têm como objetivo criar e desenvolver competências científicas, tecnológicas e de recursos humanos, com o intuito contribuir para superar os desafios que cerceiam a competitividade da cadeia produtiva nacional de ímãs de terras-raras (TRs), da mineração até a aplicação industrial, passando pela concentração dos elementos de terras raras, sua separação, a redução eletroquímica dos metais, a produção das ligas, a sinterização dos ímãs, a proteção contra corrosão e sua reciclagem. A articulação da cadeia produtiva visa o domínio tecnológico da produção de ímãs a base de TR-FeB aplicados a tecnologias emergentes, como motores elétricos e geradores eólicos de elevado desempenho. [...] O INCT-Terras Raras (PATRIA) tem linhas de pesquisa que vão desde a extração e beneficiamento dos minérios ricos em terras raras, desenvolvimento de processos para a produção das ligas de Nd-Fe-B, produção e caracterização de super ímãs de terras raras utilizando matéria-prima nacional e, por fim, análise da viabilidade técnica de reciclagem de ímãs com foco na economia circular. Em suma, se o Brasil quiser reduzir as suas emissões de CO₂ e se tornar sustentável economicamente na eletrificação do setor automobilístico, é fundamental o desenvolvimento da sua própria cadeia de suprimentos dos elementos terras raras. Para isso, o financiamento público em pesquisas científicas nas áreas supracitadas é essencial para criar maturidade tecnológica e independência no mercado de matérias-primas (INCT, 2025, [n.p.], grifo do autor).

Para Landgraf (2017), de um lado o país dispõe de grandes reservas minerais desses elementos químicos — início da cadeia: estágio 1 —; e, de outro, grandes usuários dos ímãs em geradores eólicos, equipamentos eletroeletrônicos e de informática — fim da cadeia: estágio 8): “se a cadeia produtiva — da mineração ao ímã — se estabelecer no Brasil, estará aberta a



porta para uma miríade de startups que poderão criar atuadores para tudo o que a *Internet das Coisas* poderá exigir” (Landgraf, 2017, [n.p.]).

Salomão (2023) relata que em 2023, uma nova forma de depósito de TR foi descoberta no Brasil, trazendo uma nova e importante realidade para o país: as *argilas iônicas* (AI):

AI são depósitos secundários ainda pouco estudados. Até recentemente, depósitos de argilas iônicas eram raros fora da China. Havia referências em Mianmar, Madagascar e poucos outros lugares. Existiam garimpos, mas nenhuma mina. A descoberta de AI no norte de Goiás pela Mineração Serra Verde inaugura o primeiro depósito pesquisado e minerado fora da China” (Salomão, 2023, p. 4).

O autor diferencia as TR encontradas/extraiidas *em jazidas primárias* em detrimento das AI:

Jazidas primárias: minas convencionais (eventualmente rocha dura) e altos custos de processamento hidrometalúrgicos, que demanda tecnologia concentrada na China. Os problemas ambientais principais são os depósitos de rejeitos às vezes com radioatividade acima dos limites. Argilas iônicas: minas muito grandes em função do baixo teor e de pequena espessura do minério (geralmente até 10m, embora em Poços de Caldas sejam referidas espessuras bem maiores). Custos de produção mais baixos, cesta de óxidos geralmente mais valiosas, baixos problemas com radioatividade. Os problemas ambientais são principalmente as grandes dimensões das minas, em razão dos baixíssimos teores e pequena espessura das jazidas (Salomão, 2023, p. 8).

Nessa direção, Salomão (2023) salienta que as argilas iônicas podem tornar o Brasil, em prazo relativamente curto, num importante produtor de óxidos e carbonatos de TR, podendo atrair indústrias *downstream* da cadeia produtiva e gerando demanda interna e recursos para desenvolvimento de outras etapas da produção. No entanto, o autor frisa ser a cadeia produtiva *downstream* de TR muito mais complexa — e sofisticada — do que cadeias monominerálicas. As TR passam por uma complexa e agregada cadeia de produção até servirem como insumos em produtos no mercado, sintetizada a Figura 4:



Figura 4 – Síntese das etapas *upstream* e *downstream* da Cadeia Produtiva de TR



Fonte: MbAC Fertilizantes (2013, p. 4).

A fim de viabilizar o desenvolvimento dessa cadeia, vemos que ao menos desde 2011, o Brasil possui iniciativas³ de Instituições e Centros de Pesquisa nessa direção:

[...] o Brasil conta com grupos de pesquisa distribuídos em muitas universidades e centros de pesquisa. Instituições de pesquisa da área nuclear têm importante atuação na área de terras-raras, pois, associada à monazita até então explorada no Brasil, há ocorrência de tório e urânio. Entre as instituições de pesquisas brasileiras, podem ser destacados o Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, a Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, a Universidade Federal de Sergipe – UFS, a Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, a Universidade de São Paulo – USP, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, a Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras – CERTI, o Instituto de Pesquisas Nucleares – IPEN, o Instituto de Energia Nuclear – IEN e o Centro de Desenvolvimento e Tecnologia Nuclear – CDTN (Lima, 2011, p. 31).

Nesse sentido, a iniciativa mais expressiva até o momento foi a aprovação — em fevereiro de 2025 — do *Projeto de Industrialização de Terras Raras* pelo Programa Mover, que contará com produção no Instituto de Terras Raras (CIT SENAI ITR), mantido pelo SENAI e pela FIEMG em Lagoa Santa (MG):

Foi aprovado na última semana o Projeto MagBras, um marco para a industrialização das terras raras no Brasil. A iniciativa estabelece uma cadeia produtiva completa de ímãs permanentes de Neodímio, Ferro e Boro (NdFeB), abrangendo desde a extração e beneficiamento mineral até a fabricação e reciclagem, com aplicações estratégicas nos setores automotivo, de energia

³ Frisa-se que outras iniciativas surgiram - para além das citadas acima.

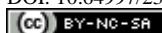
renovável e eletrônico. O projeto foi aprovado na chamada de Projetos Estruturantes do Programa Mobilidade Verde e Inovação (Mover), lançada no ano passado com o apoio do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e da Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa de Minas Gerais (Fundep). Por meio do programa, o Projeto MagBras receberá R\$ 73,3 milhões, consolidando-se como a principal iniciativa para a estruturação da cadeia nacional de ímãs permanentes de terras raras, reduzindo a dependência do Brasil da importação desses materiais estratégicos. Um dos pilares dessa aprovação foi a infraestrutura do Instituto de Terras Raras (CIT SENAI ITR), localizado em Lagoa Santa (MG), que recebeu investimentos da Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG) para se tornar a maior planta de pesquisa aplicada na produção de ímãs permanentes na América do Sul (SENAI, 2025, [n.p.]).

No entanto, dois principais desafios ainda necessitam de serem superados na direção destas iniciativas: i) a persistente fragilidade da relação *universidade - institutos de pesquisa - empresas* no Brasil; e ii) a quase ausência no país de firmas industriais competitivas em atividades de alto valor adicionado. Alinhado à estas ações, Salomão (2023) argumenta parecer “lógico” priorizar, nesse primeiro momento no Brasil *a cadeia upstream, com especial ênfase na separação dos óxidos individualizados de TR* (estágio 6 – figura 3). Disponibilizando desses óxidos, o país será capaz de atrair empresas para a etapa seguinte da cadeia, com a produção de metais e ligas induzindo, consequentemente, a criação de um mercado interno, convergindo para o argumento defendido por Landgraf (2017, 2023).

Conclusão

Este artigo procurou descrever e analisar a Cadeia Produtiva de Terras Raras (TR), destacando os desafios e oportunidades para o seu desenvolvimento no Brasil. Vimos que as Terras Raras são um conjunto de 17 elementos químicos, considerados “minerais estratégicos” de importância para o processo de transição energética, sofisticação tecnológica e para a segurança nacional, na atualidade.

Inicialmente, conceituamos TR e relatamos seus campos de aplicação e a sua localização no Brasil. Realizamos um “paralelo” com as indústrias de aço e de silício, sublimando que, assim como estas duas indústrias, as TR vêm sendo utilizadas em diversos setores na atualidade. Através da sua “taxonomia”, observamos que as TR possuem inúmeras aplicações industriais e no dia a dia, daí serem classificadas como “minerais estratégicos”. Desde 2010, registros de TR no Brasil estão sendo relatados. Mais recentemente, em 2023, depósitos de argilas iônicas de TR nos estados de Goiás e Minas Gerais foram identificados,



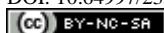
revelando o Brasil como um dos principais detentores de TR nessas condições geológicas fora da China — atual líder mundial neste mercado.

Posteriormente, ponderamos, dentro do arcabouço (neo)schumpeteriano, a relação da Taxonomia Setorial de Pavitt com a Taxonomia das TR. Observamos, dentro da taxonomia setorial pavittiana, que a utilização das TR pode atuar como um mecanismo de adensamento produtivo na indústria brasileira, daí a clara necessidade de se desenvolver a Cadeia Produtiva de TR no Brasil. Entende-se que a tipologia de Pavitt (1984, 1989) é “setorial”, diferindo do conceito de “cadeia de valor” — objeto de análise deste trabalho. Nesse sentido, um futuro esforço será aplicar tal tipologia às cadeias de valor, identificando, preliminarmente, a intensidade tecnológica de cada uma das etapas e, posteriormente, classificá-las separadamente, discutindo as potencialidades de cada um dos seus “elos”.

Por fim, descrevemos a Cadeia Produtiva de TR e o seu factível desenvolvimento no Brasil. Em linhas gerais, concluiu-se que, apesar das vantagens e potencialidades do Brasil enquanto detentor desse recurso natural, ele possui desafios a serem superados para o desenvolvimento pleno (verticalização) da cadeia produtiva de TR a nível nacional no longo prazo, sendo, o maior deles, a produção e separação dos óxidos individualizados de TR na etapa *upstream* da cadeia.

Assim, a literatura sugere priorizar, num primeiro momento, a etapa *upstream* da Cadeia Produtiva de TR no Brasil. Desenvolvida plenamente esta etapa, naturalmente fomentar-se-á a etapa *downstream* da cadeia produtiva de TR com sua posterior utilização nas cadeias de bens finais. Para que isso ocorra, é de suma importância a participação do governo nas três esferas — municipal, estadual e federal —, laboratórios, universidades e centros de P&D, atuando para a verticalização da cadeia.

Uma vez consolidada e verticalizada, vislumbra-se considerar no longo prazo, a Cadeia Produtiva de TR no Brasil como uma “janela de oportunidade de inserção internacional”, capaz de tornar o país um importante *player global* na oferta de óxidos, ligas, ímãs permanentes e afins de TR “pioneiro” ou (um dos) único(s) na América Latina nessa direção — pretensão futura deste trabalho. Ademais — e não menos importante —, o desenvolvimento dessa cadeia necessita ser pensado, articulado e executado desde o seu início, dentro de uma legislação ambiental que não ignore (puna) a questão da mineração predatória em unidades de conservação — unidades de proteção ambiental —, assentamentos rurais, comunidades costeiras e ribeirinhas, territórios quilombolas e em terras indígenas — outra questão a ser considerada e abordada em um futuro trabalho.



Por fim, a Cadeia Produtiva de TR no Brasil — verticalizada e consolidada — deve ser entendida no âmbito de um “Projeto Nacional de Longo Prazo para a Nova Indústria Brasileira”. Nessa direção, é indispensável pensar o seu desenvolvimento sob a gerência do Estado Brasileiro, este: a) custeando (majoritariamente) a extração, processamento e refino sustentáveis desse recurso natural ao longo da cadeia, bem como o processo de reciclagem de TR integrado ao final do “ciclo de vida do produto”; b) realizando parcerias internacionais de transferências de tecnologias de TR, especialmente com a China — até o momento, único país no mundo que domina todas as etapas da cadeia —; e c) projetando — na criação de uma Empresa Estatal de TR — o que a Petrobras representa para o Brasil. Isso configura(ria), sobretudo hoje, uma questão de “*Soberania Nacional*” sobre os nossos recursos naturais.

AGRADECIMENTOS: O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.



REFERÊNCIAS

AWA COMERCIAL. A história do uso do aço na construção civil. **AWA Comercial**, [2025]. Disponível em: <https://site.awacomercial.com.br/a-historia-do-uso-do-acao-na-construcao-civil/>. Acesso em: 10 set. 2025.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Ciência, Tecnologia e Inovação**: uso e aplicações de terras raras no Brasil: 2012–2030. Brasília, DF: CGEE, 2013. Disponível em: <https://sict.rs.gov.br/upload/arquivos/202006/16181948-uso-e-aplicacoes-de-terrars-raras-no-brasil-2012-2030.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2025.

DOSI, G. The nature of the innovative process. In: DOSI, G.; FREEMAN, C.; SILVERBERG, G.; SOETE, L. (ed.). **Technical change and economic theory**. London: F. Pinter, 1988. p. 221-238. Disponível em: https://www.lem.sssup.it/WPLem/files/dosietal_1988_IV.pdf. Acesso em: 16 jan. 2024.

FREEMAN, C.; PÉREZ, C. Structural crisis of adjustment, business cycles and investment behaviour. In: DOSI, G.; FREEMAN, C.; SILVERBERG, G.; SOETE, L. (ed.). **Technical change and economic theory**. London: F. Pinter, 1988. p. 38-66. Disponível em: https://www.lem.sssup.it/WPLem/files/dosietal_1988_II.pdf. Acesso em: 17 fev. 2025.

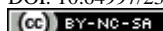
HAMBERGER, P. A. do V.; BOTELHO, M. do R. A. Padrões setoriais de inovação das pequenas e médias empresas industriais brasileiras: uma análise em nível da firma. In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA, 43., 2015, Florianópolis. **Anais** [...]. Niterói: ANPEC, 2015. p. 3. Disponível em: https://www.anpec.org.br/encontro/2015/submissao/files_I/i9-70d9029a9ecc7d95c5f8f58af42631d3.pdf. Acesso em: 25 jan. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (INCT). Linhas de pesquisa [2025]. Disponível em: <https://inct-terrars-raras.prp.usp.br/linhas-de-pesquisa>. Acesso em: 23 ago. 2025.

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC). Periodic Table of the Elements. 2017. Disponível em: <https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/>. Acesso em: 7 set. 2025.

KLINGER, J. M. **Rare earth frontiers**: from terrestrial subsoils to lunar landscapes. Ithaca, NY: Cornell University Press, 2018. Disponível em: <https://library.oapen.org/viewer/web/viewer.html?file=/bitstream/handle/20.500.12657/30764/642738.pdf>. Acesso em: 8 fev. 2025.

LANDGRAF, F. Em 2024, Brasil vai começar a produção de ímãs de terras raras em Minas Gerais. [Entrevista cedida a] João Sorima Neto. **O Globo Negócios**, 2023. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/negocios/noticia/2023/12/22/em-2024-brasil-vai-comecar-a-producao-de-imas-de-terrars-raras-em-minas-gerais.ghtml>. Acesso em: 23 dez. 2024.



LANDGRAF, F. **Super ímãs de terras-raras e a Quarta Revolução Industrial.** 2017. Palestra ministrada no evento Campus Party.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. **Terras-raras no Brasil:** depósitos, recursos identificados, reservas. Rio de Janeiro: CETEM, 1994. (Série Estudos e Documentos, 21). Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/287/1/sed-21.pdf>. Acesso em: 16 set. 2025.

LIMA, P. C. R. Terras-raras: a importância de um plano estratégico. **Cadernos ASLEGIS**, n. 42, p. 11–36, 2011. Disponível em:
https://bd.camara.leg.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/11394/terrars_raras_lima.pdf. Acesso em: 16 jan. 2025.

MARTINS, T. S.; ISOLANI, P. C. Terras raras: aplicações industriais e biológicas. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 111-117, 2005. Disponível em:
https://quimicanova.sq.org.br/pdf/Vol28No1_111_19-DV04036. Acesso em: 15 jan. 2025.

MBAC FERTILIZANTES. **Terras Raras:** da mina ao mercado. Brasília, DF: CETEM, 2013. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/palestras/2013/iisbtr/13-antenor-silva.pdf>. Acesso em: 16 set. 2025.

MELO, F. R. A geopolítica das terras raras. **Revista Carta Internacional**, v. 12, n. 2, p. 219-243, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.21530/ci.v12n2.2017.634>. Acesso em: 15 jan. 2025.

NELSON, R. R.; WINTER, S. G. **An evolutionary theory of economic change.** Cambridge: Harvard University Press, 1982. Disponível em:
https://inctxped.ie.ufrj.br/spiderweb/pdf_2/Dosi_1_An_evolutionary-theory-of-economic_change..pdf. Acesso em: 15 jan. 2025.

PAVITT, K. What do we know about the usefulness of science: the case of diversity. **SPRU Discussion Paper**, n. 65, 1989.

PAVITT, K. Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and theory. **Research Policy**, v. 13, n. 6, p. 343-373, 1984. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(84\)90018-0](https://doi.org/10.1016/0048-7333(84)90018-0). Acesso em: 16 jan. 2025.

PRATA, A. T. **Cadeias produtivas para terras raras:** subcomissão temporária de elaboração do marco regulatório da mineração em terras raras no Brasil. Brasília, DF: MCTI, 2013. Disponível em:
https://www.senado.leg.br/comissoes/CCT/AP/AP20130514_AlvaroPrata.pdf. Acesso em: 12 set. 2025.

SACCHELLI: qualidade de aço. Tecnologias aplicadas na fabricação do aço. **Blog Sacchelli**, [2025]. Disponível em: <https://sacchelli.com.br/tecnologias-aplicadas-na-fabricacao-do-aco/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SALOMÃO, E. P. Novas perspectivas para o Brasil no mercado de terras raras. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE TERRAS-RARAS, 6., 2023, Rio de Janeiro. **Anais** [...]. Rio de Janeiro: CETEM, 2023. Slides. Disponível em: <https://www.gov.br/cetem/pt->



br/assuntos/VI-Seminario-Brasileiro-de-Terras-Raras/NOVASPECTIVASPARAOBRASILNOMERCADODETERRASRARASFINA L.pdf. Acesso em: 21 dez. 2023.

SAVIOTTI, P. P.; METCALFE, J. S. A theoretical approach to the construction of technological output indicators. **Research Policy**, v. 13, n. 3, p. 141-151, 1984. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(84\)90022-2](https://doi.org/10.1016/0048-7333(84)90022-2). Acesso em: 15 jan. 2025.

SCHUMPETER, J. A. **Capitalismo, socialismo e democracia**. Rio de Janeiro: Zahar, 1984.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. Projeto de industrialização de terras raras é aprovado no Programa Mover. **FIEMG**, 2025. Disponível em: <https://www.fiemg.com.br/senai/noticias/projeto-de-industrializacao-de-terrars-raras-e-aprovado-no-programa-mover/>. Acesso em: 26 fev. 2025.

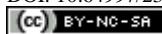
SOUSA FILHO, P. C.; SERRA, O. A. Terras raras no Brasil: histórico, produção e perspectivas. **Química Nova**, v. 37, n. 4, p. 753, 2014. DOI: 10.5935/0100-4042.20140121. Acesso em: 20 ago. 2025.

SOUZA, A. C. S. P.; NASCIMENTO, M.; GIESE, E. C. Desafios para a extração sustentável de minérios portadores de terras raras. **HOLOS**, v. 35, n. 1, p. 4-19, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2019.8274>. Acesso em: 25 jan. 2025.

TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, K. **Managing innovation**: integrating technological, market, and organizational change. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2001.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Mineral Commodity Summaries 2025**. [S. l.]: USJ, 2025. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-rare-earths.pdf>. Acesso em: 18 set. 2025.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). Instituto de Matemática e Estatística. Transistores e circuitos integrados. [2025]. Disponível em: https://www.ime.usp.br/~macmulti/historico/histcomp1_11.html. Acesso em: 11 fev. 2025.



ANEXOS

ANEXO A

Tabela 1 – Distribuição de insumos de conhecimento em inovações significativas, segundo fonte institucional

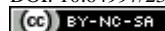
Table 1

Distribution of knowledge inputs into significant innovations, according to institutional source

Sector ^a	Source of knowledge inputs (%) ^b			Number of observations
	Intra-firm	Other firm	Public Infrastructure	
Food (211-229)	53.4	44.6	2.0	101
Pharmaceuticals (272)	62.8	37.2	0	129
Soap and detergents (275)	60.0	40.0	0	30
Plastics (276)	40.4	55.2	4.4	114
Dyestuffs (277)	68.1	30.5	1.4	69
Iron and steel (311)	47.7	44.9	7.4	149
Aluminium (321)	68.0	28.0	4.0	50
Machine tools (332)	64.1	29.8	6.1	231
Textile machinery (335)	61.2	36.6	2.2	278
Coal-mining machinery (329.1)	52.3	31.6	16.1	199
Other machinery (339.4 + 339.9)	59.1	36.6	4.3	115
Industrial plant (341)	51.6	41.9	6.5	31
Instruments (354.2)	61.6	25.2	13.2	440
Electronic components (364)	48.2	37.1	14.7	170
Broadcasting equipment (365)	64.4	33.9	1.7	59
Electronic computers (366)	50.6	33.3	16.1	81
Electronic capital goods (367)	67.2	9.7	23.0	113
Other electrical goods (369)	60.8	35.3	3.9	51
Shipbuilding (370)	47.9	43.8	8.2	73
Tractors (380)	78.7	21.3	0	47
Motor vehicles (381)	69.3	29.7	1.0	101
Textiles (411-429)	67.3	32.7	0	110
Leather goods and footwear (431/450)	44.4	48.1	7.4	54
Glass (463)	48.2	44.6	7.1	56
Cement (464)	62.5	33.3	4.2	24
Paper and board (481)	66.7	28.2	5.1	39
Other plastics (496)	55.8	41.9	2.3	43
Other	-	-	-	56
Total	58.6	34.0	7.4	3013

^a Numbers in brackets refer to the appropriate Minimum List Heading.^b Each row adds up to 100 percent.

Fonte: Pavitt (1984, p. 347).



ANEXO B

Figura 1 – Principais ligações tecnológicas entre diferentes categorias de empresas

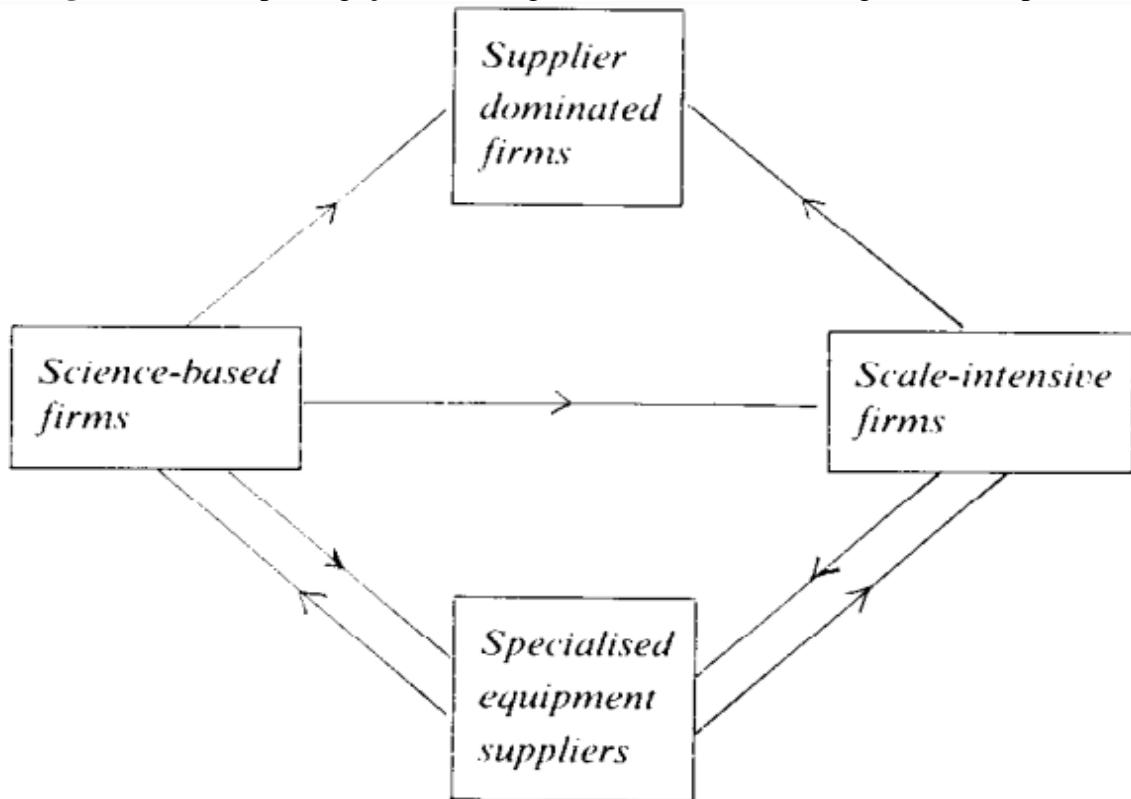


Fig. 1. The main technological linkages amongst different categories of firm.

Fonte: Pavitt (1984, p. 364).

CRediT Author Statement

- Reconhecimentos:** Ryan de Albuquerque da Silva (único autor deste trabalho).
- Financiamento:** Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.
- Conflitos de interesse:** Não há.
- Aprovação ética:** Aprovado.
- Disponibilidade de dados e material:** Não há dados. Aprovo a disponibilização deste trabalho e material.

