

UFRRJ

INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA REGIONAL
E DESENVOLVIMENTO**

DISSERTAÇÃO

**Terras Raras (TR): Um Elemento-chave para a Promoção da Quarta
Revolução Industrial no Brasil?**

Ryan de Albuquerque da Silva

2021



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA REGIONAL E
DESENVOLVIMENTO**

**TERRAS RARAS (TR): UM ELEMENTO-CHAVE PARA A PROMOÇÃO DA
QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL NO BRASIL?**

RYAN DE ALBUQUERQUE DA SILVA

Sob a Orientação do Professor
Marcelo Pereira Fernandes

e Coorientação da Professora
Débora Mesquita Pimentel

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Economia Regional e Desenvolvimento**, no Curso de Pós-Graduação em Economia Regional e Desenvolvimento, Área de Concentração em Economia Regional e Desenvolvimento

Seropédica, RJ
Abril de 2021

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586t Silva, Ryan de Albuquerque da, 1995-
Terras Raras (TR): um elemento-chave para a
promoção da Quarta Revolução Industrial no Brasil? /
Ryan de Albuquerque da Silva. - Seropédica/RJ, 2021.
109 f.: il.

Orientador: Marcelo Pereira Fernandes.
Coorientadora: Débora Mesquita Pimentel.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, PPGER/UFRRJ - Programa de Pós
Graduação em Economia Regional e Desenvolvimento, 2021.

1. Terras Raras (TR). 2. Indústria 4.0. 3. Brasil.
4. China. 5. Econometria. I. Fernandes, Marcelo
Pereira, 1973-, orient. II. Pimentel, Débora
Mesquita, -, coorient. III Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro. PPGER/UFRRJ - Programa de Pós
Graduação em Economia Regional e Desenvolvimento. IV.
Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS (ICSA)
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA REGIONAL E
DESENVOLVIMENTO.**

RYAN DE ALBUQUERQUE DA SILVA

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Economia Regional e Desenvolvimento**, no Curso de Pós-Graduação em Economia Regional e Desenvolvimento, área de Concentração em economia.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 05 / 04 / 2021

Conforme deliberação número 001/2020 da PROPPG, de 30/06/2020, tendo em vista a implementação de trabalho remoto e durante a vigência do período de suspensão das atividades acadêmicas presenciais, em virtude das medidas adotadas para reduzir a propagação da pandemia de Covid-19, nas versões finais das teses e dissertações as assinaturas originais dos membros da banca examinadora poderão ser substituídas por documento(s) com assinaturas eletrônicas. Estas devem ser feitas na própria folha de assinaturas, através do SIPAC, ou do Sistema Eletrônico de Informações (SEI) e neste caso a folha com a assinatura deve constar como anexo ao final da tese / dissertação.

Marcelo Pereira Fernandes. Doutor em Economia (UFRRJ)
(Presidente da Banca/Orientador)

Débora Mesquita Pimentel. Doutora em Economia da Indústria e da Tecnologia (UFRRJ)
(Membro Interno/Coorientadora)

Alexandre Jeronimo de Freitas. Doutor em Economia da Indústria e da Tecnologia
(UFRRJ) (Membro Interno)

Elias Marco Khalil Jabbour. Doutor em Geografia Humana (UERJ)
(Membro Externo)

Esther Majerowicz Gouveia. Doutora em Economia Política Internacional (UFRN)
(Membro Externo)



Emitido em 05/04/2021

TERMO N° Folha de aprovação/2021 - PPGER (11.39.00.14)
(N° do Documento: 1015)

(N° do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 27/09/2021 11:49)

ALEXANDRE JERONIMO DE FREITAS

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DeptCEcon (12.28.01.00.00.00.00.09)

Matricula: 2692876

(Assinado digitalmente em 22/09/2021 16:28)

DEBORA MESQUITA PIMENTEL

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DeptCEcon (12.28.01.00.00.00.00.09)

Matricula: 2829205

(Assinado digitalmente em 22/09/2021 12:36)

MARCELO PEREIRA FERNANDES

PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR

DeptCEcon (12.28.01.00.00.00.00.09)

Matricula: 1804225

(Assinado digitalmente em 22/09/2021 13:46)

ELIAS MARCO KHALIL JABBOUR

ASSINANTE EXTERNO

CPF: 274.293.968-79

(Assinado digitalmente em 22/09/2021 19:50)

RYAN DE ALBUQUERQUE DA SILVA

DISCENTE

Matricula: 20191006178

(Assinado digitalmente em 23/09/2021 10:11)

ESTHER MAJEROWICZ GOUVEIA

ASSINANTE EXTERNO

CPF: 112.602.397-30

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrj.br/documentos/> informando seu número:

1015, ano: **2021**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **22/09/2021** e o código de verificação: **0d3a800d0e**

Apoios

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

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

Portaria nº 206, de 4 de setembro de 2018.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - RJ/Brasil (FAPERJ) - Código de Financiamento E-26

This study was financed in part by the Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - RJ/Brasil (FAPERJ) - Finance Code E-26



Dedicatória

Dedico este trabalho à minha mãe,
pai (in memoriam) e irmã: uma
aliança eterna.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo que Ele é em minha vida. Ele é o motivo de tornar tudo isso realidade. A Ele toda a Honra.

Aos meus pais e irmã agradeço pelo imensurável amor, por todo apoio e dedicação que me ofereceram nessa caminhada: à minha mãe e ao meu saudoso pai, pelo amor e por me proporcionarem as oportunidades que eles não tiveram. À minha irmã, pelo carinho e preocupação, por estar sorrindo juntamente comigo neste momento tão especial.

Também estendo meus agradecimentos à FAPERJ (agência de fomento às pesquisas de graduação e pós-graduação no Estado do Rio de Janeiro), pois se não fosse o seu apoio, muito dificilmente percorreria esta trajetória de maneira tão qualificada.

Agradeço a todo o corpo docente que tive o privilégio de conhecer ao longo dessa jornada. Muito obrigado, pois me ofereceram os degraus necessários para que eu construísse o conhecimento que hoje possuo. Muito obrigado a todos, sem exceção.

Gratifico, em especial, aos examinadores deste trabalho, pois marcaram a minha trajetória acadêmica de uma maneira que jamais esquecerei.

Ademais, um agradecimento ao meu orientador e à minha coorientadora. Esta singular parceria resulta nesse trabalho tão especial.

Por fim, faço uma menção particular ao meu orientador. Agradeço por toda a sua dedicação, apoio e empenho para a confecção e conclusão desse trabalho. O que dizer... muito obrigado, Mestre. Seus direcionamentos em muito contribuíram para minha formação profissional e pessoal. Levarei por toda a minha vida seus valiosos ensinamentos, sendo eternamente grato.

“A produção mundial das terras raras leves é dominada pela bastnaesita de Mountain Pass, na Califórnia e a de Baotou, na Mongólia, como subproduto da mineração do ferro. O ítrio e terras raras pesadas são, predominantemente, originárias de depósitos secundários de xenotima, aluviões, da Malásia e Tailândia, ou como subproduto da mineração de urânio, como o foi de Elliot Lake, no Canadá, e das “argilas iônicas” do sul da China. E o Brasil, quais são as suas perspectivas? É este o questionamento dessa dissertação, a qual será de agrado do leitor interessado no assunto”.

Roberto C. Villas Bôas, 1997 (adaptada).

RESUMO

SILVA, Ryan de Albuquerque da. **Terras Raras (TR): um elemento-chave para a promoção da Quarta Revolução Industrial no Brasil?** 2021. 108p Dissertação (Mestrado em Economia Regional e Desenvolvimento, Desenvolvimento Econômico). Instituto de Ciências Sociais Aplicadas, Departamento de Economia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

Essa dissertação visa realizar um estudo acerca dos Elementos de Terras Raras (ETR), ou simplesmente Terras Raras (TR), como um possível elemento-chave para a promoção e consolidação da chamada Quarta Revolução Industrial (ou INDÚSTRIA 4.0) no Brasil. Neste sentido, essa dissertação inicia-se com uma INTRODUÇÃO, acerca do tema. O CAPÍTULO 1 trata do conceito de TR, suas características, importância (especialmente para a China) e demais particularidades. O CAPÍTULO 2 aborda a ocorrência das TR no Brasil. O CAPÍTULO 3 revisita as fases da Revolução Industrial, bem como introduz o conceito de Indústria 4.0. O CAPÍTULO 4 sugere uma modelagem econométrica, de modo a verificar se há, de fato, uma relação entre a extração dos ETR e o desenvolvimento da Indústria 4.0, no Brasil. Por fim, a última seção corrobora com as CONSIDERAÇÕES FINAIS a respeito do tema.

Palavras-chave: Terras Raras (TR). Indústria 4.0. Brasil. China. Econometria.

ABSTRACT

SILVA, Ryan de Albuquerque da. **Rare Earths (TR): a key element for the promotion of the Fourth Industrial Revolution in Brazil?** 2021. 108p Dissertation (Master's degree in Regional Economics and Development, Economic Development). Institute of Applied Social Sciences, Department of Economics, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

This dissertation aims to conduct a study on rare earth elements (ETR), or simply Rare Earths (TR), as a possible key element for the promotion and consolidation of the so-called Fourth Industrial Revolution (or INDUSTRY 4.0) in Brazil. In this sense, this dissertation begins with an INTRODUCTION, on the theme. CHAPTER 1 deals with the concept of TR, its characteristics, importance (especially for China) and other particularities. CHAPTER 2 addresses the occurrence of RT in Brazil. CHAPTER 3 revisits the phases of the Industrial Revolution and introduces the concept of Industry 4.0. CHAPTER 4 suggests an econometric modeling, in order to verify whether there is, in fact, a relationship between the extraction of RTE and the development of Industry 4.0 in Brazil. Finally, the last section corroborates the FINAL CONSIDERATIONS on the subject.

Keywords: Rare Earths (TR). Industry 4.0. Brazil. China. Econometrics.

LISTA DE TABELAS, GRÁFICOS, QUADROS E FIGURAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS ETR	24
Tabela 2 - Principais aplicações das TR	39
Tabela 3 - Percentuais de utilização sobre as principais aplicações das TR	39
Tabela 4 - Reservas e Produção Mundiais dos ETR em 2019	45
Tabela 5 - Simbologia e fonte das variáveis	85
GRÁFICOS 1 E 2 - PRODUÇÃO E RECURSOS MUNDIAIS DOS ETR EM 2016, RESPECTIVAMENTE	37
Gráfico 3 - Percentual de produção de TR no mundo, em 2017	44
Gráfico 4 - Reservas e Produção Mundiais dos ETR em 2019 (países declarantes)	46
Gráfico 5 - Produção de monazita no Brasil, Estados Unidos e Índia (entre 1887 a 1949)	48
QUADRO 1 - DISTRIBUIÇÃO DOS ETR POR MINERAIS	26
Quadro 2 - Aplicações atuais dos ETR	40
Quadro 3 - Aplicações atuais oriundas dos Compostos de TR	41
Quadro 4 - Os seis direcionadores estratégicos adotados no Mercado Brasileiro de TR	50
Quadro 5 - Diretrizes adotadas para PD&I na cadeia produtiva de TR no Brasil	53
Quadro 6 - Principais objetivos na implantação da cadeia produtiva de lítio no Brasil	54
Quadro 7 - Diretrizes adotadas pelo PNM 2030 para o Mercado Brasileiro de TR	56
Quadro 8 - Diretrizes da Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012-2015 envolvendo o Mercado Brasileiro de TR	57
Quadro 9 - Desafios Tecnológicos e Iniciativas para as TR no Brasil (2018-2022)	58
Quadro 10 - As etapas da Revolução Industrial no tempo	64
Quadro 11 - Definições de Big Data	69
Quadro 12 - Os 5 V's do Big Data	70
Quadro 13 - As definições de Indústria 4.0 pelo Mundo	77
Quadro 14 - As principais estratégias adotadas para o fomento da Indústria 4.0. pelo Mundo	78
Quadro 15 - Agenda Brasileira para a Indústria 4.0	81

FIGURA 1 - OS ETR DESTACADOS NA TABELA PERIÓDICA	23
Figura 2 - Gadolinita (Ytterbita), o primeiro ETR descoberto na natureza	25
Figura 3 - Esquemática do processo empregado por Johan Gadolin para a separação dos	29
Figura 4 - Cronologia da separação das terras (a) céricas e (b) ítricas por seus respectivos descobridores, a partir das misturas consideradas como elementos puros*	31
Figura 5 - Cronologia horizontal do descobrimento das TR: (a) das terras ítricas a partir da itterbita (gadolinita) e (b) das terras céricas a partir da cerita	32
Figura 6 - Configuração atual dos ETR na Tabela Periódica	34
Figura 7 - Previsão de demandas para ímãs de TR (demanda mundial - “previsão conservadora”)	51
Figura 8 - Cadeia produtiva de ímãs de TR no Brasil e suas respectivas competências	52
Figura 9 - Diretrizes adotadas para a cadeia produtiva de lítio no Brasil	54
Figura 10 - Contexto de evolução das revoluções industriais	65
Figura 11 - Panorama temporal estimado das mudanças a serem realizadas pela indústria 4.0	66
Figura 12 - As nove tecnologias habilitadoras presentes na Indústria 4.0	68
Figura 13 - Os elementos da Computação em Nuvem	71
Figura 14 - Sistematização clássica do conceito de Inteligência Artificial	72
Figura 15 - Representação das principais etapas de um processo de manufatura	76
Figura 16 - Modelo de Mínimos Quadrados Ordinais com Efeitos Aleatórios (resultados)	87

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial;
AII	Artificial Intelligence Index (Índice de Inteligência Artificial);
CBERS	China-Brazil Earth-Resources Satellite (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres);
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração;
CCT	Comissão de Ciência, Tecnologia, Inovação, Comunicação e Informática;
CCTSTTR	Subcomissão Temporária de Elaboração do Projeto de Lei do Marco Regulatório da Mineração e da Exploração de Terras Raras no Brasil;
Ce	Cério;
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral;
CEDE	Centro de Estudos e Debates Estratégicos;
CERTI	Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras;
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos;
CGV	Cadeias Globais de Valor;
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto;
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear;
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais;
CPS	Cyber-Physical Systems (Sistemas Cibernético-Físicos);
CRQ-IV	Conselho Regional de Química da Quarta (IV) Região;
CS	Cadeia de Suprimentos;
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral;
Dy	Disprósio;
Er	Érbio;
ETR	Elementos de Terras Raras;
ETRL	Elementos de Terras Raras Leves;
ETRP	Elementos de Terras Raras Pesados;
Eu	Eu - Európio;
FhG-IFAM	Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung;
FINCEN	Financial Crimes Enforcement Network;
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro;
Gd	Gadolínio;
GII	Global Innovation Index (Índice Global de Inovação);
GTI-ME	Grupo de Trabalho Interministerial sobre Minerais Estratégicos;
HAI	Human-Centered Artificial Intelligence;
Ho	Hólmio;
IA	Inteligência Artificial;
IBM	International Business Machines;
ICT	Instituto de Cultura Técnica;

IFR	International Federation of Robotics (Federação Internacional de Robótica);
IMD	International Institute for Management Development Business School (Instituto Internacional para Desenvolvimento de Gestão);
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial;
INSEAD	Institut Européen d'Administration des Affaires (Instituto Europeu de Administração de Empresas);
IoT	Internet of Things (“Internet das Coisas”);
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada;
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas;
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry (União Internacional de Química Pura e Aplicada);
La	Lantânio;
Lu	Lutécio;
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação;
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações;
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio Exterior e Serviços;
MME	Ministério de Minas e Energia;
MPES; MPE’s	Micro e Pequenas Empresas;
Nb	Nióbio;
NCE	Núcleo de Computação Eletrônica;
Nd	Neodímio;
NIST	National Institute of Standards and Technology;
OTR	Óxidos de Terras Raras;
PD&I	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação;
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento;
PGM	Primeira Guerra Mundial;
PIB	Produto Interno Bruto;
Pm	Promécio;
PNM	Plano Nacional de Mineração;
PPM	Partes por Milhão;
Pr	Praseodímio;
RMN	Ressonância Magnética Nuclear;
RV	Realidade Virtual;
Sc	Escândio;
SGDC	Satélite de Geoestacionário de Comunicações;
SGM	Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral;
SGM’	Segunda Guerra Mundial;
Sm	Samário;
Tb	Térbio;
Th	Tório;
Tm	Túlio;

TR	Terras Raras;
U	Urânio;
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro;
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina;
USGS	United States Geological Survey (Serviço Geológico dos Estados Unidos);
WCY	World Competitiveness Yearbook (Índice de Competitividade Mundial);
WIPO	World Intellectual Property Organization (Organização Mundial da Propriedade Intelectual);
Y	Ítrio;
Yb	Itérbio;
Z	Número Atômico.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO

INTRODUÇÃO	20
CAPÍTULO 1. TERRAS RARAS (TR): O QUE SÃO?	22
1.1. História e propriedades gerais	27
1.2. Localização e produção mundial	36
1.3. Aplicações	38
1.4. Produção e aplicação das TR no mundo: uma relação controversa	42
CAPÍTULO 2. O BRASIL E AS TERRAS RARAS	45
2.1. A concentração e o mercado das TR no Brasil	46
2.2. Os direcionadores estratégicos desenvolvidos para o Mercado de TR no Brasil	49
2.2.1. Grupo de Trabalho Interministerial sobre Minerais Estratégicos (GTI-ME)	50
2.2.2. Estudo para implantação de uma cadeia produtiva de ímãs de TR no Brasil	51
2.2.3. Apoio à PD&I para cadeia produtiva de TRs e lítio (encerrado)	53
2.2.4. Plano Nacional de Mineração (PNM, 2030)	55
2.2.5. Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (2012-2015)	56
2.2.6. Novo Marco Regulatório da Mineração (2012)	57
2.2.7. Um adendo: os desafios tecnológicos para Terras Raras (2018-2022)	57
CAPÍTULO 3. A INDÚSTRIA 4.0	59
3.1. Mas afinal, o que é a Indústria 4.0?	64
3.2. As fases da Revolução Industrial	64
3.3. As tecnologias habilitadoras presentes na Indústria 4.0	67
3.3.1. Big Data	68
3.3.2. Computação em Nuvem (<i>Cloud Computing</i>)	71
3.3.3. Integração de sistemas vertical e horizontal	72
3.3.4. Inteligência Artificial (IA)	72
3.3.5. Internet Industrial das Coisas (IoT)	73
3.3.6. Realidade Virtual (RV)	73
3.3.7. Robôs autônomos	74
3.3.8. Segurança cibernética (cibersegurança)	75
3.3.9. Simulação e impressão 3D (manufatura aditiva)	75
3.4. A Indústria 4.0 no Mundo	77
3.5. A Indústria 4.0 no Brasil	80
CAPÍTULO 4. TERRAS RARAS E INDÚSTRIA 4.0 NO BRASIL: HÁ RELAÇÃO?	84
4.1. Fonte e estrutura dos dados	84

4.2. Metodologia e Modelo	86
4.3. Resultados	87
CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
REFERÊNCIAS	92
ANEXOS	106
Anexo A - Modelo de Mínimos Quadrados Ordinais para Dados Empilhados - Pooled (resultados)	106
Anexo B - Modelo de Mínimos Quadrados Ordinais com Efeitos Fixos (resultados)	107
Anexo C - Modelo de Mínimos Quadrados Ordinais com Efeitos Aleatórios (resultados)	108
Anexo D - Teste de Hausman (resultados)	109

INTRODUÇÃO

A discussão sobre os processos de crescimento e desenvolvimento econômico das nações sempre foi um tema recorrente no ambiente das Ciências Econômicas, em especial na esfera do capitalismo, ao longo da história. Tal discussão sempre objetivou atribuir uma relação de coexistência, dependência, e porque não dizer uma certa “primazia” de um, em relação ao outro.

Mais precisamente, o dinamismo de tais processos pode ser visto em economias que hoje, possuem relevância no contexto internacional, a exemplo: Estados Unidos e China. Curiosamente, ambas possuem processos de crescimento e desenvolvimento completamente distintos. Que os EUA construíram uma trajetória de ascensão econômica no tempo (em especial, a partir da Primeira Guerra Mundial), já é de conhecimento dos estudiosos. Seu papel no cenário econômico mundial no último século demonstra o quão sofisticado estágio o sistema capitalista atingiu.

Entretanto, este estágio é observado de maneira peculiar na China: um crescimento resultante de um desenvolvimento econômico atrelado, especialmente, à uma *política nacional de inovação* (FREITAS, 2011). Tal postura foi adotada mais intensamente a partir de 1978, quando a China iniciou sua reforma econômica (FREITAS, 2011: 1). Nesta perspectiva, o país reduziu rapidamente sua distância em relação aos países de economia desenvolvida, representando em 2010, a segunda maior economia global em termos de Produto Interno Bruto (PIB) em dólar corrente, atrás apenas, dos Estados Unidos (FREITAS, 2011: 1). Cabe ressaltar que desde 2001, a China já vinha se destacando no cenário econômico, ocupando o segundo lugar no ranking mundial em termos de PIB em paridade do poder de compra, novamente atrás somente dos Estados Unidos.

Em suma, a política nacional de inovação chinesa vinculada especialmente à indústria, encontra-se nos últimos anos atrelada a um elemento-chave para o alcance de seu desenvolvimento econômico que se mostra altamente industrial, tecnológico e sustentável, nos últimos anos: a extração e/ou produção dos chamados *Elementos de Terras Raras (ETR)*, ou simplesmente *Terras Raras (TR)*. A produção deste recurso natural tanto em território chinês quanto fora dele (por meio de direitos de extração destes elementos em outros países, conquistados pela China) indica estar propiciando à economia asiática um ambiente favorável e efetivo do que a literatura econômica denomina de *Quarta Revolução Industrial*, ou *Indústria 4.0*.

Mas, e o Brasil? Possui tal recurso? Se possui, como o explora? Neste pensamento, esta dissertação: i) parte do princípio de que o mundo já se encontra imerso na Quarta Revolução

Industrial, mediante à difusão de suas “tecnologias habilitadoras” (temática a ser posteriormente abordada), e ii) encontra-se dividida em 4 capítulos, a saber:

O primeiro capítulo trata do conceito de TR. Relata sua história, propriedades gerais, localização, produção mundial e suas aplicações no dia a dia, como na indústria. Esta abordagem ocorrerá mediante à revisão bibliográfica de autores seminais a respeito do tema, bem como da utilização de trabalhos de centros químico-mineralógicos e afins, que pesquisam sobre o assunto.

O segundo capítulo aborda a ocorrência das TR no Brasil, as políticas de extração por trás delas, entre outras particularidades. Semelhante ao capítulo anterior, serão utilizadas fontes especializadas sobre o tema. Ademais: relatórios, planos, decretos, sanções e afins publicados e/ou lançados pelo Governo Federal serão verificados, especialmente a Minuta de 2018 do MCTIC, que aborda os “Desafios Tecnológicos e Iniciativas para as TR no Brasil (2018-2022)”.

O terceiro capítulo introduz o conceito de INDÚSTRIA 4.0 e as condições que favorecem a promoção deste tipo de indústria, além de resgatar, concisamente: a) a dinâmica desenvolvimentista intrínseca ao processo de industrialização, revisitando assim, os pioneiros no estudo sobre o desenvolvimentismo de uma nação, como: Alice Amsden, Chalmers Johnson, Ha-Joon Chang, Peter Evans, Ricardo Bielschowsky, Robert Wade, entre outros; b) as abordagens contemporâneas sobre a questão dos recursos naturais como fonte propulsora do desenvolvimento e da industrialização, observadas em: Medeiros e Trebat (2017), Reis (2016), Medeiros (2013) e afins, e c) as três fases antecessoras desse novo estágio da Revolução Industrial, através da análise de estudos/trabalhos de referência sobre esta temática, entre outros aspectos.

O quarto capítulo sugere uma abordagem inicial e em construção: uma especificação econométrica, de modo a verificar se há, de fato, uma relação entre a extração dos ETR e o desenvolvimento da Indústria 4.0. Uma vez comprovada e/ou havendo possibilidade, será então mensurado em que medida a extração dos ETR corrobora para o desenvolvimento da Indústria 4.0, e como esta relação apresenta-se no Brasil e em alguns países selecionados. Para tal mensuração, será utilizada um base de dados em painel, que contemplará o período de 1994 a 2020 (marco dos registros contínuos de TR no Brasil e no mundo pelo USGS). Essa mensuração ocorrerá mediante à regressão da base de dados selecionada no pacote econométrico STATA, versão STATA MP_13, através do modelo de MÍNIMOS QUADRADOS ORDINAIS COM EFEITOS ALEATÓRIOS.

Por fim, uma seção a parte corrobora com as considerações finais e das perspectivas futuras a respeito do tema tratado nesta Dissertação.

CAPÍTULO 1. TERRAS RARAS (TR): O QUE SÃO?

Nas definições de Lapido-Loureiro (1994: 189) e da IUPAC (2017), os Elementos de Terras Raras (doravante, ETR) ou simplesmente Terras Raras (doravante, 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). Semelhantemente, Viera e Lins (1997: 4) afirmam que “os ETR pertencem ao Grupo III-B da tabela periódica, envolvendo os elementos químicos de número atômico situado entre 57 e 71”. Incorporam-se a esta 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.

A descoberta dos ETR ocorreu no final do século XVIII, sendo assim denominados “TR” por seu aspecto terroso associado aos seus óxidos insolúveis e por equivocadamente acreditarem, na referida época, de se “tratarem de elementos escassos na natureza” (ANTONIASSI, 2017: 13). Tal argumento é reforçado por Lapido-Loureiro (1994) e Vlasov (1966), descrevendo-os como “elementos notadamente dispersos na natureza e raramente encontrados na forma de ricos depósitos de minerais portadores”, reconhecendo-se sua relativa abundância na natureza apenas com o aperfeiçoamento dos métodos de análises químicas, progresso no conhecimento de sua geoquímica e avanço na prospecção e pesquisa de seus minerais (ANTONIASSI, 2017: 13).

Baseada nos estudos de Abrão (1994), Antoniassi (2017) afirmou que na crosta terrestre, os elementos de TR totalizam cerca de 250 ppm (partes por milhão), possuindo maior abundância em comparação com os elementos considerados “comuns” na natureza: “O cério é o mais abundante dentre os ETR, com 67 ppm, e tão frequente quanto, por exemplo, o zinco (70 ppm) e o cobre (60 ppm), enquanto o mais raro, o túlio (0,5 ppm) ocorre em maior concentração que elementos como a prata e o mercúrio (< 0,5 ppm cada)” (ANTONIASSI, 2017: 13).

Ademais, Abrão (1994) aponta que os ETR de números atômicos pares são mais abundantes do que os de números atômicos ímpares, por possuírem maior estabilidade química:

Cério é o lantanídeo (Ln) mais abundante. Em geral, as propriedades nucleares fazem com que os elementos de número atômico (Z) par sejam mais abundantes que os de número atômico ímpar. Numa avaliação para a abundância média na crosta terrestre, o Y se aproxima do La. Contudo, não há depósitos minerais principais contendo teores elevados de Y compatíveis aos depósitos de minerais contendo as TR leves. Estas estão em maior disponibilidade do que as pesadas ou do que o Y. Neodímio é mais abundante do que seu vizinho, o Pr (número atômico, Z , 59) (ABRÃO, 1994: 2).

Antonassi (2017) descreve sinteticamente como estes elementos apresentam-se e subdividem-se para fins de estudos químicos e mineralógicos, relatando, na figura abaixo,

[...] a localização dos elementos de terras raras na Tabela Periódica: lantanídeos, escândio e ítrio. Os lantanídeos são ainda divididos entre leves (ETRL; ou “grupo do cério”) e pesados (ETRP; ou “grupo do ítrio”), de acordo com o valor de seu número atômico, sendo que números atômicos superiores aos do európio ($Z = 63$) são considerados pesados. O ítrio faz parte deste último grupo por apresentar propriedades químicas semelhantes, apesar de seu baixo peso atômico. O promécio (ETRL) não ocorre naturalmente na natureza, mas somente a partir do decaimento radioativo de elementos como neodímio e urânio (ANTONASSI, 2017: 13-14).

Figura 1 - Os ETR destacados na Tabela Periódica

IUPAC Periodic Table of the Elements

IUPAC Periodic Table of the Elements																																															
1 H hydrogen 1.00784(7)																	2 He helium 4.002602																														
3 Li lithium 6.94	4 Be beryllium 9.0122											5 B boron 10.81	6 C carbon 12.011	7 N nitrogen 14.007	8 O oxygen 15.999	9 F fluorine 18.998	10 Ne neon 20.180																														
11 Na sodium 22.990	12 Mg magnesium 24.304											13 Al aluminum 26.982	14 Si silicon 28.086	15 P phosphorus 30.974	16 S sulfur 32.06	17 Cl chlorine 35.45	18 Ar argon 39.948																														
19 K potassium 39.098	20 Ca calcium 40.078	21 Sc scandium 44.956	22 Ti titanium 47.867	23 V vanadium 50.942	24 Cr chromium 51.996	25 Mn manganese 54.938	26 Fe iron 55.845	27 Co cobalt 58.933	28 Ni nickel 58.693	29 Cu copper 63.546	30 Zn zinc 65.38	31 Ga gallium 69.723	32 Ge germanium 72.631	33 As arsenic 74.922	34 Se selenium 78.972	35 Br bromine 79.904	36 Kr krypton 83.798																														
37 Rb rubidium 85.468	38 Sr strontium 87.62	39 Y yttrium 88.906	40 Zr zirconium 91.224	41 Nb niobium 92.906	42 Mo molybdenum 95.94	43 Tc technetium 98.906	44 Ru ruthenium 101.07	45 Rh rhodium 101.07	46 Pd palladium 106.42	47 Ag silver 107.87	48 Cd cadmium 112.41	49 In indium 114.82	50 Sn tin 118.71	51 Sb antimony 121.76	52 Te tellurium 127.6	53 I iodine 126.905	54 Xe xenon 131.29																														
55 Cs caesium 132.91	56 Ba barium 137.33	57-71 lanthanoids	72 Hf hafnium 178.49	73 Ta tantalum 180.95	74 W tungsten 183.84	75 Re rhenium 186.21	76 Os osmium 190.23	77 Ir iridium 192.22	78 Pt platinum 195.08	79 Au gold 196.97	80 Hg mercury 200.59	81 Tl thallium 204.38	82 Pb lead 207.2	83 Bi bismuth 208.98	84 Po polonium 209	85 At astatine 210	86 Rn radon 222																														
87 Fr francium 223	88 Ra radium 226	89-103 actinoids	104 Rf rutherfordium 261	105 Db dubnium 262	106 Sg seaborgium 263	107 Bh bohrium 264	108 Hs hassium 265	109 Mt meitnerium 266	110 Ds darmstadtium 267	111 Rg roentgenium 268	112 Cn copernicium 269	113 Nh nihonium 270	114 Fl flerovium 271	115 Mc moscovium 272	116 Lv livermorium 273	117 Ts tennessine 274	118 Og oganesson 277																														
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>57 La lanthanum 138.91</td> <td>58 Ce cerium 140.12</td> <td>59 Pr praseodymium 140.91</td> <td>60 Nd neodymium 144.24</td> <td>61 Pm promethium 145</td> <td>62 Sm samarium 150.36</td> <td>63 Eu europium 151.96</td> <td>64 Gd gadolinium 157.25</td> <td>65 Tb terbium 158.93</td> <td>66 Dy dysprosium 162.50</td> <td>67 Ho holmium 164.93</td> <td>68 Er erbium 167.26</td> <td>69 Tm thulium 168.93</td> <td>70 Yb ytterbium 173.05</td> <td>71 Lu lutetium 174.97</td> </tr> <tr> <td>89 Ac actinium 227</td> <td>90 Th thorium 232</td> <td>91 Pa protactinium 231</td> <td>92 U uranium 238</td> <td>93 Np neptunium 237</td> <td>94 Pu plutonium 244</td> <td>95 Am americium 243</td> <td>96 Cm curium 247</td> <td>97 Bk berkelium 247</td> <td>98 Cf californium 251</td> <td>99 Es einsteinium 252</td> <td>100 Fm fermium 257</td> <td>101 Md mendelevium 258</td> <td>102 No nobelium 259</td> <td>103 Lr lawrencium 262</td> </tr> </tbody> </table>																		57 La lanthanum 138.91	58 Ce cerium 140.12	59 Pr praseodymium 140.91	60 Nd neodymium 144.24	61 Pm promethium 145	62 Sm samarium 150.36	63 Eu europium 151.96	64 Gd gadolinium 157.25	65 Tb terbium 158.93	66 Dy dysprosium 162.50	67 Ho holmium 164.93	68 Er erbium 167.26	69 Tm thulium 168.93	70 Yb ytterbium 173.05	71 Lu lutetium 174.97	89 Ac actinium 227	90 Th thorium 232	91 Pa protactinium 231	92 U uranium 238	93 Np neptunium 237	94 Pu plutonium 244	95 Am americium 243	96 Cm curium 247	97 Bk berkelium 247	98 Cf californium 251	99 Es einsteinium 252	100 Fm fermium 257	101 Md mendelevium 258	102 No nobelium 259	103 Lr lawrencium 262
57 La lanthanum 138.91	58 Ce cerium 140.12	59 Pr praseodymium 140.91	60 Nd neodymium 144.24	61 Pm promethium 145	62 Sm samarium 150.36	63 Eu europium 151.96	64 Gd gadolinium 157.25	65 Tb terbium 158.93	66 Dy dysprosium 162.50	67 Ho holmium 164.93	68 Er erbium 167.26	69 Tm thulium 168.93	70 Yb ytterbium 173.05	71 Lu lutetium 174.97																																	
89 Ac actinium 227	90 Th thorium 232	91 Pa protactinium 231	92 U uranium 238	93 Np neptunium 237	94 Pu plutonium 244	95 Am americium 243	96 Cm curium 247	97 Bk berkelium 247	98 Cf californium 251	99 Es einsteinium 252	100 Fm fermium 257	101 Md mendelevium 258	102 No nobelium 259	103 Lr lawrencium 262																																	

INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY

Fonte: IUPAC, 2016 (adaptada).

Em linhas gerais, esta distinção classifica os ETR essencialmente em leves e pesados, sendo portanto esta, a classificação comumente adotada: “[...] os leves seriam os elementos do lantânio (57) ao európio (63) e os pesados do gadolínio (64) ao lutécio (71), incluindo-se o ítrio” (CEDE, 2014: 49). Entretanto, mais especificadamente, os referidos elementos apresentam a seguinte classificação (consensualmente, a recomendada): **leves, médios e pesados**.

Tabela 1 - Classificação dos ETR

CLASSIFICAÇÃO	ELEMENTOS DE TERRAS RARAS (ETR)	SÍMBOLO	NÚMERO ATÔMICO (Z)
LEVES	Lantânio	La	57
	Cério	Ce	58
	Praseodímio	Pr	59
	Neodímio	Nd	60
MÉDIOS	Promécio	Pm	61
	Samário	Sm	62
	Európio	Eu	63
	Gadolínio	Gd	64
PESADOS	Térbio	Tb	65
	Disprósio	Dy	66
	Hólmio	Ho	67
	Érbio	Er	68
	Túlio	Tm	69
	Itérbio	Yb	70
	Lutécio	Lu	71
	<i>Ítrio</i>	Y	39
<i>Escândio</i>	Sc	21	

Fonte: Elaboração própria, com base nos estudos do CEDE (2014: 49).

Assim como Antoniassi (2017), o CEDE (2014) também ressalta as especificidades dos elementos ítrio e escândio nesta classificação:

Apesar de o ítrio ser mais leve que os lantanídeos, ele é normalmente incluído no grupo de pesados por causa de suas associações químicas e físicas com os elementos pesados em depósitos naturais. O escândio, por sua vez, nem sempre é classificado como terras raras, talvez por seu menor potencial econômico (CEDE, 2014: 49).

Como destacou Antoniassi (2017: 13), os ETR, apesar de receberem tal nomenclatura, não se tratam de “terras” e muito menos “raras”, a exemplo do cério (Ce), encontrado com relativa abundância na natureza. Esta alusão origina-se do contexto no qual o primeiro ETR foi descoberto, o que fomentou alguns autores discorrerem a respeito da origem desta denominação.

Neste sentido, Campos (2017: 5) relata que o primeiro registro de um ETR encontrado em um minério descrevia-o como raro. Este minério foi descoberto na Suécia, na vila de Ytterby por Carl Arrhenius em 1787: “Esse raro minério de Ytterby foi chamado Gadolinita ou Ytterbita. É um silicato $(\text{Ce,La,Nd,Y})_2\text{FeBe}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$ encontrado apenas em alguns locais do mundo, por exemplo: Suécia, Noruega, Texas e Colorado, nos Estados Unidos” (CAMPOS, 2017:5).

Figura 2 - Gadolinita (Ytterbita), o primeiro ETR descoberto na natureza



Fonte: WIKIPEDIA (2019).

O autor reforça a adoção da nomenclatura “rara” pela literatura, ao salientar que as TR se apresentam escassas em alguns lugares, como no Continente Europeu, por exemplo: “Na Europa, as terras raras são relativamente raras, sendo encontradas na Escandinávia principalmente” (CAMPOS, 2017: 5).

Todavia, Campos (2017) acredita que ao longo no tempo, os avanços nas pesquisas e na tecnologia demonstraram não se tratarem de elementos raros: atualmente, “o minério mais comum de terras raras, a monazita, ocorre praticamente no mundo todo, e é facilmente encontrado no Brasil, nos Estados Unidos (Flórida e Geórgia), na Índia, na África do Sul e na Austrália. A monazita é um fosfato de composição $(\text{TR})\text{PO}_4$, onde TR = Terra Rara” (CAMPOS, 2017: 5).

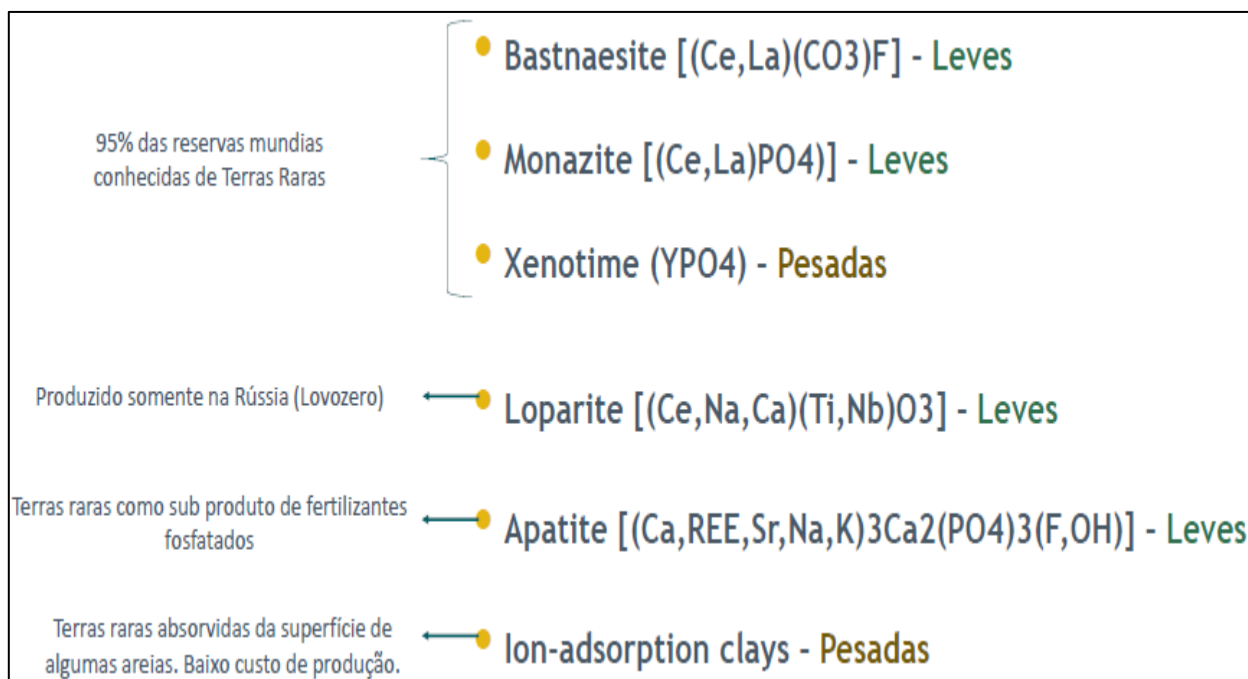
Consoante a estas constatações, o relatório da CBMM (Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração), apresentado no IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) em outubro de 2017, afirma que “Ce é o 25º elemento mais abundante dos 78 elementos da crosta terrestre

(cerca de 60 partes por milhão)” (CBMM, 2017: 5). Na realidade, **os ETR são compostos químicos oriundos de minerais conhecidos na natureza, não se tratando de “terras” em seu sentido estrito.** Ademais, o referido relatório afirma existir no mundo “[...] cerca de 200 minerais conhecidos que contém terras raras, entretanto a produção vem de 6 fontes, com potencial fonte de TR pesadas e leves (especialmente na Groenlândia e Rússia): Eudialyte $[Na_4(Ca,LREE)_2(Fe,Mn,HREE)ZrSi_8O_{22}(OH,Cl)_2]$ ” (CBMM, 2017: 6).

Consequente ao relatório, Viera e Lins (1997) afirmam se tratar de um número ainda maior da ocorrência destes minerais na crosta terrestre: aproximadamente 250. Tais variações ocorrem de acordo com as descobertas, época, pesquisas e estudos realizados a respeito do tema, bem como o aperfeiçoamento das técnicas de extração destes minérios na natureza. Além disso:

Os elementos de terras raras podem ser encontrados como constituintes das rochas carbonatíticas, granitos, pegmatitos e em rochas silicatadas, em concentrações que variam de 10 a 300 mg/g. Podem também ser encontrados formando mais de 250 diferentes espécies minerais. Desse total, 55 minerais são mais ou menos comuns, enquanto que a maioria das espécies é muito escassa. Entre os minerais de terras raras que apresentam interesse econômico podem ser mencionados: **monazita, bastnaesita, xenotímio, gadolinita, allanita, loparita, euxenita e apatita** (VIERA E LINS, 1997: 5).

Quadro 1 - Distribuição dos ETR por minerais



Fonte: CBMM (2017: 6); GOLEV et al. (2014).

O quadro anterior corrobora exatamente para os estudos de Scorzelli et al. (1993), no que diz respeito aos três principais compostos de TR que apresentam maior viabilidade econômica: “Aproximadamente 95% dos OTR (óxidos de terras raras) são obtidos a partir de três minerais: **monazita, bastnaesita e xenotímio**” (SCORZELLI ET AL. 1993: 29). Adicionalmente, Viera e Lins (1997) especificam a disposição dos ETR na concepção destes três minerais:

Os dois primeiros são os principais portadores dos elementos leves das terras-raras, e o xenotímio é a principal fonte de ítrio e de outros elementos que compõem a fração pesada das terras raras. Na atualidade, principalmente esses três minerais são aproveitados para a produção de elementos de terras raras (VIERA E LINS, 1997: 6).

Outros autores compartilham das abordagens realizadas por Scorzelli et al. (1993). Assim sendo, concordam que, no que tange à utilização destes elementos para fins econômicos, apenas estes três elementos, dos considerados “minerais de terras raras” são “importantes formadores de depósitos de terras raras” (ANTONIASSI, 2017: 17); por corresponder a praticamente todo o abastecimento de ETR da indústria de transformação mundial: a bastnaesita, a monazita e a xenotima ((ANTONIASSI, 2017: 18, apud MARIANO, 1989); (JORDENS et al., 2013)).

Todavia, Gupta e Krishnamurthy (2005) salientam a importância dos demais minerais, como: a apatita, a goiazita, a perovskita, o pirocloro, o zircão (ou zirconita), entre outros, que mesmo não se tratando estritamente de “minerais de terras raras”, tem o potencial de concentrar naturalmente teores significativos de ETR, sendo também considerados “fontes potenciais desses elementos” (ANTONIASSI, 2017: 18). Viera e Lins (1997: 6) partilham exatamente deste pensamento, ao alegar que “alguns outros minerais como perovskita, fluorita e zircão, poderão se tornar no futuro fontes importantes de TR”. Ainda segundo estes, desde meados da década de 1990, esses minerais eram processados em escala industrial para a obtenção de outros elementos. Assim, ambas pesquisas acordam com Abrão (1994), por este acreditar que os ETR poderiam vir a ser recuperados como “subprodutos”.

1.1. História e propriedades gerais

De acordo com Filho e Serra (2014), o primeiro registro histórico sobre as TR data de 1751, quando o sueco Axel Frederik Cronstedt descobre um novo mineral, a “pedra pesada de

Bastnäs”, posteriormente chamado de **cerita**. Naquele período, após sucessivas análises, passou-se a acreditar que o mineral se tratava de um “silicato de cálcio e ferro, sendo que as TR, até então desconhecidas, foram confundidas com o cálcio” (WEEKS, 1956; WERTS, 2005). Entretanto, apesar do referido registro por parte de Cronstedt, o mineral não foi investigado até 1803. Sua análise foi retomada autonomamente, a partir deste ano, por Martin Heinrich Klaproth e por Wilhelm Hisinger, esse juntamente com o jovem Jöns Jacob Berzelius (FILHO ET AL., 2019).

Mediante a isto, Filho et al (2019: 3) também afirmam que Klaproth, Hisinger, e Berzelius determinaram que o mineral possuía a mesma nova “terra”, que foi chamada de ocroíta por Klaproth. Hisinger e Berzelius denominaram essa “terra” de “ceria” (céria) (Ce) e o mineral de “cerita”, nome relacionado ao planeta Ceres, descoberto cerca de dois anos antes.

Ainda no relato dos autores, Carl Gustaf Mosander, assistente e futuro sucessor de Berzelius na “Karolinska Medico-Chirurgical Instiute” em Estocolmo, retomou os estudos com a “cerita”, descobrindo o lantânio (La) em 1839. Posteriormente, em 1842, Mosander anunciou a descoberta do didímio (em 1885, este foi comprovado por Carl Auer von Welsbach como sendo uma mistura de dois novos elementos, Nd e Pr). Um ano depois, em 1843, Mosander (auxiliado por Berzelius), anunciava dois novos elementos presentes na céria: o térbio (Tb) e o érbio (Er).

Assim, o período compreendido entre o final do século XVIII e pós-meados do século XX foi significativamente marcado pela busca e consequentes descobrimentos de novos ETR no mundo, que deram novos rumos aos estudos destes elementos na química, mineralogia e demais ciências relacionadas ao tema (figura 5):

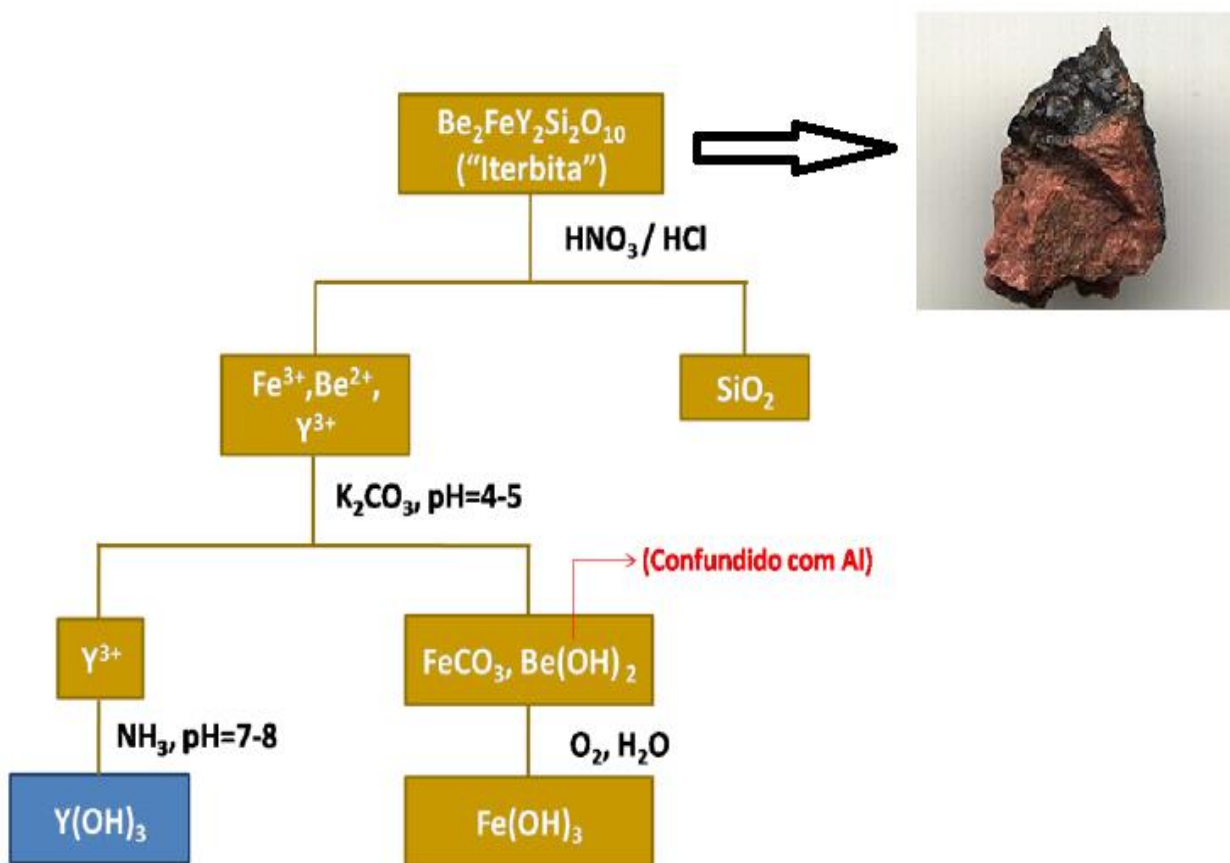
Com a organização periódica dos elementos por Mendeleev em 1869, a busca por novos elementos foi retomada com afinco. Na Suécia, o berço das TR, na Universidade de Upsala, Per Theodore Cleve e Lars Frederik Nilson relatam a descoberta de escândio (Sc), hólmio (Ho) e túlio (Tm) em amostras de gadolinita em 1879. Curiosamente, Cleve e Nilson nasceram em 1840, ano em que nasceram também Rodin e Monet. No mesmo ano, após cuidadoso trabalho espectroscópico Emile LeCoq Boisbaudran, na França, descobre o samário (Sm) e o disprósio (Dy) em 1886, em amostras de céria. Ainda em amostras de céria, Jean Charles Marignac descobre o gadolínio (Gd) em 1880. Já no século XX, Eugène-Anatole Demarcay em 1901 descobre o európio (Eu) e em 1907 Georges Urbain descobre o Lutécio (Lu). Restava o elemento 61 localizado entre o neodímio e o samário. Marinsky, em 1947 encontrou o isótopo 147 em produtos de fissão nuclear do urânio e o elemento foi denominado promécio (Pm). Partindo de 20 ton de óxidos de terras raras provenientes de apatita (6000 ton), em 1965 Olavi Erämetsä, em Helsinki, isolou 82 mg de Pm_2O_3 contendo o isótopo radioativo 147. A saga da descoberta das TR iniciada em 1794 por um finlandês (J. Gadolin) se encerra por outro finlandês (O. Erämetsä) em 1965! (FILHO ET AL., 2019: 3-4).

Ainda na perspectiva de Filho e Serra (2014), considera-se também que a Química das TR teria sido concomitantemente difundida (ao período do registro da cerita), pelo sueco Carl Axel Arrhenius, com a descoberta da **iterbita** (mineral posteriormente chamado de gadolinita) em 1787:

Foi desse mineral que, em 1794, o finlandês Johan Gadolin, considerado o pai da Química das TR, isolou a terra que batizou de ítria, reconhecendo o ítrio como um novo elemento químico e pensando tratar-se do óxido de ítrio puro. Na verdade, a ítria consistia em uma mistura de óxidos que hoje se conhecem como terras ítricas, isto é, os óxidos do ítrio e dos lantanídeos pesados (Gd-Lu) (FILHO E SERRA, 2014: 754).

O aperfeiçoamento deste elemento realizado pelo finlandês (anteriormente ilustrado pela figura 2), pode ser observado no esquema abaixo:

Figura 3 - Esquemática do processo empregado por Johan Gadolin para a separação dos componentes da iterbita (gadolinita) e identificação do ítrio



Fonte: SERRA ET AL. (2015: 250), adaptada.

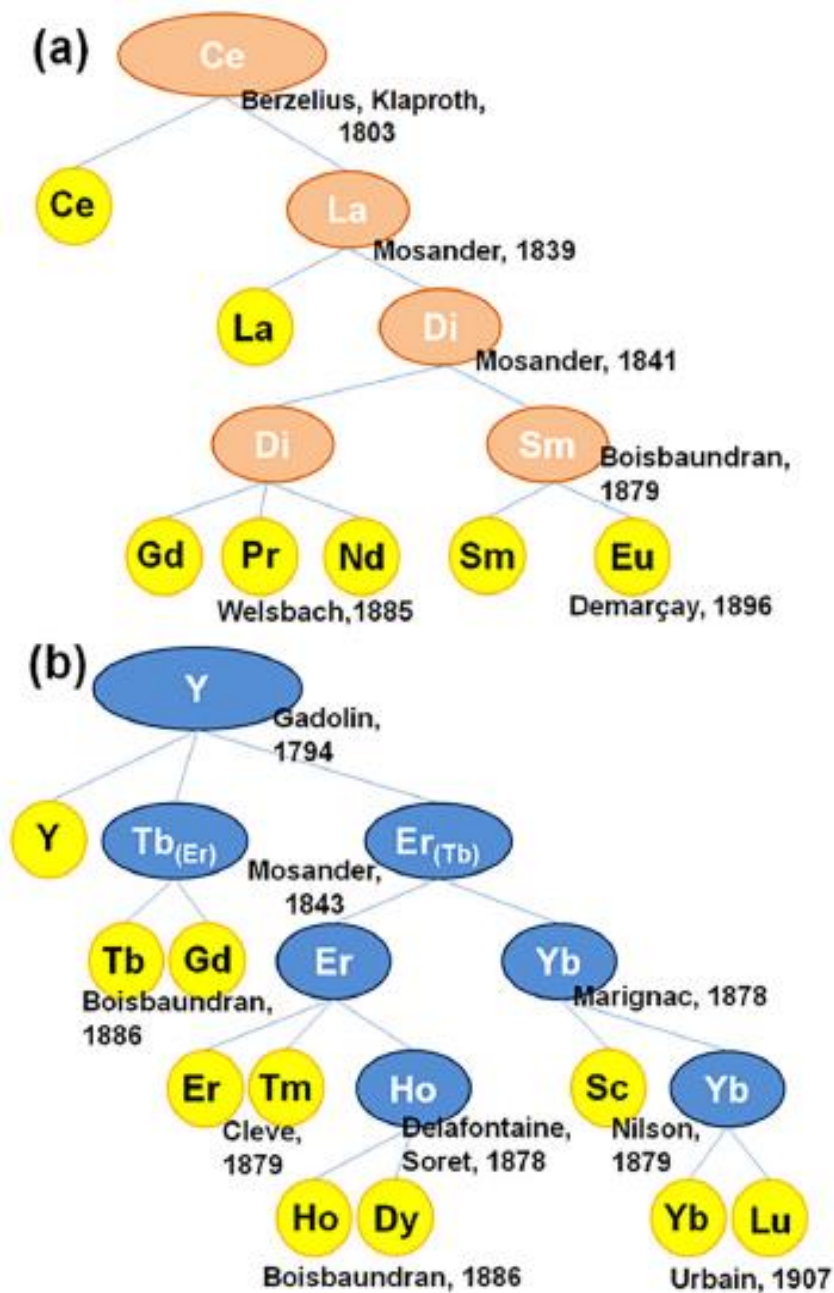
Como relata o finlandês Lauri Niinistö no capítulo “*Discovery and Separation of the Rare Earths*” (do livro *Rare Earths*), sob edição de Saez-Puche e Caro (1998): foi em 1787, que Carl Axel Arrhenius (tenente do exército sueco e geólogo amador) encontrou um mineral escuro e pesado, numa pedreira no vilarejo de Ytterby a 30 km de Estocolmo. Após ser enviado para diversos analistas, o mineral foi nomeado “ytterbite” por Bengt Reinhold Geijer que “determinou sua densidade em $4,2 \text{ g cm}^{-3}$ considerando-a formada por tungstênio e bário, recentemente descobertos” (FILHO ET AL., 2019: 3).

Filho et al. (2019: 3), registram que após cinco anos, em 1792, Johan Gadolin da Universidade de Turku iniciou o estudo da “pedra preta de Ytterby”. Dois anos depois, em 1794, Gadolin chegou à conclusão de que a “pedra de Ytterby” era composta por uma nova “terra” (óxido), denominando-a de “yttria” (Y), associada a sílica, óxido de ferro e alumina. Na realidade, Filho et al. (2019) relatam que o alumínio foi confundido com o berílio (Be), que posteriormente, teria sido descoberto por Nicolas Vauquelin em 1798. A “ytterbite” (iterbita) foi posteriormente denominada gadolinita em homenagem a Gadolin, possuindo a composição $\text{Be}_2\text{FeY}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$: “O elemento denominado ítrio, mostrou-se, após mais de 100 anos de pesquisas, ser formado de dez elementos TR” (FILHO ET AL, 2019: 3) - (figura 5).

Como já visto, o mesmo teria ocorrido com o isolamento da céria (supostamente óxido de cério puro) a partir da cerita por Martin Heinrich Klaproth, na Alemanha, e por Jöns Jacob Berzelius e Wilhelm Hisinger, na Suécia (independentemente), em 1803 (SASTRI ET AL., 2003; CONNELLY ET AL., 2005). Acordando com estes estudos, Serra e Filho (2014: 754) afirmam que a céria era, na verdade, “uma mistura das chamadas terras céricas”, isto é, de “óxidos dos lantanídeos leves” (La-Eu, com exceção do promécio, a única das TR que não apresenta isótopos estáveis) (GSCHNEIDNER E CAPELLEN, 1987; DAVIS E SEABORG, 1961).

A partir do descobrimento desses dois elementos, iniciou-se uma extensa e complexa série de trabalhos de separação e identificação de novos elementos a partir dos óxidos supostamente puros (SERRA E FILHO, 2014). O desenvolvimento de tal literatura encontra-se sintetizado nas figuras a seguir. A primeira (figura 4), retrata, cronologicamente, a separação das terras (a) céricas e (b) ítricas por seus respectivos descobridores, a partir das misturas consideradas como elementos puros. Se observará, através dos avanços nos estudos e na literatura a respeito do tema, um aperfeiçoamento destas descobertas, com a inclusão de novos elementos (figura 5):

Figura 4 - Cronologia da separação das terras (a) céricas e (b) ítricas por seus respectivos descobridores, a partir das misturas consideradas como elementos puros*

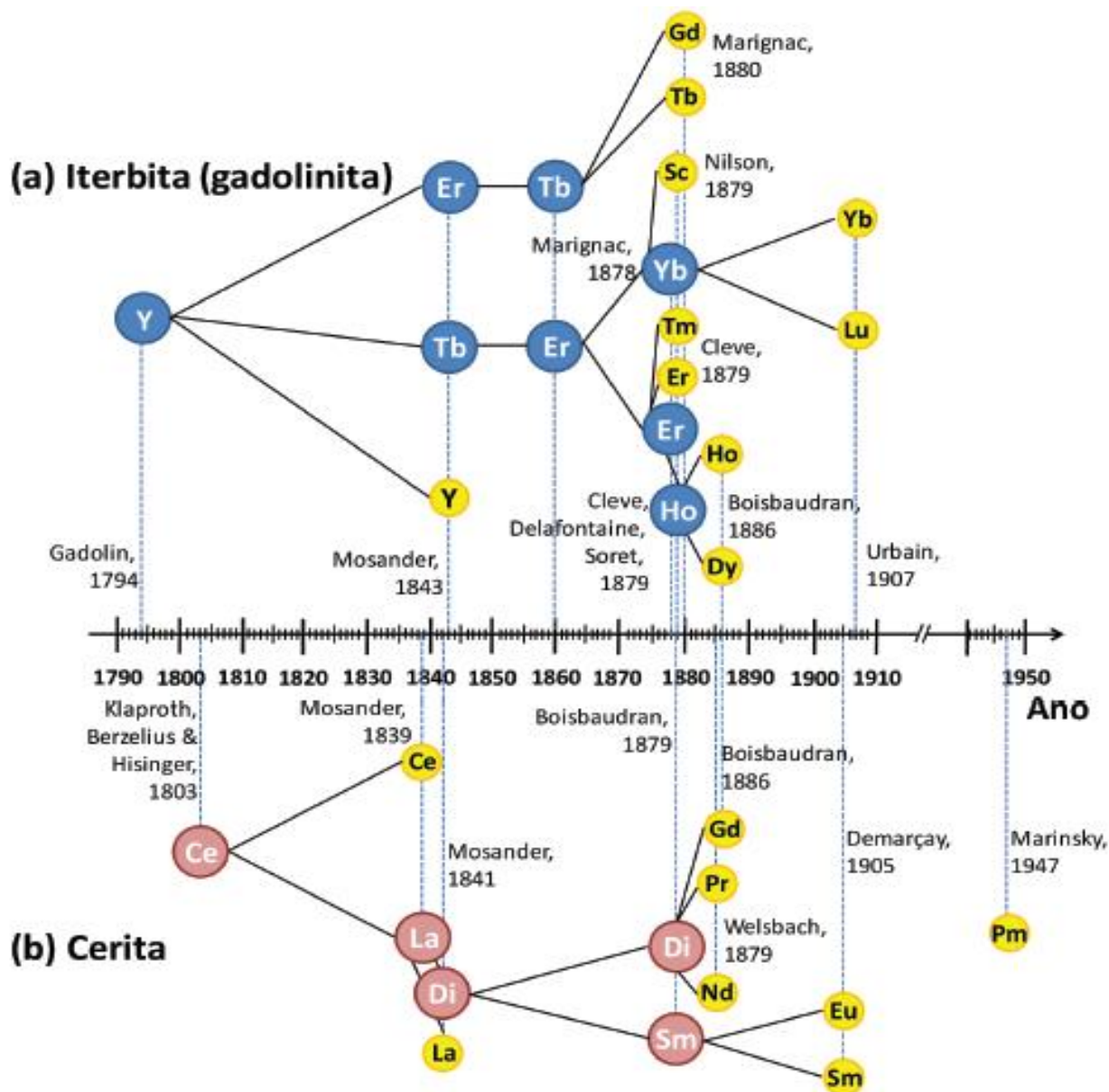


Fonte: SERRA E FILHO (2014: 754); SAEZ-PUCHE E CARO (1998).

* Segundo Serra e Filho (2014: 759), o pseudoelemento chamado de “dídímio” (Di) foi reconhecido entre 1841 e 1885, consistindo, na verdade, de uma mistura de praseodímio e neodímio. O nome “dídímio” vem do grego, didymos, e significa “gêmeo”, pois, segundo Mosander, o referido elemento seria o gêmeo do lantânio.

A figura a seguir traz a mesma representatividade, entretanto, a luz de uma perspectiva horizontal e mais ramificada dos referidos descobrimentos a partir destes dois elementos, até a mais recente inclusão: a do elemento químico Promécio (Pm), descoberto em 1947:

Figura 5 - Cronologia horizontal do descobrimento das TR: (a) das terras ítricas a partir da iterbita (gadolinita) e (b) das terras céricas a partir da cerita



Fonte: FILHO ET AL (2019: 3); SERRA ET AL (2015: 251)

Todavia, como destacou Cotton (2006), o período compreendido entre a descoberta do ítrio (1794) e do lutécio (a última das TR naturais a ser identificada, em 1907, de acordo com a cronologia da figura 3), relatou-se aproximadamente cerca de cem anúncios de descobertas de ETR, entretanto, referentes à inúmeras misturas de TR não completamente separadas (ou seja, não-puras, como as apresentadas nas figuras anteriores).

Observa-se, no entanto, que a ocorrência deste evento possa ter fomentado, em última instância, para o aprimoramento de técnicas mais sofisticadas que identificasse a tipologia destas misturas. Nesta perspectiva, Leone e Robotti (2003) mencionam que a extensa aplicação de técnicas de **espectroscopia de chama** contribuiu significativamente na “elucidação das características dos elementos TR recém descobertos”, além do aprimoramento na precisão da “ocorrência ou não de misturas” (FILHO E SERRA, 2014: 754).

Outrossim:

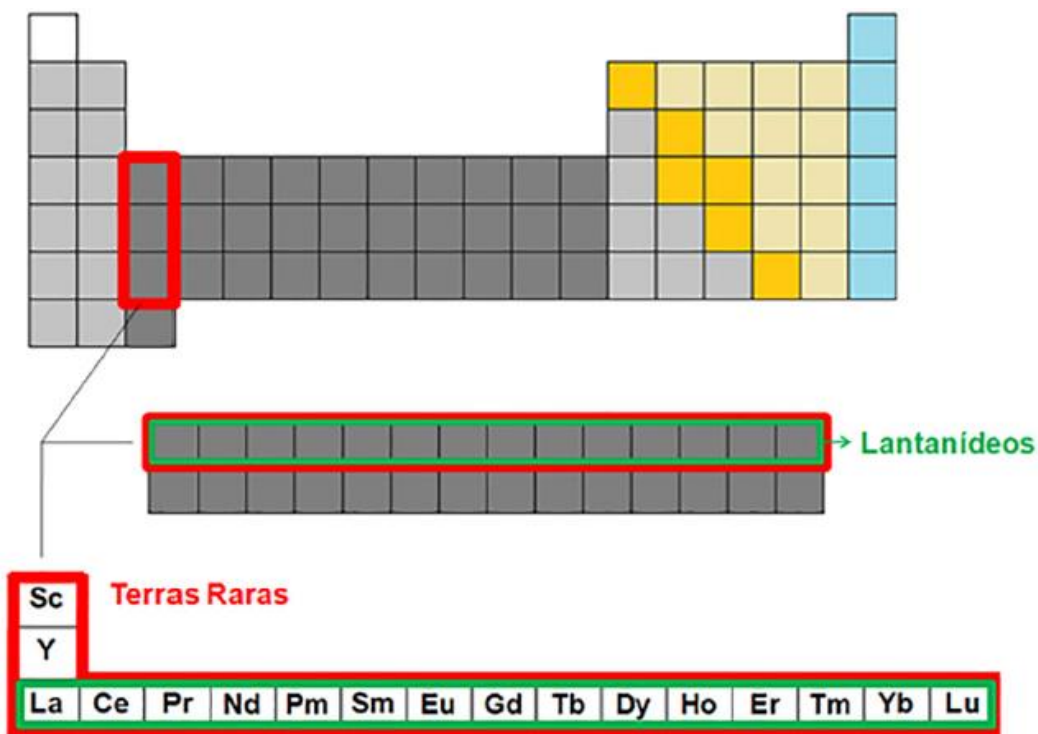
Alie-se a essa técnica, ainda, o exaustivo e cuidadoso trabalho realizado pelos químicos da época, que empregavam apenas métodos analíticos clássicos (recristalização, dissolução fracionada etc.) para a separação das TR: afirma-se, por exemplo, que Charles James certa vez realizou 15000 recristalizações até a obtenção de $Tm(BrO_3)_3$ “puro” (JAMES, 1911: 1332 apud FILHO E SERRA, 2014: 754).

Por fim, Filho e Serra (2014) descrevem a configuração atual dos ETR na Tabela Periódica, bem como a disposição dos mesmos:

Frente a tais descobertas e tendo em vista que a tabela periódica de Mendeleiev podia acomodar apenas um elemento lantanídeo, em 1905, Alfred Werner propôs que se deixasse uma lacuna de 17 elementos entre o bário e o tântalo (uma vez que o háfnio também não era conhecido à época), em um formato similar ao atualmente adotado. Posteriormente, em 1913, através da aplicação de espectroscopia de raios-X, Henry Moseley corrobora com tais proposições e demonstra a existência de não mais que 16 elementos entre o Ba e o Ta, correspondendo aos 15 lantanídeos e ao háfnio, com a introdução do conceito de número atômico. Foi esse o fato que permitiu a interpretação de Niels Böhr de que isso correspondia ao preenchimento gradual das orbitais $4f$, como uma expansão da quarta camada quântica que permitiria a acomodação de 32 elétrons ao invés de 18 (FILHO E SERRA, 2014: 754).

Esta recente disposição na tabela periódica pode ser observada na figura a seguir:

Figura 6 - Configuração atual dos ETR na Tabela Periódica



Fonte: FILHO E SERRA (2014: 754); SERRA ET AL. (2015: 248).

Mesmo com a aceitação acadêmica e atual disposição destes elementos na tabela periódica, a série de TR observada acima sofre, até os dias de hoje, inúmeros questionamentos. Como relataram Serra et al (2015: 248): “A própria posição dos lantanídeos na maioria das tabelas periódicas normalmente leva, por exemplo, à impressão de que esse grupo de elementos é uma espécie de exceção ou nota de rodapé sem importância prática”.

Tal raciocínio vai ao encontro da célebre frase de Pimentel e Sprately (1971: 477) sobre os lantanídeos, em seu livro de Química Geral: “Lanthanum has only one importante oxidation state in aqueous solution, the +3 state. With few exceptions, this tells the whole boring story about the other lanthanides”. Com esta colocação, os mesmos sugerem que o *lanthanum* (lantânio, $Z = 57$) tem apenas um importante estado de oxidação em solução aquosa, o estado +3. Com poucas exceções, apenas esta característica contaria toda a “história chata” sobre os outros lantanídeos.

De encontro a tal pensamento, JENSEN (1986: 487) apresentou a seguinte colocação em relação ao posicionamento desses elementos como um bloco à parte na tabela periódica: “The only result of this convention at present is to suggest to students that these elements are somehow dull

and unimportant and so can be set to one side and ignored, which is regrettably just what happens in most introductory courses and not a few advanced inorganic courses as well”. Isto significa dizer que, o consenso na academia comumente adotado seria o de rotular tais elementos como insignificantes e sem importância, colocando-os de lado e ignorando-os. Uma prática que, segundo Jensen (1986), lamentavelmente acontece na maioria dos cursos introdutórios e também em alguns cursos inorgânicos avançados.

Por conseguinte, Serra et al. (2015) salientam que apenas recentemente, o tema começou a obter relevância nas diversas ciências, defendendo ainda a importância do estudo sobre estes elementos por toda a comunidade acadêmica, de pesquisa e de as suas aplicações no dia a dia:

As Terras Raras (TR) constituem um grupo especial de elementos no que tange à ocorrência natural, similaridade de comportamentos químicos, e propriedades ópticas e magnéticas, sendo, portanto, de papel tecnológico imensamente importante nos dias de hoje. Embora sejam um tema explorado pela ciência há várias décadas, apenas recentemente as TR começaram a deixar de ser um assunto obscuro e pouco divulgado entre os não-especialistas, sejam eles químicos ou não (SERRA ET AL, 2015: 248).

Neste sentido, salienta-se aqui a importância das TR nas distintas áreas científicas. Entretanto, ao aprofundar sua análise, observa-se ainda um complexo processo de separação dos lantanídeos, a partir da extração de seus dois elementos químicos originais (Ce e Y). Tal complexidade, pode ter sido durante muito tempo, um dos motivos para a demasiada “centena de anúncios de descobertas de ETR”: tal separação para a obtenção individual de demais elementos, decorre “de sua alta similaridade química, com diferenças muito pequenas entre si em relação à solubilidade de seus compostos ou à formação de complexos” (FILHO E SERRA, 2014: 754).

Portanto, a legitimidade de uma TR pode ser involuntariamente maculada, uma vez que a substituição de uma TR por outra é livre de impedimentos em diversos retículos cristalinos. Nesta perspectiva, esta facilidade resulta, com poucas exceções, de sua apresentação no estado de oxidação 3+, e por possuírem raios iônicos bastante próximos (CASTOR E HEDRIK, 2006). Em parte, tal conclusão vai ao encontro das alegações de Pimentel e Sprately (1971). Por isto, “[...] tal facilidade de substituição resulta na ocorrência simultânea de várias TR em um mesmo mineral, além de uma considerável distribuição de tais elementos pela crosta terrestre (elementos litofílicos)” (FILHO E SERRA, 2014: 754).

Mediante a todo o exposto, ao possuírem um diferente conjunto de propriedades, sendo muitas delas completamente despercebidas à época da descoberta desses elementos, não é de se surpreender que as TR tenham sido cunhadas como “raras” e como “elementos exóticos” (FILHO E SERRA, 2014: 755). Para a quebra deste “rótulo”, a subseção seguinte apresenta a localização, produção mundial e aplicações das TR no dia a dia, com o intuito de ressaltar a importância destes elementos para distintos setores e segmentos da sociedade, no passado e na atualidade.

1.2. Localização e produção mundial

De acordo com o CGEE (2013), as TR podem ser encontradas em diversos países, destacando-se: China, Austrália, Canadá, Estados Unidos, Índia, Malásia, Rússia e Brasil.

Todavia, quando utilizadas técnicas inadequadas ou equipamentos de baixa tecnologia, estes elementos são difíceis de se extrair em “volumes que sejam economicamente viáveis” (CGEE, 2013: 30). Nesta perspectiva, Wang Caifeng, Secretário Geral da Associação Chinesa da Indústria de Terras Raras, forneceu as seguintes estimativas para a produção mundial de 2012 a 2015, através da agência internacional de notícias BLOOMBERG NEWS (2010):

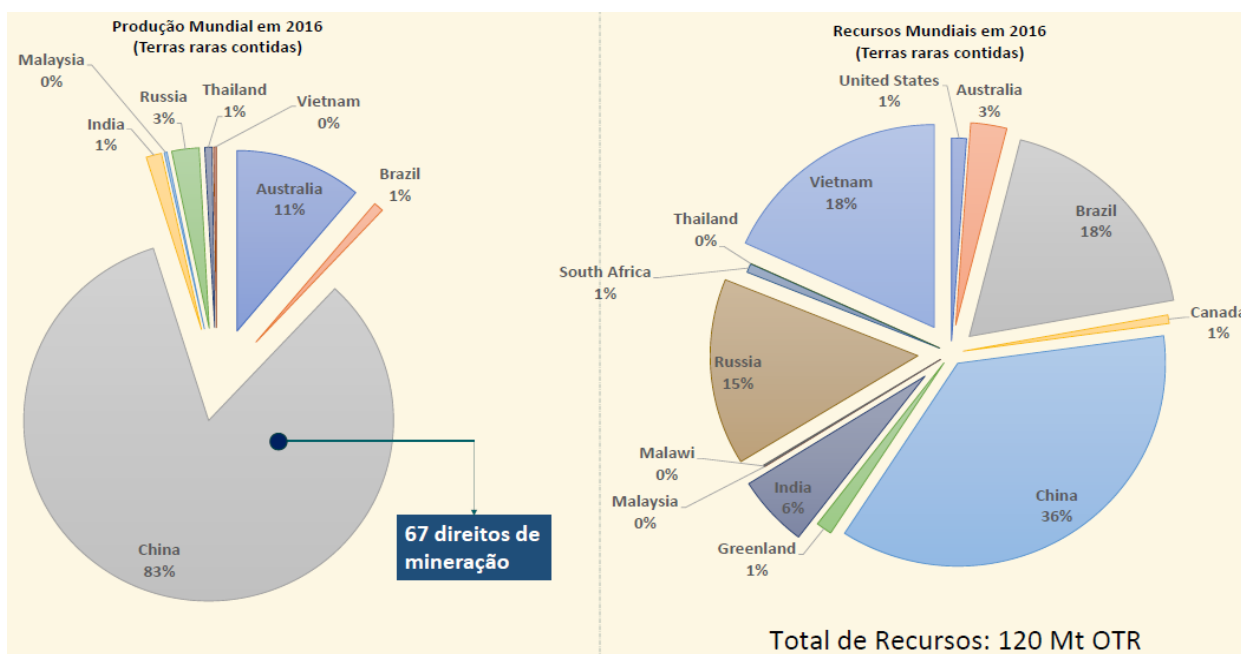
As estimativas da produção mundial eram de 124.000 toneladas por ano (t/ano) em 2012, enquanto a demanda atual já atingia 135.000 t/ano, com previsão de crescimento até 210.000 t/ano em 2015. Como os projetos de mineração demoram a iniciar a produção, a expectativa é de que a produção não ultrapasse 160.000 t/ano nos próximos três anos, o que pode levar à escassez desses recursos no curto prazo (BLOOMBERG NEWS, 2010).

Além disso, o fato de suas descobertas na natureza não ocorrerem de forma constante e em curtos espaços de tempo, a extração, bem como demais características dos ETR podem então ser observadas em cortes temporais. A exemplo disto, Andrade (2014) relata que em 2013, as reservas, produção e consumo destes elementos eram liderados pela China:

A China possui cerca de 40% das reservas mundiais de terras raras (TR), seguida pelo Brasil (16%) e EUA (10%). A China também é a líder da produção mundial, com 89,1% dos óxidos de terras raras produzidos em 2013 (90,4% em 2012). A China consome cerca de 64% da produção mundial, seguida pelo Japão (15%), EUA (10%), União Europeia (7%) (ANDRADE/DNPM-MS, 2014: 1).

Avançando temporalmente na análise, os gráficos seguintes sintetizam a localização, contraposta pelos direitos de extração dos ETR ao redor do mundo, a partir dos dados coletados pelo USGS (United States Geological Survey), em 2016. Observa-se que a China ainda é o principal detentor tanto da localização, quanto dos direitos de extração destes elementos em diversas partes no mundo:

Gráficos 1 e 2 - Produção e recursos mundiais dos ETR em 2016, respectivamente



Fonte: CBMM (2017: 7).

Andrade (2014), do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) compartilha destas observações, ao salientar que a China e os Estados Unidos sempre ocuparam o posto de maiores detentores destes depósitos minerais pelo mundo:

[...] Os ETR estão contidos, principalmente, nos minerais dos grupos da **bastnaesita** (Ce, La) CO_3F , **monazita** (Ce, La) PO_4 , **argilas iônicas portadoras de terras raras e xenotímio** (YPO_4). As maiores reservas de bastnaesita, em carbonatitos, estão na China (Baotou, Mongólia Interior) e nos Estados Unidos da América (EUA) (Mountain Pass, Califórnia). No Brasil, Austrália, Índia, África do Sul, Tailândia e Sri Lanka, os ETR ocorrem na monazita em areias de paleopraias, junto com outros minerais pesados (ilmenita, zirconita e rutilo) e também em carbonatitos, cujas principais ocorrências no Brasil se encontram em Catalão (GO), Araxá (MG), Tapira (MG), Jacupiranga (SP), Mato Preto (PR), dentre outras (ANDRADE/DNPM-MS, 2014: 1).

Feitas estas observações, a subseção seguinte traz as aplicações das TR no dia a dia. Em sequência, será realizado um contraponto entre as suas aplicabilidades e o nível de produção mundial, verificando assim a equidade desta relação.

1.3. Aplicações

Sob os relatos de Filho e Serra (2014: 755), registra-se que, até o início da década de 1950, as TR eram, em sua maioria, tratadas como “curiosidades de laboratório”, especialmente devido à dificuldade de obtenção de seus compostos puros. Por isto, de acordo com os relatos de Saez-Puche e Caro (1998) e Gschneidner e Capellen (1987), suas aplicações em processos industriais e no dia a dia resumiam-se na fabricação de mantas para lampiões a gás (nitrato de tório e cério) - por volta de 1885, e na manufatura de pedras para isqueiros (mischmetal, liga metálica contendo 50% de Ce, 25% de La e diferentes quantidades de Pr e Nd, além de Fe e Mg) - por volta de 1903.

Neste sentido, analisando a relação *produção x aplicabilidade*, Filho e Serra (2014) alegam que, até o início da Segunda Guerra Mundial (SGM), apenas o cério e európio eram obtidos em quantidades apreciáveis; devido à sua relativa facilidade de separação através de reações de oxidorredução. Esses autores, assim como Spedding et al. (1947), acrescentam ainda que durante a SGM, o **Projeto Manhattan** foi considerado como um dos principais contribuintes para o desenvolvimento dos processos de separação de TR, pois objetivava a utilização da cromatografia de troca iônica para a separação de lantanídeos como modelo para a separação de actinídeos.

A utilização desta técnica, bem como o início da utilização de outros métodos de separação (extração com solventes, cromatografia de extração) foram essenciais para a “obtenção de quantidades cada vez maiores e mais puras de TR” (ABRÃO, 1994; LYNAS CORPORATION LTD, 2020a), viabilizando, neste sentido, o desenvolvimento de suas aplicações atuais. Em suma, as amplas aplicações das TR consistem basicamente, na exploração das propriedades magnéticas, ópticas ou redox inerentes a tais elementos.

Em síntese, as principais aplicações das TR podem ser analisadas na tabela a seguir. Serão observadas que, das oito categorias de aplicações elencadas, o cério (Ce) e o lantânio (La) são os elementos mais utilizados entre as TR (7 vezes), seguidos pelo praseodímio (Pr) (6 vezes) e pelo neodímio (Nd) (5 vezes):

Tabela 2 - Principais aplicações das TR

PRINCIPAIS APLICAÇÕES DAS TR	FREQUÊNCIA DAS TR (por hierarquia de utilização)					
Catálise automotiva	Ce	La	Nd	Pr		
Craqueamento de petróleo	La	Ce				
Vidros	Ce	La	Nd	Pr		
Polimentos	Ce	La	Pr			
Ligas para baterias Ni-MH	Ce	La	Nd	Pr	Sm	
Ímãs permanentes	Nd	Pr	Dy	Gd	Tb	Sm
Luminóforos	Ce	Y	La	Eu	Tb	Gd
Cerâmicas de alta resistência e dielétricos	Y	La	Ce	Nd	Pr	

Fonte: Elaboração própria, com base nos estudos de FILHO E SERRA (2014).

Nota-se coerente a defesa, por parte da literatura, da ocorrência em maior abundância do cério na natureza e sua maior utilização nas aplicações acima descritas. Vale também destacar a desmotivação da extração do escândio (Sc), devido ao seu baixo potencial econômico (o mesmo nem aparece na tabela acima). Esta constatação vai ao encontro dos estudos desenvolvidos pelo CEDE (2014) a respeito deste elemento. Ademais, os dados a seguir sugerem que:

Tabela 3 - Percentuais de utilização sobre as principais aplicações das TR

PRINCIPAIS APLICAÇÕES DAS TR	VOLUME (em %)	VALOR (em %)	RELAÇÃO VOLUME versus VALOR (em %)
Catálise automotiva	20	5	-5
Vidros	10	2	-8
Polimentos	12	4	-8
Ligas para baterias Ni-MH	18	14	-4
Ímãs permanentes	21	37	16
Luminóforos	7	32	25
Cerâmicas de alta resistência e dielétricos	6	3	-3
Outros	6	3	-3
TOTAL	100	100	GANHO 10

Fonte: Fonte: Elaboração própria, com base nos estudos de FILHO E SERRA (2014: 756).

Procedendo com uma análise simples a respeito dos dados acima, verifica-se que em termos de saldos percentuais na relação volume *versus* valor, os principais itens a serem considerados com uma “relação positiva” são os ímãs permanentes (com ganho de 16) e os luminóforos (com ganho de 25). Obviamente, os demais itens acima listados não apresentam perdas ao serem fabricados, por se tratarem de grandezas diferentes: VOLUME e VALOR. Todavia, tal análise demonstra por vezes, o motivo pelo qual os países optem pela extração de determinadas TR em detrimento de outras, pois baseiam-se nos ganhos na produção de suas aplicações.

Em suma, o quadro a seguir apresenta as aplicações atuais dos ETR, considerando os seus 17 elementos:

Quadro 2 - Aplicações atuais dos ETR

ETR	APLICAÇÕES ATUAIS
Escândio	Ligas metálicas usadas pela indústria aeroespacial;
Ítrio	Fósforos, cerâmicas e ligas metálicas;
Lantânio	Baterias, catalisadores para refino de petróleo;
Cério	Auto catalisadores, catalisador químico, polimento de vidro, ligas metálicas;
Praseodímio	Ímãs de alta potência, pigmento cerâmico amarelo, <i>Autocat</i> ;
Neodímio	Ímãs de alta potência;
Promécio	Fonte de radiação beta;
Samário	Ímãs de alta temperatura;
Európio	Iluminação fluorescente;
Gadolínio	Agente de contraste para ressonância magnética, hastes de reatores nucleares;
Térbio	Fósforos para iluminação, ímãs de alta potência e alta temperatura;
Disprósio	Ímanes de alta temperatura e alta temperatura, lasers;
Hólmio	Ímãs com maior potência existentes;
Érbio	Lasers, corantes de vidro;
Túlio	Materiais magnéticos de cerâmica ainda em desenvolvimento;
Itérbio	Tecnologia de fibra óptica, painéis solares;
Lutécio	Scanners PET.

Fonte: Elaboração própria, com base em LYNAS CORPORATION LTD (2020b).

Assim sendo, com base em seus respectivos ETR, o quadro a seguir elenca as aplicações atuais oriundas dos principais **compostos de TR**:

Quadro 3 - Aplicações atuais oriundas dos Compostos de TR

1) CATALISADORES

- * Refinamento de petróleo;
- * Processamento químico;
- * Conversores catalíticos;
- * Aditivos para diesel;
- * Purificadores de poluição industrial.

3) ELETRÔNICOS

- * Display *phosphors*; LCD, PDP, CRT;
- * Fósforos para imagiologia médica;
- * Lasers;
- * Fibra óptica;
- * Sensores ópticos de temperatura.

5) CERÂMICA

- * Capacitores;
- * Sensores;
- * Corantes;
- * Cintiladores.

2) VIDRO

- * Compostos de polimento;
- * Vidro óptico;
- * Vidro resistente a UV;
- * Radiografia;
- * Espelhos de controle térmico;
- * *Colourisers / desodarisers*.

4) LIGAS DE METAIS

- * Armazenamento de hidrogênio;
- * Aço;
- * Pederneiras mais leves;
- * Alumínio / magnésio;
- * Ferro fundido;
- * Pilhas Ni-MH;
- * Células de combustível;
- * Superligas.

6) ÍMÃS

- * Motores;
- * Unidades de disco (UD) e MUD**;
- * Geração de energia;
- * Atuadores;
- * Microfones e alto-falantes;
- * Ressonância magnética;
- * Sistemas de freio antibloqueio;
- * Partes automotivas;
- * Sistemas de comunicação;
- * Propulsão e propulsão elétricas;
- * Rolamentos sem atrito;
- * Discos magnéticos de armazenamento;
- * Tubos de potência para micro-ondas;
- * Refrigeração magnética;
- * Ligas magneto-restritivas.

** motores de unidade de disco.

Com base nas inúmeras aplicações oriundas dos subprodutos dos ETR apresentadas até aqui e a sua relativa abundância na natureza, a subseção seguinte aborda a delicada relação entre a extração e a aplicabilidade destes elementos no mundo.

1.4. Produção e aplicação das TR no mundo: uma relação controversa

Uma observação a parte precisa ser feita. Viera e Lins (1997) já apontavam na segunda metade dos anos 90, para a existência de uma relação no mínimo desigual entre produção mundial e aplicabilidade dos ETR no mundo:

Para suas diversas aplicações, somente uma pequena parte das indústrias é grande consumidora de TR. A grande maioria consome pequenas quantidades. O maior consumo (99%) é para terras raras não separadas, e somente 1% do total é usado como elementos individuais. A distribuição percentual dos setores industriais que consomem terras raras são: catalisadores para petróleo (36%), metalurgia (31%), vidro/cerâmica (30%) e outros usos (3%) (VIERA E LINS, 1997: 14).

Nesta perspectiva, de lá para cá, o cenário mundial não apresentou grandes mudanças. Filho e Serra (2014) propõem um olhar ainda mais atento na análise desta relação desigual na atualidade. Segundo os autores, atualmente as TR ainda “correspondem a apenas 0,01% da produção mundial de metais, cujo maior volume, por exemplo, é associado à siderurgia (90%). Já em termos econômicos, o mercado de TR representa apenas 3% do valor relacionado somente à indústria do cobre” (FILHO E SERRA, 2014: 753).

Por esse ângulo, os autores salientam que a importância dada a estes elementos em termos de produção industrial, não segue às suas eficientes aplicabilidades quando corretamente extraídos:

Por mais que as TR contribuam com frações tão pequenas, sua importância estratégica é suficientemente grande para terem sido utilizadas, por exemplo, como arma de embargo da China a fim de impor concessões ao Japão. Os “pequenos” volumes consumidos de TR são limitantes na confecção de produtos tecnológicos (computadores, lâmpadas, celulares etc.), no desenvolvimento de tecnologias limpas (veículos híbridos, energias eólica e solar), no craqueamento de petróleo, na comunicação, nas aplicações em defesa, entre outros. Isso faz da disponibilidade de TR um assunto de máxima importância para a soberania de uma nação. Sabe-se que o desenvolvimento industrial de um país pode ser medido pelo seu consumo de ácido sulfúrico. **Atualmente, pode-se afirmar que o desenvolvimento de uma nação é medido pelo consumo de TR para aplicações em tecnologia de ponta** (FILHO E SERRA, 2014: 753).

Consoante a este pensamento, Andrade (2014: 1) ainda ressalta que, “embora haja muita pesquisa sobre o assunto, não há substitutos eficientes para os diversos usos dos ETR”, destacando assim a importância de sua exploração e utilidade no mundo; como Silva (2008: 2) já havia frisado: “Ressalte-se que existem substitutos de terras raras para diversas aplicações, os quais, contudo, são menos eficazes”. Nesta perspectiva, Silva (2008) relata que, incentivando-se a correta extração destes elementos na natureza, obtém-se as principais aplicações dos compostos de TR, a saber:

Composição e polimento de vidros e lentes especiais, catalisadores de automóveis, craqueamento de petróleo, fósforo para tubos catódicos de televisor em cores, ímãs permanentes para motores miniaturizados, ressonância magnética nuclear, cristais geradores de laser, supercondutores, absorvedores de hidrogênio, etc (SILVA/DNPM-SEDE, 2008: 2).

Acrescido a isso, o portal Química Viva (2019), do Conselho Regional de Química da IV Região (CRQ-IV), semelhantemente ressalva a importância destes elementos para os processos industriais, descrevendo ainda as TR como sendo “metais de transição, sendo os lantanídeos considerados de transição interna” (QUÍMICA VIVA, 2019: 1).

Ademais, frisam que:

[...] Presentes em centenas de minerais, essas substâncias têm na monazita, na bastnasita e na xenotímia seus principais minérios. Em especial, configuram-se em insumos essenciais para a produção de catalisadores utilizados no refino do petróleo, mas também estão presentes no processo de fabricação de diversos itens de alta tecnologia, como super ímãs aplicados em geradores eólicos e motores de carros elétricos, em lâmpadas (fluorescentes e LEDs), bem como em telas de televisores e monitores (QUÍMICA VIVA, 2019: 1).

Em suma, no que se refere às tecnologias relacionadas a energias limpas e controle de emissões atmosféricas, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2013) argumenta que as cadeias produtivas são “fortemente dependentes de TR”, sendo portanto, essenciais, especialmente na fabricação de quatro produtos e suas respectivas utilidades:

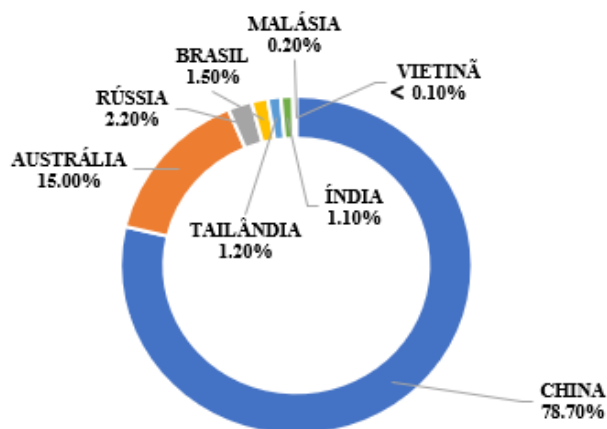
- **Ímãs permanentes**, usados em turbinas eólicas e veículos elétricos;
- **Baterias avançadas**, utilizadas em veículos elétricos;
- **Semicondutores filmes-finos**, usados em sistemas de energia fotovoltaica;
- **Fósforos**, utilizados em sistemas de iluminação mais eficientes (CGEE, 2013: 29).

Além disso, o referido centro afirma também que nos últimos anos, houve um aumento no interesse em aplicar as TR na investigação das propriedades e funções de sistemas bioquímicos e na determinação de substâncias biologicamente ativas (CGEE, 2013: 29). Tal interesse é explicado pelo fato de as “TR serem usadas principalmente como sondas espectroscópicas no estudo de biomoléculas e suas funções” (CGEE, 2013: 30). A exemplo desta utilidade, citam-se:

Traçadores biológicos para acompanhar o caminho percorrido pelos medicamentos no homem e em animais; marcadores em imunologia (fluoroimunoensaios); e agentes de contraste em diagnóstico não invasivo de patologias em tecidos por imagem de ressonância magnética nuclear (RMN) (CGEE, 2013: 30).

Ademais, WU et al. (1996) destacou que, em especial, a indústria chinesa aproveita-se das vantagens econômicas dos ETR adsorvidos em argilas iônicas, desde a década de 1990. Nesta percepção, destaca-se que a China seria um dos poucos países a realmente investirem na produção e posterior aplicabilidade dos produtos oriundos das TR em seu dia a dia, como relatado, a exemplo, nos processos industriais (o que se verificou nos gráficos 1 e 2). BALARAM (2019: 1287) concorda com tal alegação, afirmando que em 2017, a economia chinesa era responsável por cerca de 78,7% da produção mundial, seguida de Austrália (15%) e Rússia (2,2%):

Gráfico 3 - Percentual de produção de TR no mundo, em 2017



Fonte: Elaboração própria, com base em BALARAM (2019: 1287 - adaptado).

Mas, e o Brasil? Nessa perspectiva, a seção seguinte aborda a presença dos ETR no Brasil, as políticas de extração destes elementos no país e os atuais rumos tomados a respeito do tema.

CAPÍTULO 2. O BRASIL E AS TERRAS RARAS

Atualmente, o Brasil apresenta um nível considerável de reservas de TR, se comparado à concentração mundial destes elementos na superfície terrestre ao redor do mundo. Estima-se que o território brasileiro apresenta cerca de 18,33% da concentração destes elementos. A tabela a seguir demonstra esta constatação:

Tabela 4 - Reservas e Produção Mundiais dos ETR em 2019

PAÍS	RESERVAS		PRODUÇÃO MUNDIAL	
	MONTANTE (em termos de Óxidos de ETR)	% ESTIMADO	MONTANTE (em termos de Óxidos de ETR)	% ESTIMADO
Austrália	3300000	2.75	21000	10
Brasil	22000000	18.33	1000	0.48
Canadá*	830000	0.69	—	—
China	44000000	36.67	132000	62.86
Groenlândia*	1500000	1.25	—	—
Índia	6900000	5.75	3000	1.43
Rússia	12000000	10	2700	1.29
África do Sul*	790000	0.66	—	—
Vietnã	22000000	18.33	900	0.43
EUA	1400000	1.17	26000	12.38
Demais Países*	5280000	4.4	—	—
TOTAL de Reservas e Produção Mundiais	120000000	100	210000	100

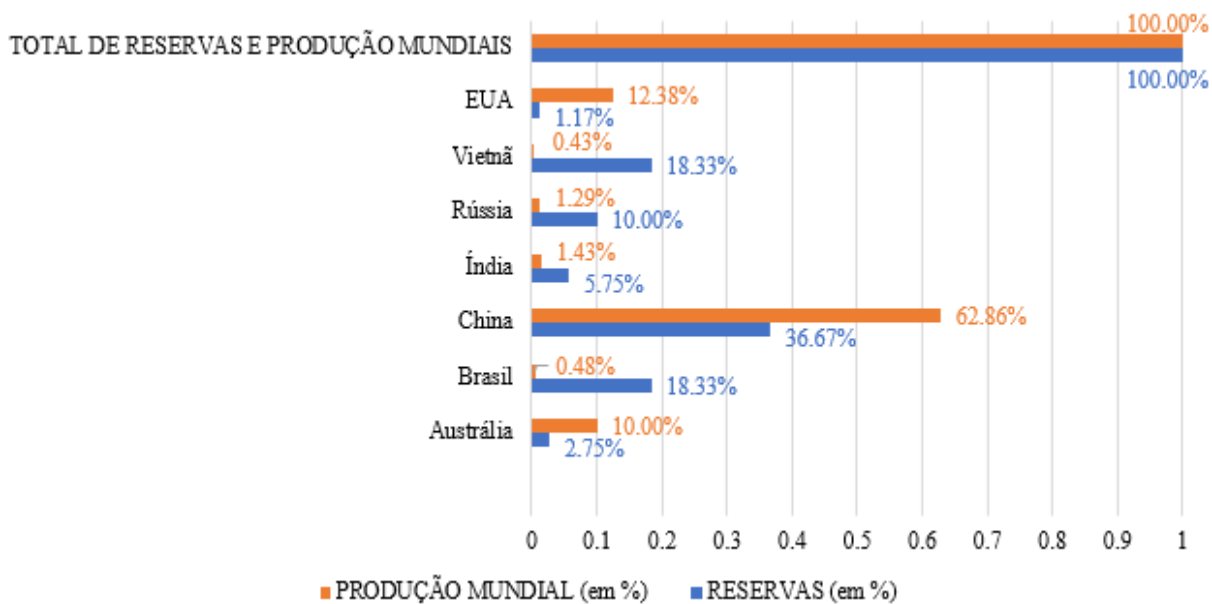
*Não apresentou os dados da PRODUÇÃO MUNDIAL.

Fonte: Elaboração própria, com base em USGS (2020: 133).

A China representa cerca de um terço das reservas mundiais, liderando as estimativas. O Brasil, juntamente com o Vietnã, ocupa a segunda posição no ranking de reservas mundiais.

Todavia, observa-se uma discrepância na comparação com o nível da produção mundial destes elementos para o referido ano. O gráfico a seguir apresenta este desequilíbrio, considerando apenas os países que declararam tanto o seu nível de reservas quanto à sua participação na produção mundial:

Gráfico 4 - Reservas e Produção Mundiais dos ETR em 2019 (países declarantes)



Fonte: Elaboração própria, com base em USGS (2020: 133).

Assim, observa-se que o Brasil não representa nem 0,5% da produção mundial, assim como o Vietnã (seu companheiro de posição). Entretanto, tal situação contrasta-se com a da economia chinesa, que mesmo possuindo o dobro de reservas dentro de seu território, representa mais da metade da produção mundial, detendo mais de 60% dos direitos de extração dos ETR dentro e fora de seu território.

Com base nessas evidências, as subseções seguintes abordarão: a ocorrência das TR no Brasil, bem como as políticas de extração por trás delas, entre outras particularidades.

2.1. A concentração e o mercado das TR no Brasil

Filho et al. (2019: 7) destacam a atual disposição do Brasil em possuir diferentes tipos de depósitos de TR, estimadas em, aproximadamente 22 milhões de toneladas. Tal concentração de TR distribui-se em torno de minerais em processamento não estabelecido ou consideravelmente complexo. Suas principais reservas compreendem: “minerais alcalinos intrusivos, carbonatitos, depósitos lateríticos, fluviais e costeiros” (GUPTA E KRISHNAMURTHY, 2005). Filho et al. (2019: 7) frisam também que, dentre os principais minerais de TR (já abordados no capítulo

anterior), o que apresenta a maior facilidade de prospecção e processamento é a monazita, estando a ela relacionados os primórdios da exploração de TR no país.

Todavia, a prospecção da monazita no Brasil inicialmente encontrava-se sempre voltada à exploração de dois elementos químicos nela presentes que não compreendem a série dos ETR, mas a dos actinídeos: o “tório (Th, Z = 90) e o urânio (U, Z = 92)” (FILHO ET AL., 2019: 8).

Assim sendo, Filho et al. (2019) pontuam que o início da exploração das TR no Brasil se dá enfaticamente na década de 1880, com a “retirada das areias de Prado, na Bahia” (FILHO ET AL., 2019: 8). Neste sentido, naquela época, as TR conhecidas possuíam aplicações essencialmente limitadas, pelo fato de possuir como centro de interesse a exploração do tório: “Seu uso se concentrava principalmente na fabricação de mantas para lampiões a gás, que haviam sido recentemente desenvolvidas pelo austríaco Carl Auer von Welsbach” (FILHO ET AL., 2019: 8).

De lá para cá, o cenário nacional do mercado de TR mudou significativamente. A extração e comercialização destes elementos no Brasil sofreram intensas mudanças, ao implementar diretrizes que colocaram o Brasil como um ator central no que foi considerado o “emergente mercado de TR no mundo”, no início do século XX:

No início da década de 1900, havia 66 companhias de mineração inglesas possuindo propriedades no Brasil, com um capital estimado em 8.000.000 de libras. Já em 1911, era sabido que os depósitos de monazita se estendiam da Bahia ao norte do Rio de Janeiro, com presenças eventuais no Estado de Minas Gerais, de modo que as concessões governamentais concentravam a exploração dos recursos em duas empresas, o que à época já era considerado um monopólio. Nesse período, já se empregavam plantas de separação nas proximidades do Rio Paraíba do Sul, no Estado do Rio de Janeiro, consistindo em separadores de Wilfley para a separação da sílica comum, bem como separadores de Humboldt para a separação dos componentes magnéticos (FILHO ET AL., 2019: 8).

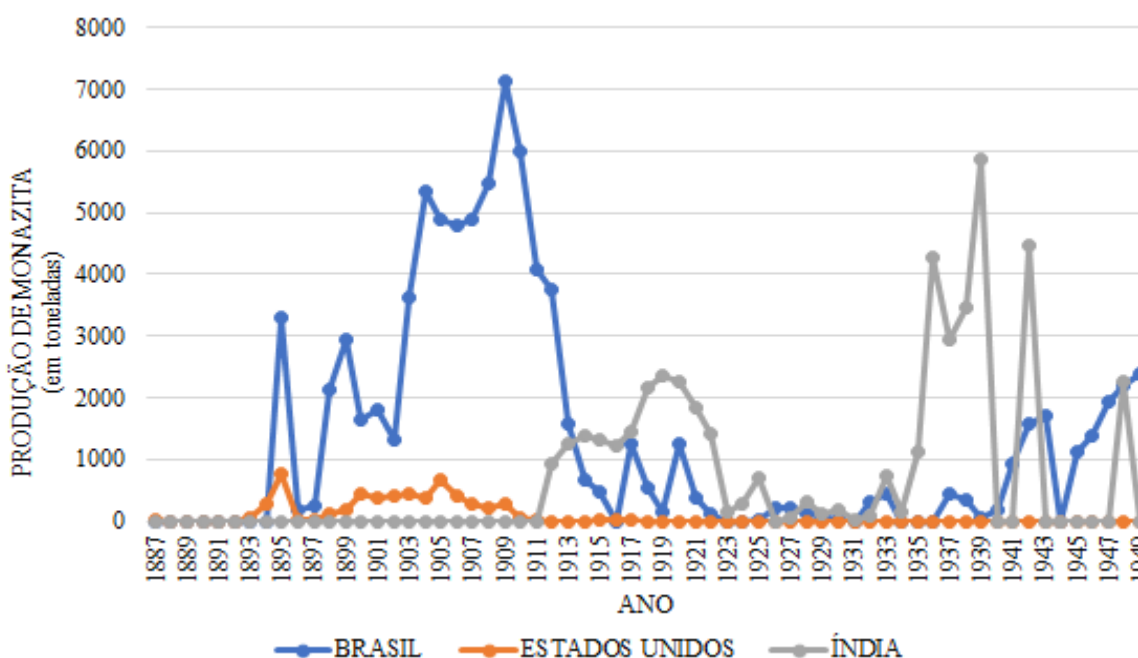
Neste período, a aplicação desses processos corroborava para a concentração dos minerais, encarecendo assim a sua venda e transporte, o que os pesquisadores alemães já estimavam: “que a quantidade de compostos radioativos na monazita brasileira poderia quadruplicar o valor a ela associado” (OVERSTREET, 1967; SANTOS, 2009).

Contudo, a partir da década de 1910, o Brasil deixa de ser o núcleo do comércio mundial de monazita, visto que ocorreram, a partir em então, a descoberta de outros importantes depósitos

ao redor do mundo, a exemplo: Índia, Sri Lanka, África do Sul e Austrália. Já em 1914, o Brasil “perde o posto de maior fornecedor mundial de monazita para a Índia” (FILHO ET AL., 2019: 9).

Assim sendo, a figura a seguir representa essa evolução histórica, da produção de monazita entre o fim do século XIX e a primeira metade do século XX, ilustrando as frações correspondentes à contribuição de Brasil, EUA e Índia no mundo:

Gráfico 5 - Produção de monazita no Brasil, Estados Unidos e Índia (entre 1887 a 1949)



Fonte: Elaboração própria, com base em: Mertie Jr. (1953: 6); Filho et al. (2019: 9).

Vale destacar a ocorrência de dois marcos opostos neste período, para este mercado: o primeiro, ocorrido em 1920, marca o início da utilização de energia elétrica, que provocou uma redução considerável nos volumes de monazita movimentados no mundo. Tal redução estava diretamente ligada “ao advento da iluminação elétrica, que diminuiu drasticamente a demanda pelas mantas incandescentes de lâmpadas a gás” (SERRA ET AL., 2015: 7). O segundo, que ocorre em meados da década de 1930, evidencia o “ressurgimento da exploração de monazita no Brasil e em outros países detentores destes depósitos”, por causa do “crescente interesse com relação ao tório e ao urânio presentes nesse mineral em meio à iminência da 2ª Guerra Mundial” (FILHO ET AL., 2019: 9). Os mesmos serviam de combustíveis nucleares neste período.

Entretanto, a exploração da monazita em termos de produção agregada dos ETR no Brasil sempre foi algo questionável. Em 2013, o CGEE afirmou que o Brasil não lavrava nem produzia nenhum composto de TRs, sendo totalmente dependente da importação, destacando ainda que:

A produção de TRs no Brasil, que já teve posição de destaque na década de 1940, é hoje praticamente nula. No entanto, o país, por suas reservas, teores dos minérios, variedade de depósitos e capacitação tecnológica, apresenta bom potencial para a extração de TRs em jazimentos polimetálicos. No último trimestre de 2010, representantes dos governos do Japão, da Alemanha e da França, em audiências na Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM) do Ministério de Minas e Energia (MME), solicitaram informações sobre o potencial de exploração e produção mineral de TRs no Brasil (CGEE, 2013: 30).

Nesta perspectiva, a subseção seguinte abordará as estratégias brasileiras adotadas para a estruturação de uma agenda com objetivos e ações de curto, médio e longo prazo. Como apontado pelo CGEE (2013), objetiva-se assim a efetividade dos **direcionadores estratégicos** vinculados ao “desenvolvimento das cadeias produtivas de aplicações de TRs consideradas promissoras e estratégicas para o Brasil” (CGEE, 2013: 31).

2.2. Os direcionadores estratégicos desenvolvidos para o Mercado de TR no Brasil

Esta seção levanta a hipótese central deste trabalho. Isto pode ser entendido, uma vez que mesma apresenta uma síntese das “principais iniciativas e os seis direcionadores de políticas públicas”, que objetivaram e ainda objetivam a estruturação do Mercado Brasileiro de TR. Ocorrendo a funcionalidade de tais estratégias para o referido mercado, a exitosa extração de TR representaria, em algum grau, o fomento de um ambiente altamente tecnológico na esfera das cadeias produtivas e industriais, com altos investimentos em P&D.

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) e a Revista *Em Discussão!* do Senado Federal compartilham desta visão. O instituto afirma que os países que possuem uma indústria ativa em tecnologias de transformação de TR “adotam medidas estratégicas”, a exemplo da economia japonesa (INPI, 2016: 5). A revista, neste mesmo pensamento, afirma que:

O Japão, por exemplo, busca o uso de materiais substitutos às terras raras e investiu, desde 2010, mais de um bilhão de dólares neste setor. Outra medida do governo japonês é a diversificação de fornecedores de terras raras, buscando na Índia, Vietnã e Brasil parceiros para reduzir a dependência com relação à China. O Japão observa, ainda, a prioridade estratégica da reciclagem de produtos que contém terras raras. De acordo com essa política, 100% dos ímãs de discos rígidos de computadores são reciclados no Japão (EM DISCUSSÃO!, 2013: 48-49).

Assim sendo, o quadro a seguir elenca os **seis direcionadores estratégicos** de políticas públicas adotados para a estruturação do Mercado Brasileiro de TR:

Quadro 4 - Os seis direcionadores estratégicos adotados no Mercado Brasileiro de TR

- Grupo de Trabalho Interministerial sobre Minerais Estratégicos – GTI-ME Portaria Interministerial MME/MCT nº 614, de 30 de junho de 2010;
- Estudo para implantação de uma cadeia produtiva de ímãs de TRs. ABDI/BMBF-Alemanha, Certi, UFSC/EM, Cetem, IPT, Sociedade Fraunhofer. Cooperação Bilateral Brasil-Alemanha, maio de 2011;
- Edital MCT/CT-Mineral/CNPq nº 44/2010 – apoio à PD&I para cadeia produtiva de TRs e lítio – encerrado;
- Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM 2030) – minerais estratégicos como um dos objetivos do PNM 2030. Lançado em 08 de fevereiro de 2010;
- Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012-2015. Priorizado o Subprograma de PD&I em minerais estratégicos e veículos elétricos;
- Plano Diretor do Cetem: 2011-2015.

Fonte: Elaboração própria, com base em CGEE (2013: 31).

2.2.1. Grupo de Trabalho Interministerial sobre Minerais Estratégicos (GTI-ME)

O Grupo de Trabalho Interministerial sobre Minerais Estratégicos (GTI-ME _ Portaria Interministerial MME/MCT nº 614, de 30 de junho de 2010) foi criado com o intuito de

elaborar propostas de integração, coordenação e aprimoramento das políticas, diretrizes e ações voltadas para minerais estratégicos, dentre eles minérios e minerais contendo TRs, lítio, rochas e minerais aplicados na agricultura (agrominerais) e outros. Ficou estabelecido que os minérios e minerais nucleares, assim como o petróleo e o gás, não seriam tratados pelo GTI-ME (CGEE, 2013: 31).

Nesta perspectiva, o CGEE (2013) destaca que grupo considerou que as TRs deveriam ser objeto de um programa prioritário e imediato por parte do governo federal. Ademais, indicou

a necessidade de articular as competências existentes no país, dispersas em grupos e centros de pesquisa do setor nuclear, em órgãos militares, universitários, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e do setor privado, para que, alinhados e em conformidade com suas especificidades, participassem desse esforço.

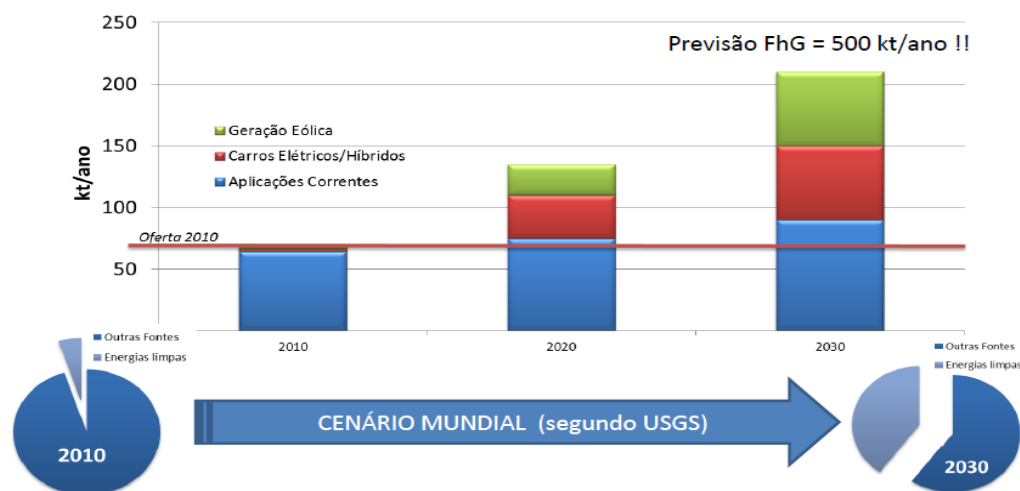
Dentre as suas principais diretrizes, destacam-se:

- Formação de grupos de trabalho para articulação e coordenação das atividades de desenvolvimento do segmento de TRs - MME, MCTI e MDIC;
- Identificação de demanda e integração em projetos inovadores em curso com previsão de grande consumo de TRs, como por exemplo: (i) implementação de uma cadeia produtiva, de inovação e integração industrial, de ímãs de TRs apoiada pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), sob a responsabilidade da Fundação Certi, de Santa Catarina, no contexto da cooperação bilateral Brasil-Alemanha; (ii) MagLev Cobra, da Coppe-UFRJ; e (iii) fabricação de motores elétricos de alto rendimento, das turbinas eólicas, grandes consumidores de TRs - MCTI, MDIC e MME (MME E MCT, 2010).

2.2.2. Estudo para implantação de uma cadeia produtiva de ímãs de TR no Brasil

De acordo com Schneider (2013), o Brasil pode ser considerado um *fornecedor mundial de ímãs e outros produtos de TR*. Nestes termos, o mesmo acorda na criação de uma cadeia produtiva de ímãs de TR no Brasil, uma vez que a demanda mundial por estes elementos tende a crescer significativamente, em especial, para o período 2010-2030, com se observa a seguir:

Figura 7 - Previsão de demandas para ímãs de TR (demanda mundial - “previsão conservadora”)



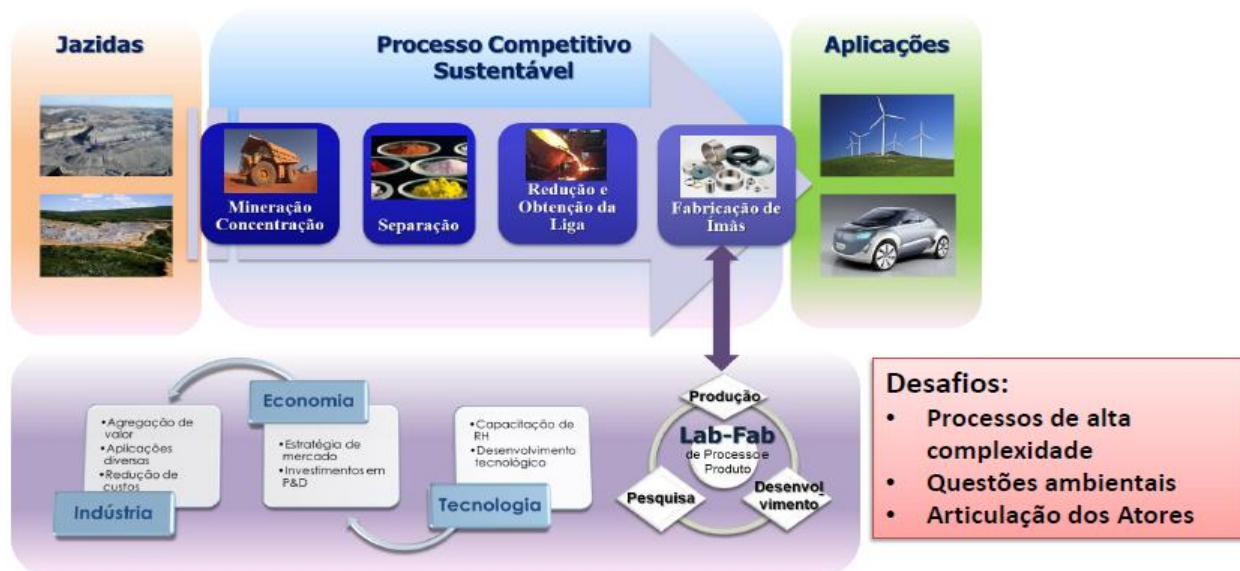
Fonte: SCHNEIDER (2013: 5).

Reforçando este argumento, o CGEE (2013: 33) destaca um estudo realizado acerca da viabilidade da implantação desta cadeia produtiva no Brasil. O referido estudo foi contratado pela ABDI, juntamente com a coordenação brasileira feita pela Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras (CERTI), iniciando-se em agosto de 2010 e concluindo em maio de 2011. O presente estudo contou ainda com apoios tecnológicos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), do Centro de Tecnologia Mineral (Cetem) e do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), bem como de órgãos do governo federal e do setor empresarial. Ademais, o referido estudo contou com a coordenação executiva alemã do Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (FhG-IFAM). Assim,

o estudo mostrou que é factível implementar no Brasil uma cadeia produtiva de ímãs de TRs e produtos correlatos de forma competitiva (preço, qualidade e inovação) e sustentável (econômica, social e ambiental). Para alcance dessa visão, propôs um conjunto de 15 proposições de ações estruturantes, apontando, no entanto, a necessidade de uma gestão estratégica, suportada por políticas públicas, em função da multiplicidade de esforços necessários, concessões, autorizações e atores a serem engajados (CGEE, 2013: 33).

Em consonância a este estudo, SCHNEIDER (2013) esquematiza, a seguir, o ideal desenvolvimento das competências em toda a cadeia produtiva de ímãs de TR no Brasil:

Figura 8 - Cadeia produtiva de ímãs de TR no Brasil e suas respectivas competências



Fonte: SCHNEIDER (2013: 8).

2.2.3. Apoio à PD&I para cadeia produtiva de TRs e lítio (encerrado)

Com perspectivas em avançar nas áreas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), o governo brasileiro lançou, em 8 de dezembro de 2010, o Edital MCT/CT-Mineral/CNPq n° 44/2010, de apoio à PD&I para cadeia produtiva de TR e lítio. O edital foi lançado com o intuito de “apoiar atividades de pesquisa científica, tecnológica e de inovação e de capacitação de recursos humanos mediante a seleção de propostas para apoio financeiro a projetos nos temas prioritários do Projeto Tendências Tecnológicas do Setor Mineral e Tecnologias para Arranjos Produtivos Locais de Base Mineral” (CGEE, 2013: 33). As inscrições ocorreram de 08/12/2010 a 31/01/2011.

Todavia, o principal entrave do Brasil para a viabilidade e real implementação destes projetos aprovados ainda é a *tecnologia*:

Para tanto, o principal **desafio tecnológico** é o desenvolvimento e domínio de tecnologias e inovações que possibilitem, a partir de concentrados de minérios de elementos terras-raras do Brasil, produzir óxidos, metais e ligas para serem utilizados em produtos de alta tecnologia, propiciando a implantação e desenvolvimento integral da cadeia produtiva de terras-raras no Brasil (MCTIC, 2018: 22).

Dessa forma, o quadro a seguir sintetiza as principais diretrizes adotadas para PD&I na cadeia produtiva de TR no Brasil, a partir do referido edital:

Quadro 5 - Diretrizes adotadas para PD&I na cadeia produtiva de TR no Brasil

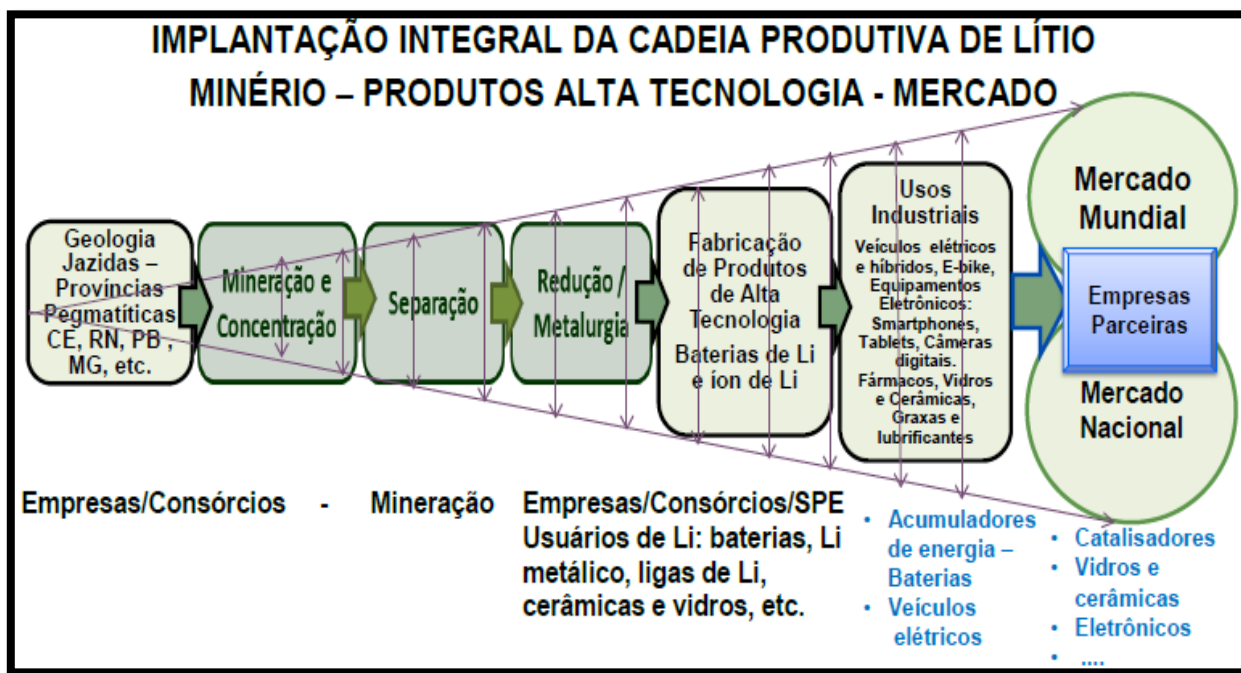
DESAFIO – Meta e Ações

Meta 1 – Desenvolver tecnologias e inovações para produção e aplicação de elementos terras-raras em produtos de alta tecnologia	
AÇÕES	
1	Apoiar projetos de PD&I relacionados a materiais de referência, processos para produção, uso, aplicação em produtos de alta tecnologia, mineração urbana, avaliação do ciclo de vida e ao desenvolvimento da economia circular de elementos terras-raras.
2	Ampliar a composição e atuação de INCT dedicado ao processamento e aplicações de ímãs de terras-raras para indústria de alta tecnologia.
3	Promover projetos de PD&I para o desenvolvimento e fabricação de ímãs de terras-raras em escala piloto e industrial.
4	Ampliar o apoio aos projetos no âmbito da cooperação Brasil-Alemanha que promovam a fabricação de produtos de alta tecnologia a partir de concentrados de terras-raras nacionais.
5	Criar Grupo de Trabalho para planejamento, coordenação, integração, acompanhamento e avaliação das ações, projetos e atividades em PD&I para o desenvolvimento integral da cadeia produtiva de ETR.

Fonte: MCTIC (2018: 23).

Em paralelo às diretrizes em PD&I adotadas para a cadeia produtiva de TR no Brasil, a parceria CETEM/MCTIC (2018), apresenta algumas estratégias adotadas também para o lítio, como se observa no diagrama a seguir:

Figura 9 - Diretrizes adotadas para a cadeia produtiva de lítio no Brasil



Fonte: CETEM/MCTIC (2018: 8).

Com base neste diagrama, os principais objetivos perseguidos com a adoção destas estratégias encontram-se elencados, no quadro a seguir:

Quadro 6 - Principais objetivos na implantação da cadeia produtiva de lítio no Brasil

- I) **Domínio tecnológico** de processos, produtos, bens e serviços para toda cadeia;
- II) **Capacitação tecnológica** (infraestrutura para PD&I e formação de pessoas);
- III) **Agregação de valor e adensamento produtivo** com desenvolvimento de fornecedores de bens e serviços para todos os elos da cadeia;
- IV) Estratégico: **novo modelo de desenvolvimento do setor mineral** e base de **nova industrialização**.

Fonte: Elaboração própria, com base em CETEM/MCTIC (2018: 8).

2.2.4. Plano Nacional de Mineração (PNM, 2030)

O Plano Nacional de Mineração (PNM), proposto para ser implementado até 2030, também contempla a política para a produção e exploração de TR.

Apesar das prematuras estratégias de coordenação adotadas pelo Governo Federal no mercado de TR, o INPI (2016) destaca o esforço do Estado Brasileiro para a incorporação deste novo nicho de mercado por parte do PNM 2030: “O Governo brasileiro reconhece a importância das terras raras. Destarte, o Plano Nacional de Mineração 2030, PNM 2030, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, MME, visa apresentar diretrizes gerais para formulação de políticas e planejamento dos setores energético e mineral” (INPI, 2016: 6).

Neste sentido, o relatório do PNM 2030 (2011) denomina as **TR como materiais portadores do futuro**, isto é, “minerais que crescerão em importância por sua aplicação em produtos de alto valor tecnológico e por sua utilização em áreas relativas a “tecnologias verdes”” (PNM 2030, 2011: 64).

Por fim, o relatório do PNM 2030 descreve a importância das TR não só para a consolidação do desenvolvimento do país e de sua soberania nacional, mas também da dependência de importação pelos demais países (especialmente os desenvolvidos) que não possuem tal recurso. A partir disto, o relatório destaca as estratégias que podem ser adotadas:

A produção mundial desses minerais se dá em quantidades da ordem de dezenas de milhares de toneladas, com alto valor unitário. A estratégia aqui não deve se limitar à descoberta e produção destes bens minerais no País. **Os países desenvolvidos desprovidos desses recursos minerais os importam em bruto ou beneficiado e, após processamento, fazem uso deles em produtos de alta tecnologia.** A estratégia preconizada vai muito além, com a necessidade de programas específicos coordenados entre governo e setor privado para o desenvolvimento de processos e produtos em cadeias produtivas de alto valor agregado, eventualmente atuando em determinados nichos, e um ambiente de intensa competitividade internacional. **É neste contexto que os importantes recursos identificados de terras-raras no Brasil, com teores e reservas elevados, deverão merecer uma atenção muito especial e a implantação de um amplo programa de PD&I.** Lembra-se que o Brasil já produziu terras-raras a partir de monazita, que era processada quimicamente para a produção de óxidos de terras-raras. **As terras-raras são cada vez mais aplicadas nas indústrias de alta tecnologia, como é caso da ‘energia verde’ (turbinas eólicas e células foto voltaicas), carros híbridos elétricos, ímãs permanentes de alto rendimento, supercondutores, luminóforos e na comunicação à distância.** No caso dos minerais radioativos, a demanda nacional nos próximos 20 anos exigirá que sejam também destacadas ações na sua cadeia produtiva para que o Brasil continue exercendo controle em todas as fases dessa indústria tão importante (PNM 2030, 2011: 64).

Assim, o quadro a seguir sintetiza as principais diretrizes a serem adotadas pelo PNM 2030, favoráveis à extração das TR e a consolidação deste mercado no Brasil:

Quadro 7 - Diretrizes adotadas pelo PNM 2030 para o Mercado Brasileiro de TR

Plano Nacional de Mineração 2030
Objetivo Estratégico: "...5.3 – Estabelece Diretrizes para Minerais Estratégicos"

Ações:

- 1) Realização de levantamento geológico pela CPRM de áreas potenciais para minerais estratégicos carentes e portadores de futuro;
- 2) Apoio à pesquisa mineral e ao fomento para abertura de novas minas em áreas com presença de potássio fosfato e minerais portadores de futuro;
- 3) Promoção de estudos das cadeias produtivas desses minerais, visando à agregação de valor com competitividade nos seus diversos elos;
- 4) Articulação do MME com o MCTI para desenvolver estudos geológicos com o objetivo de ampliar as reservas de urânio do país;
- 5) Criação de grupos de trabalho para acompanhamento de bens minerais estratégicos com enfoque para as oportunidades e ameaças do mercado internacional;
- 6) Articulação interministerial com o setor produtivo para elaboração de programas de longo prazo voltados aos minerais portadores de futuro, objetivando a interação entre ICTs e empresas para a identificação de nichos competitivos de atuação.

Fonte: CGEE (2013: 34).

2.2.5. Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (2012-2015)

Pode-se afirmar que o MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações e Comunicações (anteriormente denominado MCTI), atuou com o MME para a definição de ações com o intuito de garantir o desenvolvimento da cadeia produtiva de minerais estratégicos para o país como as TR, o lítio, o silício e os agrominerais. Tal conjunto de ações ficou definido como a "Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012-2015" (CGEE, 2013: 35).

Nesta perspectiva, as principais diretrizes propostas e/ou realizadas pelo MCTIC em conjunto com o MME, para o referido período, foram:

Quadro 8 - Diretrizes da Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012-2015 envolvendo o Mercado Brasileiro de TR

- *MCTI: priorizou o apoio ao desenvolvimento da cadeia produtiva de TR no Brasil, desde a produção de óxidos até a sua aplicação em componentes de produtos de alta tecnologia;*
- *Continuidade do programa do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS), e do programa do Satélite Geoestacionário de Comunicações (SGDC);*
- *Em relação ao CBERS: definiu para 2012 e 2014 o lançamento dos próximos satélites do programa;*
- *O projeto do SGDC: intui ser utilizado para o fornecimento de serviços de banda larga, comunicações militares seguras e de informações sobre meteorologia e controle de tráfego aéreo, e contará com a participação de uma empresa nacional;*
- *Na área nuclear: execução do projeto de monitoração dos indicadores de segurança das usinas nucleares da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA), permitindo que a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) responda de maneira objetiva as situações de acidente radiológico que possam ocasionar emissão de radioatividade para o meio ambiente.*

Fonte: Elaboração própria, com base em MCTI (2012: 15-16).

2.2.6. Novo Marco Regulatório da Mineração (2012)

Ainda de acordo com o CGEE (2013), a Comissão de Ciência, Tecnologia, Inovação, Comunicação e Informática (CCT) do Senado estudou criar uma legislação específica para a exploração de TR e outros minérios considerados estratégicos.

Assim, criou-se, em 2012, a Subcomissão Temporária de Elaboração do Projeto de Lei do Marco Regulatório da Mineração e da Exploração de Terras Raras no Brasil - CCTSTTR, objetivando “elaborar um anteprojeto de lei, no intuito de estabelecer o marco regulatório da mineração de TR no Brasil, e demais processos que as transformem em produtos de valor agregado, promovendo uma cadeia produtiva para os metais estratégicos” (SENADO FEDERAL, 2012: 2). A partir deste novo marco, seria possível estabelecer as estratégias de consolidação da cadeia produtiva de TR no Brasil para os anos seguintes.

2.2.7. Um adendo: os desafios tecnológicos para Terras Raras (2018-2022)

A fim de realizar um panorama do que de fato havia sido feito com base nesses seis direcionadores estratégicos ao longo dos anos seguintes, o MCTIC elaborou um novo plano: o Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Minerais Estratégicos 2018-2022.

No referido plano, o MCTIC ressalta as diversas ações empreendidas neste período, no sentido de apoiar o desenvolvimento da cadeia produtiva de TR no Brasil. Ademais, menciona os avanços significativos na retomada das pesquisas e da produção desses elementos no país.

Em síntese, o quadro a seguir sintetiza os avanços e retrocessos da cadeia produtiva de TR no Brasil, com base nos direcionadores estratégicos anteriormente citados, bem como as estratégias adotadas para este mercado, para o período de 2018 a 2022, ressaltando a **iniciativa 4**:

Quadro 9 - Desafios Tecnológicos e Iniciativas para as TR no Brasil (2018-2022)

Desafio Tecnológico Específico	
Dominar as tecnologias e promover a inovação para a mineração e transformação mineral na produção de óxidos, metais e ligas de terras-raras para aplicação em produtos de alta tecnologia.	
Eixos Temáticos	Iniciativas
PD&I	<ol style="list-style-type: none"> 1. Apoiar até 15 (quinze) projetos PD&I relacionados a materiais de referência, processos para produção, uso, aplicação em produtos de alta tecnologia e economia circular de elementos terras-raras. 2. Ampliar a composição, atuação e os recursos do INCT PATRIA – Instituto Nacional de C&T dedicado ao processamento e aplicações de ímãs de terras-raras para Indústria de Alta Tecnologia. 3. Promover projetos de PD&I em parceria com o Laboratório Fábrica de Ímãs de Terras-Raras (LabFab). 4. Integrar as ações de PD&I em Terras-Raras com programas governamentais e projetos nas áreas de mobilidade, energias renováveis, indústria 4.0 e tecnologias de informação e comunicação – TIC.
Capacitação Laboratorial	5. Apoiar a capacitação da infraestrutura analítica de até 05 (cinco) laboratórios para atuação em terras-raras visando compor a Rede de Ensaios e Análises Mineraias.
Capacitação e Formação de Recursos Humanos	6. Apoiar a formação e capacitação de recursos humanos por meio da concessão de até 40 (quarenta) bolsas de pesquisa no Brasil e exterior.
Projetos Cooperativos	7. Promover 5 (cinco) projetos cooperativos (ICT e empresas) em minerais estratégicos visando à agregação de valor para terras-raras.
Prospecção e Divulgação Científica e Tecnológica	8. Apoio à promoção de 02 (dois) eventos técnico-científicos na área de terras-raras.
Cooperação Internacional	9. Ampliar o apoio e os recursos destinados aos projetos no âmbito da cooperação Brasil-Alemanha, em especial o projeto <i>Rare Earth Global Industry and New Application (REGINA)</i> .
Políticas e Programas	10. Criar Grupo de Trabalho para planejamento, coordenação, integração, acompanhamento e avaliação das ações, projetos e atividades em PD&I para o desenvolvimento integral da cadeia produtiva de ETR.

Fonte: MCTIC, Minuta (2018: 15).

Com base no exposto, observa-se que o desenvolvimento do Mercado de TR apresenta as características do que a literatura econômica denomina de *Quarta Revolução Industrial, ou simplesmente, Indústria 4.0*. O aprofundamento de tal conceito será o tema da seção seguinte.

CAPÍTULO 3. A INDÚSTRIA 4.0

O tema *industrialização* sempre se mostrou recorrente na literatura econômica, pela compreensão de ser um dos fatores a corroborar para o crescimento e posterior desenvolvimento de uma economia. Especialmente este último, apresenta distintas concepções para a sua ocorrência, geralmente vinculadas à questão da industrialização. Sob esta ótica, a industrialização representaria um componente a contribuir para o processo de desenvolvimento econômico. Neste sentido, compreender a priori o que seria um processo de desenvolvimento econômico, permitirá entender o papel da industrialização neste processo, bem como a mesma precisa apresentar-se.

Assim sendo, muitos foram, e são, até hoje, as definições do que seria o *Desenvolvimento Econômico* de uma nação, que preponderantemente, passa pela intervenção estatal. Neste sentido, alguns teóricos acreditam que, apesar de suas inúmeras fragilidades e desafios, o Estado represente a força motriz que impulsiona o processo de desenvolvimento de uma nação. Alice Amsden, Chalmers Johnson, Ha-Joon Chang, Peter Evans, Ricardo Bielschowsky e Robert Wade acreditam que o processo de desenvolvimento traduz-se em um Estado Desenvolvimentista, onde a sua atuação seria ao mesmo tempo causa e consequência do surgimento e desenrolar deste processo.

Para Bielschowsky (2012), o Estado atuando como agente transformador e causal deste processo, seria o único capaz de promover uma industrialização e essa, seria a única via de superação do atraso, subdesenvolvimento e pobreza de um país, de uma sociedade. Assim, Bielschowsky acredita que as forças de mercado seriam incapazes de promover o processo de industrialização, atribuindo, portanto, tal tarefa somente ao Estado. Ainda em sua visão, o Estado, através de um planejamento consistente, seria responsável por selecionar setores, aos quais promoveria sua própria expansão ao longo deste intenso processo.

Compartilhando desta ideia, Wade (2010) acredita que o Estado necessite, através de um planejamento forte, formular uma estratégia de desenvolvimento não só produtivo, mas para além da produção, construir um projeto nacional para a acumulação de capital no próprio país. Ademais, Wade crê ser necessário haver seletividade territorial e que, assim como Schumpeter (1982) aborda, aquisição e desenvolvimento de tecnologia de ponta são essenciais para este processo.

Neste entendimento, Wade lança mão de um item essencial para o processo de desenvolvimento de um país: *a tecnologia*. Para o autor, a promoção dos progressos tecnológico e científico aliados ao processo produtivo de um país com soberania nacional, são os princípios

para o estímulo do desenvolvimento de uma economia. Neste caso, lançariam-se as bases para a construção de uma economia sólida, fomentando, em última instância, a formação de empresas pautadas na competitividade, lançando-se para o comércio exterior.

Evans (1993) aproxima-se de Wade, ao acrescentar a este raciocínio a compreensão de que a industrialização seria uma das bases para o desenvolvimento de uma economia. Isto ocorre por Evans acreditar que a industrialização precisa ser impulsionada por uma política de intervenção estatal definida, pautada em canais institucionalizados, a fim de que os mesmos negociem objetivos e políticas não só com agentes estatais, mas também com participação privada e demais segmentos da sociedade. Tais medidas garantiriam um Estado autônomo e inserido na população. As abordagens de Evans também vão ao encontro do que Jhonson (1999) defende, por enfatizar a necessidade da intervenção estatal, por meio de políticas conscientes e consistentes que colocam o desenvolvimento econômico como principal meta a ser alcançada.

Já sob o olhar de Amsden (1992), apesar do Estado ser o promotor do desenvolvimento econômico ao nortear os princípios da industrialização, a iniciativa privada também mostra-se necessária para a consolidação deste processo. Por isto, do seu ponto de vista, o Estado necessita basear-se em dois fundamentos para o fomento da industrialização e alcance do desenvolvimento econômico: a) o Estado precisa tornar as indústrias lucrativas, atraindo capitais privados; b) o Estado precisa induzir as empresas privadas a compartilharem seus lucros com parte da população, promovendo assim uma distribuição de renda mais equânime.

Neste pensamento, Amsden acredita que, para que uma economia consiga desenvolver-se solidamente, é necessário que parte da riqueza gerada na industrialização seja distribuída o mais equânime possível entre todos os agentes. Por conseguinte, o desenvolvimento trata-se de um processo benéfico e ao mesmo tempo conflituoso, ao nortear todos os segmentos econômicos e sociais, e demandando algo essencial: cooperação por parte de todos os agentes envolvidos.

Sob este prisma, Chang (2004) defende um gerenciamento dos atos, principalmente os realizados pela iniciativa privada, a fim de que a mesma seja estimulada a realizar financiamentos e investimentos. Para Chang, o desenvolvimento de uma economia passa por diversos segmentos, classes, estes representados pela esfera estatal. Logo, necessita-se da criação de órgãos capazes de gerir e minimizar possíveis conflitos destas classes, visto que o processo de desenvolvimento é, essencialmente, conflituoso, com ganhos para alguns, e perdas para outros.

Em síntese, a concepção a seguir de “Desenvolvimentismo” traduz todas essas visões:

Entende-se por desenvolvimentismo a política econômica formulada e/ou executada, de forma deliberada, por governos (nacionais ou subnacionais) para, através do crescimento da produção e da produtividade, sob a liderança do setor industrial, transformar a sociedade com vistas a alcançar fins desejáveis, destacadamente a superação de seus problemas econômicos e sociais, dentro dos marcos institucionais do sistema capitalista. (IPEA, 2015: 40).

Neste conceito, percebe-se o dinamismo e a interdependência entre as instituições, ações e sistemas que dão sentido à lógica do processo de desenvolvimento econômico. Neste pensamento, a industrialização passa pela administração Estatal, que por sua vez necessita realizar uma interferência capaz de implementar um projeto nacional, viabilizando assim a promoção e a dinâmica de crescimento e desenvolvimento econômico de uma dada economia.

Neste caso, o Estado tomaria suas decisões e traçaria suas estratégias, alicerçado neste “tripé central”: **Intervencionismo, Projeto Nacional e Industrialização**. Seria o que o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA (2015: 12), denominou de *Núcleo Comum Principal*.

Todavia, este tripé central traduz-se em um ciclo virtuoso de um desenvolvimento econômico sustentável, à medida que a industrialização é induzida à diversificação, atingindo todos os segmentos econômicos e desenvolvendo-os. Tal processo necessita ser coordenado por este intervencionismo estatal, implementando o projeto nacional. Neste sentido, se estas três esferas não estiverem coerentemente aneladas, ocorrerá o processo inverso e essencialmente retrógrado observado por Reis (2016), de “reprimarização” da economia.

Seu raciocínio fomenta a discussão sobre a relação entre os efeitos de encadeamento e a diversificação industrial comercial e produtiva em economias em desenvolvimento, inicialmente especializadas em recursos naturais. Além disso, a autora adverte que a falta de diversificação, oriunda da especialização produtiva da pauta exportadora de alguns países (incluindo o Brasil), culminou em um processo de desindustrialização, manifestado a partir da década de 1990:

A temática da especialização produtiva e exportadora em bens primários voltou ao debate em economia após a escalada da demanda e de preços desde os anos noventa. Diversos países periféricos verificaram reprimarização da pauta de exportações e desindustrialização, inclusive o Brasil (REIS, 2016: 52).

Tal processo se prolongou, sendo ainda observado na segunda década do século XXI, demonstrado que, mesmo com as mudanças no contexto internacional do pós-guerra, as discussões estruturalistas cepalinas mostram-se recentes, no ambiente econômico. Reis (2016) aponta para a direção de que, somente com a diversificação industrial, é possível alcançar um desenvolvimento econômico sustentável, de médio a longo prazo:

Já na segunda década do século XXI, os preços de diversas commodities passaram a cair, evidenciando a vulnerabilidade que a reprimarização causou naquelas economias. A visão estruturalista desde os anos cinquenta alerta quanto à necessidade da diversificação industrial para alcançar trajetórias sustentadas de desenvolvimento econômico, através de mecanismos diversos, incluindo os efeitos de encadeamento. Mesmo considerando as mudanças políticas, econômicas e sociais desde o pós-guerra, especialmente a partir da consolidação nos anos oitenta do padrão financeiro internacional do dólar-flexível, permanecem as principais inquietudes das teorias estruturalistas da tradição cepalina associadas às desigualdades geradas pela divisão internacional do trabalho (REIS, 2016: 52).

Seria na diversificação industrial apontada por Reis (2016) a geração do “rompimento” com as desigualdades geradas pela Divisão Internacional do Trabalho. Esta percepção da autora coaduna com o pensamento proposto por Medeiros e Trebat (2017) acerca, especificamente, do processo de diversificação industrial chinês, no Mercado de Terras Raras.

Medeiros e Trebat (2017) argumentam que o desenvolvimento da indústria de Terras Raras da China advém do papel das iniciativas estatais, na transição deste país de exportador de Terras Raras para grande consumidor industrial dessas matérias-primas. Nessa visão, a China adota a mesma postura das potências industriais do passado, ao se “aproveitar de suas reservas de matérias-primas estratégicas, disponíveis em grande quantidade e a baixo custo de produção no território chinês, para a promoção de setores de maior valor agregado” (MEDEIROS E TREBAT, 2017: 504). Seria neste ponto que os autores convergem para o pensamento de Reis (2016):

Argumentamos que, no caso de terras raras, esta estratégia tem sido bem-sucedida, rompendo com uma divisão internacional clássica do trabalho que existia antes de 2000, em que a China exportava a maior parte de sua produção de terras raras para países ricos, e transformando as empresas chinesas em exportadores a jusante de produtos mais sofisticados (MEDEIROS E TREBAT, 2017: 504).

Necessita-se aqui frisar que nem Medeiros e Trebat (2017) nem Reis (2016) são contrários ao processo de exportação de recursos naturais como uma tentativa de estímulo inicial

à industrialização. Reis, a priori (em 2012), enfatiza a importância deste mecanismo inicial como fonte de estímulos à industrialização, observando a “diversificação produtiva e exportadora em economias que iniciaram sua inserção internacional pelas exportações de recursos naturais” (REIS 2012: 14). Ou seja, admite-se, sem impedimento algum, partir deste princípio.

Neste sentido, a questão não seria uma crítica a inserção internacional por meio da adoção inicial de diversificar-se a partir da exportação de recursos naturais, mas sim a PERMANÊNCIA neste tipo de diversificação, sem promover avanços para uma diversificação fomentadora de indústrias com produtos de maior valor agregado (com incrementos tecnológicos). Esta mudança de postura, rumo à uma diversificação industrial com maior valor agregado, retoma à questão inicial da atuação das instituições geridas pelo Estado, por meio de um estruturado Plano Nacional:

O sucesso ou fracasso econômico tem sido explicado pelo papel desempenhado pelas instituições. Esta abordagem tem sido particularmente aplicada às experiências nacionais onde recursos naturais são abundantes e formam as suas principais fontes de exportação. Argumenta-se que os países podem escapar desta “**armadilha das commodities**” associada à abundância de recursos se boas instituições puderem transformar este ativo natural em uma oportunidade para promover investimentos e difundir o desenvolvimento por outras áreas e setores (MEDEIROS, 2013: 143).

Assim, reafirma-se o claro consenso de que a industrialização, bem coordenada com os demais elementos do Núcleo Comum Principal, induz ao processo de desenvolvimento econômico. Todavia, a questão que se coloca, seria: se todas as economias possuem tal consenso, por que nem todas ainda atingiram tal estágio de desenvolvimento? A resposta também apresenta-se simples: *a sofisticação da própria industrialização é que corroboraria para os distintos graus e impactos dos desempenhos dos processos de desenvolvimento das economias.*

Sob esta ótica, a subseção seguinte parte da seguinte premissa: é inquestionável que uma economia que deseja atingir o seu desenvolvimento econômico já tenha passado pelos três primeiros estágios da Revoluções Industrial ocorridos no processo de industrialização ao longo da história, ou seja: a 1ª, 2ª, e 3ª Revolução Industrial já aconteceram nesta economia.

Partindo deste ponto, admite-se que uma economia que visa alcançar o seu desenvolvimento econômico no mundo intensamente mais globalizado (Século XXI) deseja, em última instância, atingir no mínimo, o último (e ao mesmo tempo consolidado) grau do processo de industrialização: a *Quarta Revolução Industrial*, ou simplesmente, *Indústria 4.0*.

3.1. Mas afinal, o que é a Indústria 4.0?

O termo indústria 4.0 deriva de *industrie 4.0*, sendo criado pela Alemanha no ano de 2011 como uma estratégia de alta tecnologia para o ano de 2020 (ZHOU ET AL., 2015). Por isto, a indústria 4.0 foi pensada como sendo um processo fomentador de ideias que induziriam à competitividade entre as indústrias de determinada economia. Neste sentido, a *quarta revolução industrial - ou simplesmente indústria 4.0*, objetiva, em última instância, oferecer melhorias nos processos industriais, que envolvem: operação, engenharia, planejamento e controle da produção, logística, e análise contínua durante o ciclo de vida de produtos e serviços (QIN ET AL., 2016).

A indústria 4.0 lida com *sistemas cibernético-físicos (CPS) e Internet das Coisas (IoT)*, que levam as fábricas a atingirem um novo patamar de produção. O CPS baseia-se na configuração dinâmica da manufatura. Diferente dos métodos tradicionais de produção, a configuração dinâmica está acima da produção e de processos envolvidos, uma vez que o dinamismo torna o sistema capaz de alterar o projeto inicial do produto a qualquer momento (CHENG ET AL., 2016).

3.2. As fases da Revolução Industrial

Historicamente, as etapas da Revolução Industrial podem ser vistas (até o presente momento) em quatro fases, descritas no quadro a seguir:

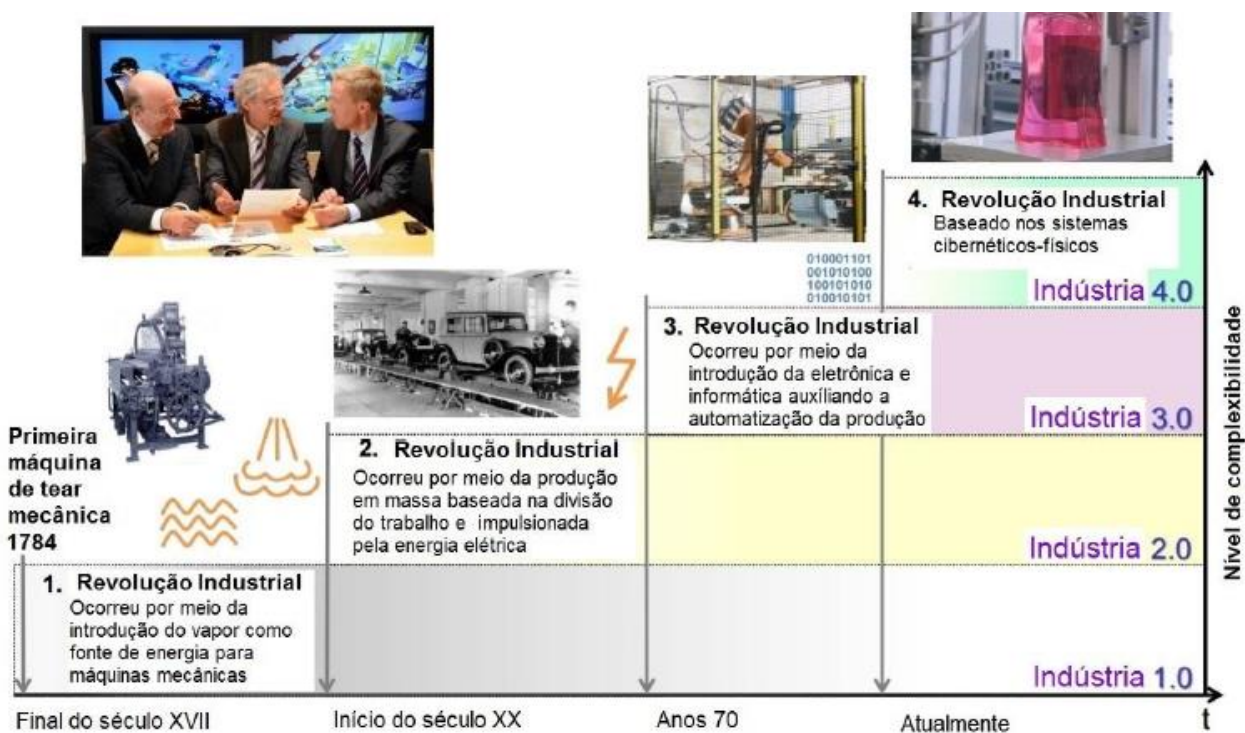
Quadro 10 - As etapas da Revolução Industrial no tempo

- **Primeira Revolução Industrial:** ocorrida no final do século XVIII. Houve o desenvolvimento de máquinas de tear e passou-se a utilizar vapor de água como fonte de energia em máquinas mecânicas;
- **Segunda Revolução Industrial:** iniciada no final do século XIX, atingindo seu ápice no começo do século XX. Contou com a disseminação da produção em massa, criação das linhas de produção e introduziu-se o uso da energia elétrica em fábricas;
- **Terceira Revolução Industrial:** iniciada por volta dos anos de 1970. Explorou-se o uso da eletrônica e tecnologia da informação para a automação da produção;
- **Quarta Geração Industrial:** é a presenciada na atualidade. A indústria 4.0 apresenta um nível complexo de aplicação de novas tecnologias que permitem a comunicação, integração e o controle de informações industriais de diferentes naturezas por meio dos CPS.

Fonte: Elaboração própria, com base em Silva (2017: 12).

Os contextos evolutivos de cada uma destas etapas podem ser vistos na figura a seguir. Observa-se que cada uma destas etapas encontram-se cada vez mais aliadas a um ascendente nível de complexidade na produção, este, cada vez menos dependente da mão de obra humana:

Figura 10 - Contexto de evolução das revoluções industriais



Fonte: Silva (2017: 11), apud Wahlster (2016: 4).

Cabe aqui salientar que a indústria 4.0 ainda pode ser vista como uma realidade essencialmente conceitual, por se tratar de um processo que ainda se encontra em estágio de concretização. Neste sentido, a mesma possui etapas que ainda não foram concluídas; muitas nem se quer se iniciaram: “contudo, o estado da arte de algumas tecnologias propostas pela indústria 4.0 ainda está no futuro” (SILVA, 2017: 14). Assim, como qualquer “revolução”, a indústria 4.0 trata-se de um processo de médio a longo prazo.

Nesta perspectiva, Etzkowitz (2009) e Silva (2017: 14) acreditam que as companhias, governos e universidades colaboraram e continuam a colaborar com o intuito de superar os desafios tecnológicos presentes nesta fase do processo de industrialização e desenvolvimento. Ambos destacam ainda que, devido as recentes transformações no setor industrial ao redor do

mundo, “companhias vem buscando novas soluções para melhorar seus vários índices de desempenho industriais e financeiros” (SILVA, 2017: 14). Grande parte dessas mudanças pode ser atribuída à globalização financeira iniciada na virada do século (década de 90 - anos 2000).

A *timeline* a seguir traz um panorama das mudanças promovidas pela indústria 4.0, bem como as que ainda pretende promover, assim como o estágio dessa indústria na atualidade:

Figura 11 - Panorama temporal estimado das mudanças a serem realizadas pela indústria 4.0

2018	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Armazenamento digital para todos	Robôs e serviços	<i>Internet das coisas</i> e para as coisas	Tecnologias implantáveis em seres humanos	Onipresença da computação	Impressão 3D e produtos consumíveis	Carros sem motorista	<i>Bitcoin</i> e o <i>blockchain</i>
		Roupas com internet	<i>Big data</i> para decisões	Impressão 3D e saúde humana	<i>Inteligência Artificial</i> e empregos	Inteligência Artificial e Decisões	
		Impressão 3D e a produção	Novas tecnologias para aprimoramento da visão	Casas com conectividade	Economia Compartilhada	Cidades inteligentes	
			Nossa presença no sistema cibernético				
			Governos e o <i>blockchain</i>				
			Supercomputadores de bolso				

Fonte: World Economic Forum (2015: 6), adaptada.

Observe que algumas etapas já foram executadas antes do tempo previsto. É o caso, por exemplo, do lançamento e circulação da *bitcoin* pelo serviço explorador de moedas virtuais, o *blockchain*. A *bitcoin* é uma criptomoeda, ou seja, atua como uma espécie de “moeda virtual”, um

meio de troca que opera como uma moeda em alguns ambientes, mas não tem todos os atributos da moeda real. Em particular, a moeda virtual não tem status de curso legal em qualquer jurisdição. A orientação aborda a moeda virtual ‘convertível’. Esse tipo de moeda virtual, ou tem um valor equivalente em moeda real, ou atua como um substituto para a moeda real (FINCEN, 2014).

Neste sentido, o que vale aqui destacar em relação à bitcoin seria o fato da mesma ser tratada como a “moeda do ciberespaço” (PIRES, 2017), um dos termos cunhados ao ambiente em que a indústria 4.0 se faz presente. Assim, o raio de alcance da indústria 4.0 ultrapassa as esferas da produção industrial: até no ambiente financeiro esse tipo de indústria tem se mostrado presente.

Pires (2017: 408) ainda acrescenta que a “desregulação financeira produzida pela crise de 2007-2008 influiu no surgimento do projeto de desenvolvimento global de moedas virtuais”. Ou seja: o processo de globalização iniciado no final do século XX culminou, anos mais tarde, em uma crise e posterior desregulação financeira, gerando como subproduto as CGV (Cadeias Globais de Valor). As CGV repartiram as etapas das cadeias produtivas ao redor do mundo, favorecendo ainda mais o fomento da indústria 4.0, como um mecanismo de descentralização das esferas produtiva e financeira das economias no sistema capitalista atual. Assim sendo, as fases de consolidação da indústria 4.0 passa por inovações em todas as esferas, inclusive financeira (como o surgimento da referida criptomoeda).

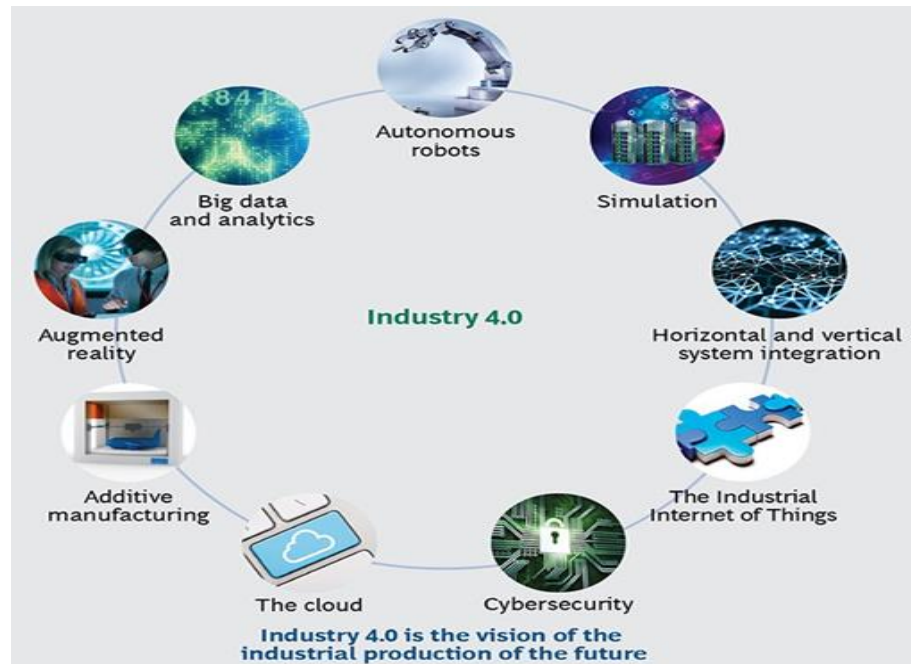
Robôs (como os drones), impressão 3D, inteligência artificial, residências altamente conectadas e sustentáveis também são algumas das etapas antecipadas pela indústria 4.0. Neste sentido, o cumprimento desta “agenda” de atividades, produção e serviços por parte da indústria 4.0 coloca-a como uma fase da Revolução Industrial como um processo irrevogável e irreversível.

A seguir, seguem elencadas as tecnologias que caracterizam a presença da indústria 4.0 em uma dada economia, tecnologias essas que “países como Alemanha, Estados Unidos e China já incluíram em seus planejamentos industriais, com propostas de absorção” (FIRJAN, 2016: 4):

3.3. As tecnologias habilitadoras presentes na Indústria 4.0

Essencialmente, a indústria 4.0 apresenta como principais características: **interconexão de dados, integração e inovação**. Estrutura-se ainda, em nove pilares que no futuro, gerarão oportunidades de desenvolvimento tecnológico no campo industrial (RÜßMANN ET AL., 2015):

Figura 12 - As nove tecnologias habilitadoras presentes na Indústria 4.0



Fonte: BCG, 2015.

3.3.1. Big Data

Surgida na manufatura, a análise de dados em big data pode ser definida como “ativos de informações de alto volume, alta velocidade e/ou alta variedade que exigem formas inovadoras e econômicas de processamento de informações que permitem uma visão aprimorada, tomada de decisões e automação de processos” (GARTNER, 2020).

Com o avanço da manufatura em massa e a alta customização de produtos, as companhias atuarão compartilhando em tempo real uma variedade de dados personalizados da sua cadeia produtiva, ao mesmo tempo em que gerenciam outros dados relevantes. Assim, a big data vem utilizando novos modos de processamento para obtenção rápida de dados importantes de diferentes fontes de informação, como por exemplo: dados de máquinas, operacionais, cadeia produtiva e externos, obtendo assim um “entendimento estruturado capaz de oferecer uma maior precisão para tomada de decisões gerenciais” (ZHOU; LIU; ZHOU, 2015).

Assim sendo, a utilização de dados em big data insere-se no contexto da indústria 4.0 pelo fato deste tipo de indústria “gerar um enorme conjunto de dados de diferentes fontes e naturezas que dificultam a manipulação com algoritmos tradicionais” (SILVA, 2017: 17), fato que faz com

que a big data analítica seja uma das únicas alternativas capaz de “oferecer soluções de manipulação, padronização e transformação de dados industriais” (SILVA, 2017: 17). Ainda segundo Silva (2017), o armazenamento em nuvem é uma tecnologia essencial para a ocorrência do processamento em big data, uma vez que essa não pode ser operada em somente um computador: ela deve usar software como serviço com processamento de dados de forma distribuída, plataforma como serviço, armazenamento em nuvem e infraestrutura como serviço.

Em suma, até o presente momento, a definição exata do termo “big data” encontra-se em fase de amadurecimento, visto que a sua consolidação no ambiente da indústria 4.0 ainda ocorre (não estando finalizada). Nesta perspectiva, o quadro a seguir apresenta as definições mais utilizadas na literatura deste novo elemento que se faz presente no ambiente da indústria 4.0:

Quadro 11 - Definições de Big Data

Mahrt e Scharrow (2013)	Denotam um maior conjunto de dados ao longo do tempo, conjuntos de dados estes que são grandes demais para serem manipulados por infraestruturas de armazenamento e processamento regulares.
Rajesh (2013)	São conjuntos de dados que são tão grandes que se tornam difíceis de trabalhar com o uso de ferramentas atualmente disponíveis.
Brown (2014)	Big data é volume, velocidade, variedade. Então significa que você tem uma ou mais dessas três coisas.
Kim, Trimi e Ji-Hyong (2014)	Trata-se de um termo geral para a enorme quantidade de dados digitais coletados a partir de todos os tipos de fontes.
Lima Júnior (2014)	Big data é conjunto de dados (data set) cujo tamanho está além da habilidade de ferramentas típicas de banco de dados em capturar, gerenciar e analisar.
Davenport (2012) e Kwon (2014)	Dados demasiadamente volumosos ou muito desestruturados para serem gerenciados e analisados através de meios tradicionais.
Guerreiro (2014)	Big Data se refere à necessidade de uma organização lidar com dados que, para serem analisados e gerarem resultados, demandam capacidade muito além daquela de que a empresa dispõe, seja com relação ao volume (mais comum), velocidade de tratamento ou variedade de formatos.
Taurion (2014)	Resumindo o que é big data em uma simples fórmula para conceitualizá-lo: Big Data = volume + variedade + velocidade + veracidade, tudo agregado + valor.
Di Martino et al. (2014)	Refere-se ao conjunto de dados cujo tamanho está além da habilidade de ferramentas típicas de banco de dados em capturar, gerenciar e analisar.

Cavalcanti (2015)	As pessoas, equivocadamente, associam Big Data apenas à grande quantidade de dados digitais hoje disponíveis. Na verdade, a maior riqueza do Big Data vem da variedade (diversidade) de dados. São dados transacionais, das redes sociais, gps... e dos assuntos os mais variados. Costumamos dizer que Big Data está associado a 4 "V"s: volume (quantidade), variedade (diversidade), veracidade (são dados coletados on-line, na hora que estamos fazendo algo; não é uma "pesquisa" onde perguntamos coisas às pessoas) e velocidade (os dados estão imediatamente disponíveis na nuvem).
Costa (2015)	Big data é um ecossistema, que se alimenta e retroalimenta de dados o tempo todo, de dados que estão digitalizados ou não e dos quais se têm a necessidade de tirar valor.
Moura (2015)	Teoricamente é aglutinar diversas informações em diversas fontes em um único depósito. Seria a manutenção, a orientação e o enriquecimento de um banco de dados de diversas fontes. Na prática isso é feito por meio de um depósito seja em nuvem, ou seja, de um depósito próprio que utiliza todas essas informações.

Fonte: Adaptação de ANTONIUTTI (2015: 68); FREITAS JUNIOR ET AL. (2015: 4).

A abordagem acima destacada sintetiza as quatro ações oriundas da implementação da tecnologia big data. Entretanto, outras definições incorporam *o valor* como uma ação essencial ao desenvolvimento desta tecnologia. Assim, a versão mais atual de big data contempla 5 V's:

Quadro 12 - Os 5 V's do Big Data

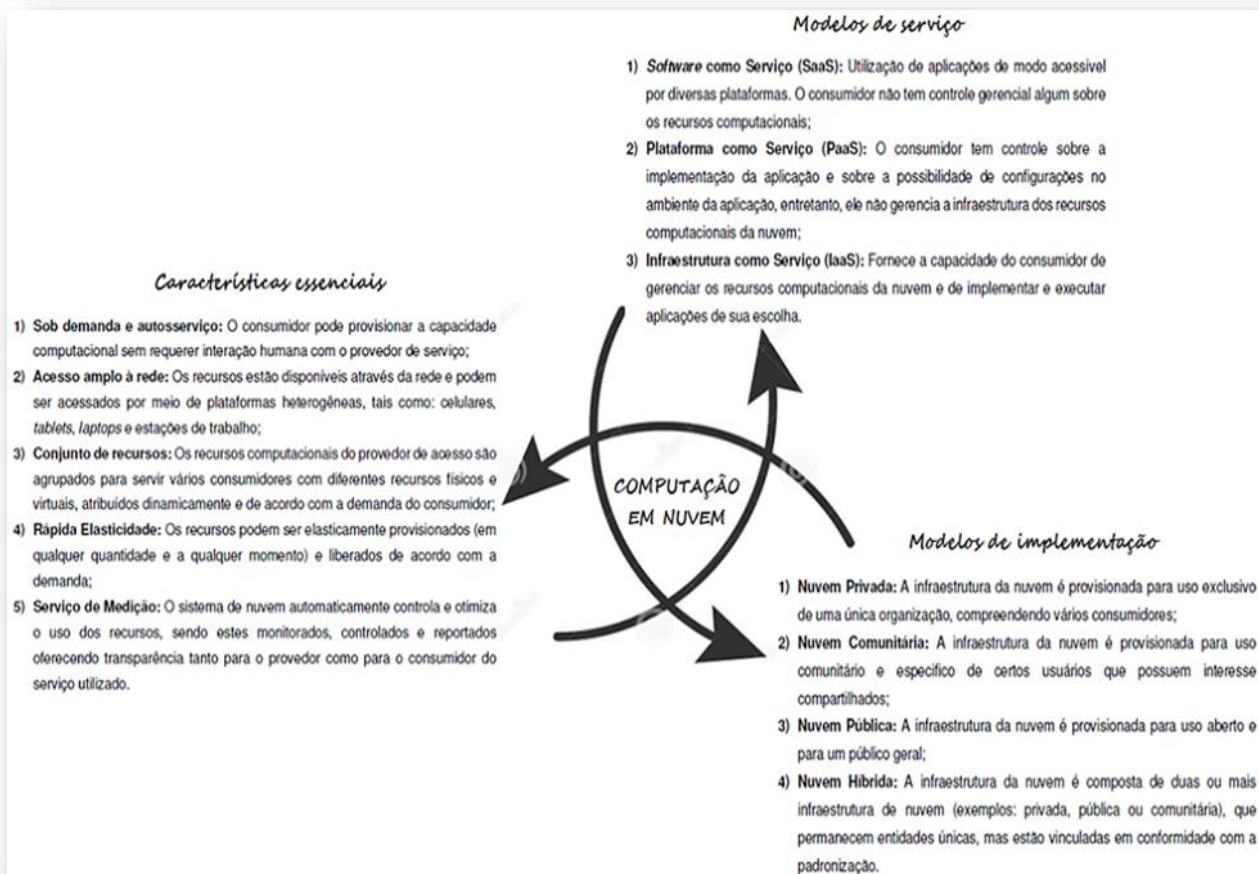
OS 5 V's DO BIG DATA					
	Volume	Velocidade	Valor	Veracidade	Variedade
Atribuições	Capacidade de armazenar grande volume de dados	Habilidade de coleta, transmissão e processamento de dados em tempo real	É necessário estar focado para a orientação do negócio, para o valor que a coleta e análise dos dados trará para o negócio	Detecção do conteúdo de dados para a segurança do sistema	Opera com vasta variedade de informações coletadas de diferentes fontes
Exemplos	Terabytes Registros Transações Tabelas, Arquivos	Lotes Tempo real Processos Transmissão	Estatístico Eventos Correlações Hipóteses	Confiabilidade Autenticidade Origem, Reputação Responsabilidade	Estruturado Não-Estruturado Múltiplas fontes Probabilidade

Fonte: Elaboração própria, com base em Khan et al. (2017) e Gutierrez (2017: 34).

3.3.2. Computação em Nuvem (*Cloud Computing*)

O National Institute of Standards and Technology (NIST, 2011) define computação em nuvem como sendo um modelo que permite acesso ubíquo, vantajoso e sob procura dos recursos compartilhados e configuráveis, que podem ser instantaneamente supridos e liberados com o mínimo de esforço e gerenciamento. A computação em nuvem é composta por três elementos básicos: as **características essenciais** (5), os **modelos de serviço** (3) e os **modelos de implementação** (4). A figura a seguir apresenta as atribuições dadas a estes três elementos básicos:

Figura 13 - Os elementos da Computação em Nuvem



Fonte: Azevedo (2017: 40-41) - adaptada.

Ademais, estudos de aprimoramento deste tipo de ferramenta já utilizam uma nova forma de armazenamento em nuvem ainda mais sofisticada. Seria a chamada **computação em névoa** -

fog computing, que preserva o conceito anterior, porém traz recursos computacionais mais próximos do seu utilizador final. Este aprimorado recurso ainda se encontra em fase de amadurecimento no ambiente da indústria 4.0.

3.3.3. Integração de sistemas vertical e horizontal

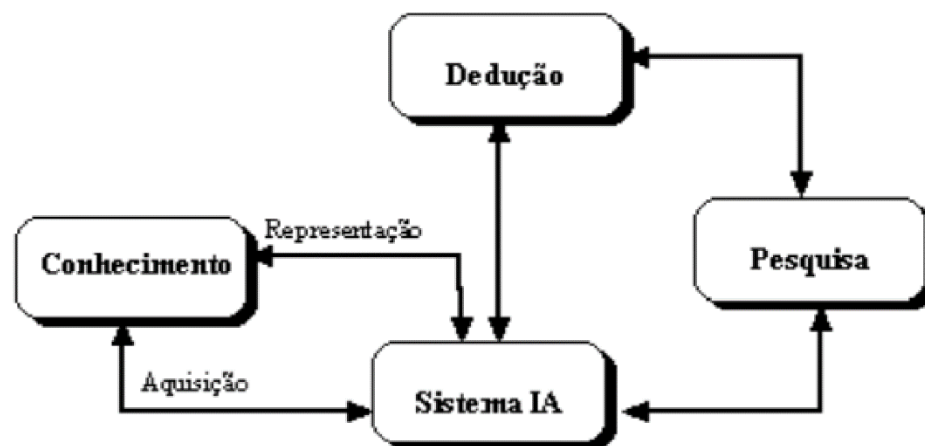
Falcão (2019: 65) define integração vertical com o sendo um conjunto de sistemas flexíveis e reconfiguráveis dentro da planta fabril com o intuito de se integrarem objetivando maior agilidade nos processos industriais. Já a integralização horizontal, trata-se da integração de parceiros na Cadeia de Suprimentos (CS). “A rede industrial coleta os dados (Big Data) e os envia para uma nuvem, criando a estrutura da fábrica inteligente” (RÜBMANN ET AL., 2015).

3.3.4. Inteligência Artificial (IA)

Segundo o Instituto Tércio Pacitti de Aplicações e Pesquisas Computacionais (antigo NCE - Núcleo de Computação Eletrônica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro), a Inteligência Artificial (IA) pode ser entendida como um estudo que objetiva tornar factível a realização de tarefas pelos computadores em nível superior às mesmas realizadas por seres humanos.

A figura a seguir demonstra a inter-relação entre os componentes de um sistema clássico de Inteligência Artificial:

Figura 14 - Sistematização clássica do conceito de Inteligência Artificial



Fonte: SCHUTZER, D., 1987 - adaptada.

A Inteligência Artificial tem sido constantemente utilizada não só para facilitar o dia a dia dos seres humanos, mas para a garantia da qualidade das atividades por eles realizadas, bem como para a otimização da produção nos processos industriais. Neste sentido, a contribuição da IA para o aperfeiçoamento da indústria mais altamente tecnológica (Indústria 4.0) tem sido experimentada por diversas economias. A exemplo, Moraes (2019) afirma que, em termos econômicos,

[...] o potencial da Inteligência Artificial cresceu bastante nos últimos anos, principalmente na economia. A China, país com o segundo maior PIB do mundo, investiu mais de 300 bilhões de dólares em tecnologia no ano de 2017. Não é à toa, já que ela pretende ser o centro de inovação da Inteligência Artificial até 2030 (MORAES, 2019).

Todavia, no caso brasileiro, a pesquisadora argumenta que não se tem muitos investimentos neste campo. Apesar do país se encontrar na dianteira pela busca de se investir nesta área, se comparado aos demais países da América Latina, o Brasil fica muito atrás de países como a já citada China, Estados Unidos, e boa parte da Europa. Talvez, esta falta de significativos investimentos no setor de pesquisa e tecnologia possa se apresentar como um dos “entraves” da não-consolidação da IA presente em toda a cadeia produtiva, o que em última instância, prejudica esta tecnologia habilitadora em termos de fomento da Indústria 4.0.

3.3.5. Internet Industrial das Coisas (IoT)

O termo Internet Industrial das Coisas, ou simplesmente Internet das Coisas (IoT), pode ser entendido como um “processo de incorporação de sensores, que permite as máquinas e equipamentos se comunicarem nas linhas de produção” (KANG ET AL., 2016). Os autores também argumentam que este mecanismo trata-se de uma tecnologia essencial para o funcionamento de um processo fabril inteligente, possibilitando ainda a facilitação da recepção e análise dos dados nos processos industriais.

3.3.6. Realidade Virtual (RV)

Utilizado pela primeira vez pelo cientista Jaron Lanier no final da década de 1980, o termo Realidade Virtual (RV) resultou da fusão de dois conceitos antagônicos, originando assim

um novo conceito que diferencia as simulações tradicionais feitas por computador das simulações envolvendo a interação de múltiplos usuários, dispersos geograficamente, em um ambiente compartilhado (ARAÚJO E KIRNER, 1996: 357). Neste sentido, a RV nada mais é do que o emprego da tecnologia em seu estágio mais avançado, a fim de convencer o usuário de que o mesmo encontra-se em outra realidade, induzindo o seu envolvimento completo naquela realidade.

Rodrigues e Porto (2013: 100) acrescentam ainda que “A RV é um “espelho” da realidade física, na qual o indivíduo existe em três dimensões, tem a sensação do tempo real e a capacidade de interagir com o mundo ao seu redor”. Ainda na concepção de Rodrigues e Porto (2013), a RV possui, essencialmente, três características principais. São elas:

- **Imersão:** capacidade de proporcionar ao usuário a sensação de estar dentro do ambiente virtual, quando este encontra-se imerso neste ambiente;
- **Interação:** capacidade do computador identificar as entradas do usuário, modificando-as instantaneamente o mundo virtual e as ações sobre o mesmo;
- **Envolvimento:** capacidade de estímulos ao comprometimento de um usuário à determinada atividade, atuando de modo ativo (exemplo: participante de um jogo) ou de modo passivo (leitor de um livro).

Em termos econômicos, Rodrigues e Porto (2013: 105) propõem que o papel da indústria altamente tecnológica (indústria 4.0) vem proporcionando avanços tecnológicos em hardwares e softwares, fazendo com que a utilização de recursos de RV propicie as empresas maior desempenho e menores custos.

3.3.7. Robôs autônomos

Um robô só pode ser considerado autônomo se o mesmo tiver a capacidade de “desempenhar uma série de tarefas e tomar decisões durante seu funcionamento sem intervenção humana” (PIMENTA, 2018: 9). Neste sentido, este tipo de inovação tecnológica torna-se imprescindível para atender a complexidade da indústria altamente tecnológica.

Todavia, este tipo de inovação demanda expressivos investimentos de capital, que por vezes são compensados por retornos na qualidade e precisão destes tipos de robôs. Tais retornos se intensificam, à medida que potenciais variações industriais ocorrem, sendo interpretadas rapidamente por estas máquinas que possuem alto grau de adaptabilidade a estas mudanças

(PIMENTA, 2018). Esta seria, portanto, uma das inovações tecnológicas das quais a indústria 4.0 se alicerça.

3.3.8. Segurança cibernética (cibersegurança)

O alto grau de complexidade que os processos industriais atingiram ao longo dos anos exigem da indústria 4.0 segurança, principalmente pelo fato de toda a cadeia produtiva apresentar-se interconectada, mediante ao acesso e gerenciamento de banco de dados robustos que garantem essa interconexão, até mesmo em patamares globais.

Assim, o termo “segurança cibernética” (também conhecido como “cibersegurança”) ganha notoriedade neste contexto:

Cibersegurança, na realidade, é um termo bem generalista, formado pelo prefixo ciber, extraído da palavra cibernética e frequentemente ligado a palavras que se relacionam ao meio digital, como cibernauta, cibercultura, cibercrime etc. Por definição, cibersegurança é a parte da segurança da informação que se refere exclusivamente à proteção dos ativos de informação, os dados de valor armazenados e administrados dentro de um sistema de informação (AQUARIUS SOFTWARE, 2020).

A proteção destes “ativos de informação” é de suma importância para a garantia da confidencialidade dos dados no contexto da indústria 4.0. Nesta perspectiva, a segurança cibernética torna-se uma “preocupação real para pessoas e empresas” (AQUARIUS SOFTWARE, 2020). Este argumento é reforçado pelo fato de que, de tempos em tempos, a mídia reproduz notícias sobre ataques de hackers, roubo de dados e arquivos virtuais, vazamento de informações confidenciais, sabotagem entre outros: “pelo fato das informações de processos das plantas serem dados digitalizados no contexto da Indústria 4.0, a proteção, pela cibersegurança, de toda a rede contra invasões e vazamentos de dados, é um ponto crucial para as indústrias e empresas” (AQUARIUS, 2020).

3.3.9. Simulação e impressão 3D (manufatura aditiva)

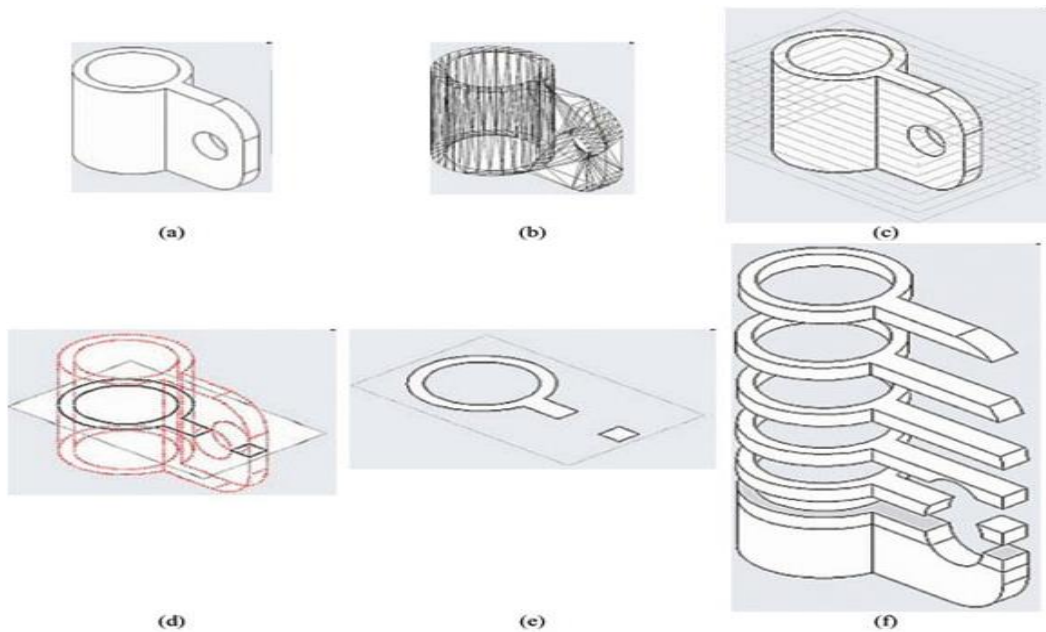
Conhecida como *Impressão 3D*, a também denominada *Manufatura Aditiva* é uma das tecnologias que vem ganhando notoriedade e servindo como um dos pilares da indústria 4.0. Esse

tipo de manufatura caracteriza-se pelo fato de produzir, individualmente, peças e partes complexas (ROMMEL E FISCHER, 2013).

Este tipo de manufatura detém imensuráveis potencialidades, no que diz respeito à fabricação de determinado produto, uma vez que possibilita mudanças na logística e nos requerimentos dos negócios (PETROVIC ET AL., 2011). Ademais, esse tipo de manufatura tem como objetivos principais: economia de materiais e de tempo (de chegada de um determinado produto ao seu destino final). Tais características possuem um significado relevante para a Indústria 4.0, por possibilitar a produção individualizada (GRIMM ET AL., 2015).

A figura a seguir descreve as principais etapas de um processo de manufatura até atingir o seu estágio final, representado pela manufatura aditiva/impressão 3D (estágio “f”):

Figura 15 - Representação das principais etapas de um processo de manufatura



Fonte: (HOTZA, D., 2009).

Por se tratar de uma literatura essencialmente recente sobre o tema, muitos autores acabam por “incluir” mais elementos que acreditariam fazer parte deste grupo das chamadas “tecnologias habilitadoras” que fomentariam a indústria 4.0. Todavia, sintética e consensualmente adota-se apenas as tecnologias anteriormente citadas, visto à escassez de trabalhos que “abordem com clareza quais seriam os pilares da Indústria 4.0” (FALCÃO, 2019: 28).

3.4. A Indústria 4.0 no Mundo

Pelo fato de a Quarta Revolução Industrial ser um fenômeno em ocorrência na atualidade, abre-se, neste sentido, margens para distintas formulações de seu conceito.

Mediante a isto, Liao et al. (2018), elencaram dezoito políticas públicas adotadas pelos países ao redor do mundo para a promoção da Quarta Revolução Industrial, que traduzem os conceitos adotados por cada um para a sua própria definição de Indústria 4.0:

Quadro 13 - As definições de Indústria 4.0 pelo Mundo

- **Industrie 4.0** - Alemanha (National Academy of Science and Engineering, 2013);
- **Made in China 2025** - China (2015);
- **Factories of the future** - Europa (European Factories of the Future Research Association, 2013);
- **Advanced Manufacturing Partnership** - Estados Unidos (President's Council of Advisors on Science and Technology, 2011, 2014);
- **Smart Industry** - Países Baixos (Netherlands, 2014);
- **Industria Conectada 4.0** - Espanha (Spain, 2014b);
- **Eleventh Malaysia Plan** - Malásia (Economic Planning Unit, 2015);
- **La Nouvelle France Industrielle** - França (Conseil National de L'industrie, 2013);
- **Future of Manufacturing** - Reino Unido (Foresight, 2013);
- **Smart Industry** - Suécia (2016);
- **Piano Nazionale Industria 4.0** - Itália (2016);
- **Super Smart Society** - Japão (Council for Science Technology and Innovation, 2015);
- **Manufacturing Innovation 3.0** - Coreia do Sul (2014);
- **Taiwan Productivity 4.0 Initiative** – Taiwan/província da China (Executive Yuan, 2015);
- **Crafting the Future** - México (2016);
- **Industrie 2030** - Canadá (Canadian Manufacturers & Exporters, 2016);
- **Research, Innovation and Enterprise 2020 Plan** - Singapura (National Research Foundation, 2016);
- **Make in India** - Índia (Department of Industrial Policy and Promotion, 2014).

Independente de qual nomenclatura adotada, especialistas a respeito do tema acordam se tratar do mesmo fenômeno. Nesta perspectiva, Kang et al. (2016) acredita que Alemanha, Estados Unidos e China saem na dianteira para a implementação da manufatura inteligente, colocando-os a frente dos demais países quando se trata da difusão da Quarta Revolução Industrial.

Todavia, cada país adota estratégias específicas para o fomento de sua Indústria 4.0. Nesta perspectiva, o quadro a seguir traz as diferentes diretrizes adotadas pelos pioneiros neste processo, para o alcance deste nível industrial interno:

Quadro 14 - As principais estratégias adotadas para o fomento da Indústria 4.0. pelo Mundo

PAÍS/REGIÃO	PLANO	DESCRIÇÃO
ALEMANHA	<i>High Tech Strategy</i>	Aumentar a produtividade da indústria alemã através da inovação e elevar a competitividade com a manufatura asiática compunham os principais objetivos da estratégia do governo. Através do projeto High Tech Strategy em 2006, foram reunidos os principais atores de inovação e tecnologia do país para alavancar e difundir novas tecnologias em âmbito nacional. Desse projeto nasceu o plano de ação High Tech Strategy 2020 - Action Plan (2010), que estabelecia o país como fornecedor principal de soluções de ciência e tecnologia em diversas áreas de conhecimento. Entre os projetos incluídos no plano de ação estava a Indústria 4.0. Toda a iniciativa contou com a participação dos principais atores do Sistema de Inovação e Tecnologia, incluindo todos os ministérios do governo alemão, além de investimentos de cerca de 4 bilhões de euros ao ano para o desenvolvimento das tecnologias de ponta. Dados do Boston Consulting Group ⁴ mostram que todos esses investimentos terão grande impacto na economia do país. Nos próximos 10 anos, são estimados: a) Aumento na produtividade da manufatura podendo alcançar de €90 bilhões a €150 bilhões, dependendo do setor industrial; b) Aumento de receita em €30 bilhões por ano, o equivalente a 1% do PIB do país, já que a customização gerará maior demanda tanto por parte dos consumidores finais (bens manufaturados) quanto de equipamentos especializados; c) Maior necessidade de mão de obra qualificada. O crescimento industrial alemão criará cerca de 390.000 empregos nos próximos 10 anos, principalmente no setor de Engenharia Mecânica, desenvolvimento de softwares e TI; d) Investimentos de aproximadamente €250 bilhões nos próximos 10 anos para adaptar os processos de produção.

ESTADOS UNIDOS	<i>Advanced Manufacturing Partnership (AMP)</i>	Anunciado em 2011, é um esforço nacional para unir indústria, universidades e o governo federal para investimento em tecnologias emergentes que criarão mão de obra altamente qualificada para as fábricas, aumentando a competitividade global dos EUA. O Accelerating US Advanced Manufacturing, ou AMP 2.0 (segunda versão lançada em 2014), apresentou uma série de medidas adicionais que o governo deve tomar para avançar com as capacidades de manufatura avançada do país.
	<i>National Network for Manufacturing Innovation (NNMI)</i>	Lançado em 2014, consiste na criação de hubs regionais que acelerarão o desenvolvimento e adoção de tecnologias de fabricação de ponta para fazer novos produtos globalmente competitivos.
CHINA	<i>Made in China 2025</i>	Anunciado em março de 2015 e inspirado no projeto alemão "Industrie 4.0", é um programa estratégico para atualizar a indústria do país, tornando-a mais eficiente e integrada, visando aumentar a participação estratégica do país na cadeia global de produção. Baseia-se nos seguintes aspectos: concentração em todo o processo de fabricação e não apenas na inovação; promoção do desenvolvimento não apenas de indústrias avançadas, mas das indústrias tradicionais e serviços modernos; foco no sistema de normas internacionais, ao invés de normas técnicas nacionais; definição de medidas claras e específicas para inovação, qualidade, fabricação inteligente e produção verde, com as referências identificadas para 2013 e 2015 e metas estabelecidas para 2020 e 2025. O programa também propõe cinco projetos: a construção de centros de inovação em fabricação; projetos de fabricação inteligentes; projetos de fortalecimento da indústria de base; projetos de fabricação verde; projetos de inovações disruptivas em equipamentos.
EUROPA	<i>Factories of The Future (FoF) Public-Private Partnership (PPP)</i>	É uma iniciativa da União Europeia lançada em 2013 para ajudar as empresas industriais, principalmente as MPES a se adaptarem à pressão competitiva global através do desenvolvimento dos fatores necessários para uso de tecnologias facilitadoras em diversos setores. Objetiva aumentar a base tecnológica industrial da UE, pelo desenvolvimento e integração de tecnologias facilitadoras, tais como tecnologias inovadoras para máquinas adaptadas, TIC para fabricação/manuseio industrial de materiais avançados.
FRANÇA	<i>The Industry of the Future</i>	Projeto lançado em 2015, como a segunda fase do programa New Face of Industry. Objetiva encorajar as companhias a modernizar sua base de produção e usar tecnologias digitais para transformar seus modelos de negócios. É baseado numa ambição mais ampla de capitalização dos ganhos obtidos através do plano Factory of the Future.

Fonte: Elaboração própria, com base em FIRJAN (2016: 6-9).

3.5. A Indústria 4.0 no Brasil

O cenário da Indústria 4.0 no Brasil tem se mostrado em construção, mediante a constantes transformações. De acordo com a FIRJAN (2016: 16), é de consenso por parte dos especialistas que a indústria brasileira passou, nos últimos cinco anos, por um período de transição da chamada Indústria 2.0 (caracterizada pela utilização de linhas de montagem e energia elétrica) para a Indústria 3.0 (que aplica automação através da eletrônica, robótica e programação).

Nesta perspectiva, nota-se que o período de passagem de um estágio para o outro desta indústria tem diminuído. Atualmente, o Brasil já apresenta algumas características da Indústria 4.0, mesmo não passando por todas as etapas do estágio anterior (Indústria 3.0): em muitos lugares do mundo, incluindo o Brasil, se vive a realidade simultânea da Indústria 1.0, 2.0 e 3.0 que acompanha a inovação dos últimos anos, que se aproxima (KUPFER, 2016). Tal característica pode ser explicada pela intensa velocidade da informação, do compartilhamento de dados, dos serviços de automação de maquinários industriais, todos provenientes do progresso tecnológico, especialmente, no caso brasileiro, do setor automobilístico:

[...] os serviços de automação de maquinários industriais, é o primeiro passo para criar um meio propício à implantação da IoT [...] Apesar de transversal a todos os setores industriais, de acordo com um dos maiores especialistas em Indústria 4.0 no Brasil, o setor mais adiantado para receber essa nova onda de produção no país é a indústria automotiva. Os profissionais deste setor possuem qualificação em constante atualização para atender às demandas de mercado deste segmento. É um setor que possui um grande número de profissionais, de modo que há a chance dessa mão de obra qualificada ser transferida ou aproveitada para outros setores-chaves do país, como óleo e gás, *subsea* (plataformas subaquáticas) e aeronáutica. Outros setores também têm potencial para desenvolvimento da Indústria 4.0. Tais dados e informações reforçam a ideia de que a digitalização aplicada à indústria, energia e infraestrutura é fundamental para aumentar a competitividade global e influenciar o desenvolvimento econômico do país, mostrando uma predisposição do Brasil para a implementação de tecnologias ligadas à Indústria 4.0. (FIRJAN, 2016: 16-17).

Assim, os principais desafios para a consolidação deste tipo de indústria em território nacional, seriam:

a) obtenção de políticas estratégicas inteligentes; b) incentivos e fomentos por parte do governo; c) reunião de empresários e gestores da indústria com visão, arrojo e postura proativa; d) disposição de desenvolvimento tecnológico e formação de profissionais altamente qualificados por parte das instituições acadêmicas e de pesquisa, preferencialmente em grande proximidade com a indústria (FIRJAN, 2016: 17).

Segundo o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), a Agenda Brasileira para a Indústria 4.0, constituída de cinquenta instituições distribuídas entre governo, empresários e sociedade civil organizada, alicerça-se em **quatro premissas** e **dez medidas** que auxiliariam a iniciativa privada brasileira a ingressarem neste tipo de indústria, em aproximadamente, dois anos:

Quadro 15 - Agenda Brasileira para a Indústria 4.0

PREMISSAS	MEDIDAS
1) Fomento de iniciativas que facilitem e habilitem o investimento privado, levando-se em consideração a nova realidade fiscal do país;	1) <i>Difusão do conteúdo (conhecimento)</i> : compreensão do conceito de Indústria 4.0 por parte das empresas;
2) Proposta de uma agenda centrada no industrial/empresário, conectando instrumentos de apoio existentes, permitindo uma maior racionalização e uso efetivo, facilitando o acesso dos demandantes, levando o maior volume possível de recursos para a “ponta”;	2) <i>Autoavaliação</i> : entendimento da atual situação da empresa;
3) Testar, avaliar, debater e construir consensos por meio da validação de projetos-piloto, medidas experimentais, atuando com neutralidade tecnológica;	3) <i>Hub 4.0 (protótipo)</i> : criação de uma plataforma de serviços que possibilitem as empresas vislumbrarem sua autoavaliação e se conectarem com outras empresas que forneçam tecnologia para a transformação (“parceiros tecnológicos e de negócios”);
4) Equilibrar medidas de apoio para pequenas e médias empresas com grandes companhias.	4) <i>Brasil mais produtivo (B + P 4.0)</i> : medida para o apoio às pequenas empresas na trajetória para a Indústria 4.0 através da manufatura enxuta e digitalização;
	5) <i>Test Beds</i> : testar, implementar e prototipar processos de implantação de novas tecnologias;
	6) <i>Conexão Startup-Indústria 4.0</i> : objetiva focar as <i>startups</i> nas necessidades das indústrias nacionais para a transformação das mesmas em Indústria 4.0; 7) <i>Talentos (requisito - mercado de trabalho e educação 4.0)</i> : mapeamento das competências necessárias e o entendimento da demanda para a

	<p>requalificação dos profissionais, facilitando assim a atuação da empresa no mercado;</p>
	<p>8) <i>Regras do Jogo 4.0</i>: proposta de reformas legais e infralegais para que as empresas migrem para a Indústria 4.0 (adequações das normas para o uso de robôs colaborativos, privacidade e proteção dos dados);</p>
	<p>9) <i>Financiabilidade para uma Indústria 4.0 (incentivos)</i>: estruturação de parcerias com bancos públicos e privados objetivando a garantia de opções de financiamentos para a migração. No final deste processo, necessita-se deste investimento em soluções 4.0, que aumentem a eficiência, a produtividade e a competitividade das empresas, sendo este investimento um grande passo para a mudança para novos patamares produtivos;</p>
	<p>10) <i>Conexão Global (alianças estratégicas - comércio internacional 4.0)</i>: objetiva zerar os impostos de importação para as impressoras, insumos e robôs usados na Indústria 4.0 para acelerar o processo e reduzir os custos. Assim, em um país mais integrado à economia global, a competitividade da indústria dependerá da capacidade do produtor nacional em incorporar as novas tecnologias da Indústria 4.0, permitindo que ele possa competir em igualdade de condições em seu mercado interno e externo.</p>

Fonte: Elaboração própria, com base em ABDI e MDIC (2020); Falcão (2019: 29-30).

Com base nesta concepção, a superação progressiva dos desafios, bem como a execução consciente desta agenda, possibilitará “absorver e implementar na indústria nacional, o conjunto de tecnologias e vantagens que esta quarta revolução industrial é capaz de trazer, firmando a competitividade brasileira perante às grandes potências mundiais e até mesmo pioneiras neste processo de adoção da Indústria 4.0” (FIRJAN, 2016: 18).

Mesmo possuindo potencialidades para o desenvolvimento de tal estágio da indústria mais altamente avançada na atualidade, o Brasil ainda não demonstra o devido interesse em relação ao tema, como argumenta Kupfer (2016): “No Brasil, o debate sobre a Indústria 4.0 ainda é muito

tímido, restrito a alguns seminários aqui e ali e a umas poucas iniciativas de governo ou associações de classe, o que em si já é revelador da pequena prioridade que vem sendo conferida ao tema no país”. Ainda no argumento de Kupfer, percebe-se que o atraso deste estágio na indústria brasileira é o equívoco entendimento da manufatura avançada como uma tecnologia disruptiva, ou seja, que rompe com os padrões tecnológicos já conquistados nos estágios anteriores.

Todavia, a superação dos desafios citados pela FIRJAN (2016) para a incorporação da Quarta Revolução Industrial no caso brasileiro, relaciona-se muito mais com a incorporação e aplicabilidade massiva destas novas tecnologias, do que com a inovação proveniente desta:

A Indústria 4.0 é muito mais um elenco de inovações incrementais que decorrem da incorporação e, principalmente, da integração de tecnologias já disponíveis ou emergentes e que, portanto, já fazem parte do estado da arte. Assim, seus desafios estão muito mais no plano da escalagem e massificação do uso do que no desenvolvimento inovativo propriamente dito (KUPFER, 2016).

Em suma, cabe a indústria brasileira a compreensão do “caráter transversal” (bem denominado por Kupfer) que este estágio da Revolução Industrial incorpora. Isto porque, no caso brasileiro, muitas características das Indústrias 1.0, 2.0 e 3.0 ainda não foram incorporadas ou ainda encontram-se em desenvolvimento. Ademais, avanços no progresso tecnológico marca o aumento na velocidade da passagem de um estágio para o outro, ou seja: quanto mais avançado o estágio da Revolução Industrial, mais rapidamente o mesmo precisará ser incorporado pela indústria que o busca, tendo em vista a competitividade oriunda da conhecida globalização:

No entanto, se o caráter transversal dessa nova onda acena com múltiplas oportunidades, o desafio brasileiro para surfá-la precisa ser enfrentado a partir do diagnóstico de que boa parte da indústria nacional ainda está no estágio 2.0, tendo conseguido incorporar as técnicas relacionadas à produção enxuta de 30 anos atrás, mas apresentando importantes defasagens em tecnologias de informação e comunicação, que caracterizam o estágio 3.0. Significa isso que será necessário, mais uma vez, queimar etapas, resultado que dificilmente será alcançado sem uma extensa construção institucional, pública e privada, voltada para fomentar esse processo (KUPFER, 2016).

Para além destas questões, o último capítulo aborda como (ou se) este estágio apresenta-se no Brasil nos últimos anos. Tal seção contemplará, para o caso brasileiro, se a extração das Terras Raras caracterizaria ou contribuiria, em alguma medida, para o fomento de sua Indústria 4.0.

CAPÍTULO 4. TERRAS RARAS E INDÚSTRIA 4.0 NO BRASIL: HÁ RELAÇÃO?

Esta última seção tem como objetivo investigar se há, de fato, alguma relação entre a extração dos Elementos de Terras Raras e o fomento da Indústria 4.0 no Brasil. Tal investigação será realizada mediante a uma análise econométrica e comparativa do Brasil, com demais países.

4.1. Fonte e estrutura dos dados

Para esta análise, a estrutura dos dados adotada será a de DADOS EM PAINEL. Para a viabilidade de tal metodologia, verificou-se preliminarmente que, apenas a adoção da base de dados do Brasil seria insuficiente para a rodagem do modelo, no pacote estatístico. Neste sentido, será realizada uma análise comparativa do Brasil com os demais países que compõem os BRICS (Rússia, Índia, China e África do Sul), acrescentando, ainda: Hong Kong (região administrativa chinesa), Estados Unidos, América do Norte e África.

A série histórica adotada contemplará os anos de 1994 a 2020, disposta num total de 243 observações. Apesar de nem todas as variáveis apresentarem valores/dados para todos os anos, o modelo adotado permite corrigir e/ou minimizar tal ausência, bem como o de convergir unidades de medidas distintas. O pacote estatístico a ser utilizado será o programa STATA, versão STATA_MP 13. Por fim, o modelo utilizará as seguintes variáveis, descritas a seguir:

1) VARIÁVEL DEPENDENTE (explicada):

- *competitividade mundial*: mensurada através de posições em um “ranking” de países.

2) VARIÁVEIS INDEPENDENTES (explicativas):

- *competitividade digital mundial*: mensurada através de posições em um “ranking” de países;
- *robôs*: instalação de robôs industriais (em milhares de unidades);
- *inovação*: mensurada através de posições em um “ranking” de países;
- *startups*: quantidade de startups de Inteligência Artificial financiadas (em milhares de unidades);

- *reservas de Terras Raras*: reservas de Terras Raras, sendo este valor, uma média entre o primeiro e o segundo mapeamento/valores, para cada ano (em toneladas);
- *minas de Terras Raras*: produção de minas de Terras Raras, sendo este valor, uma média entre o primeiro e o segundo mapeamento/valores para cada ano (em toneladas);
- *reservas de Terras Raras (y)*: reservas de Terras Raras (ítrio - y), sendo este valor, uma média entre o primeiro e o segundo mapeamento/valores, para cada ano (em toneladas);
- *minas de Terras Raras (y)*: produção de minas de Terras Raras (ítrio - y), sendo este valor, uma média entre o primeiro e o segundo mapeamento/valores para cada ano (em toneladas).

Nota: mesmo o elemento químico ítrio (y) sendo um ETR, este possui uma análise a parte de seus dados, de acordo com o levantamento anual do USGS.

A tabela a seguir descreve a simbologia, bem como as fontes de cada uma das variáveis adotadas para a construção do modelo e execução do mesmo, no programa STATA:

Tabela 5 - Simbologia e fonte das variáveis

VARIÁVEL	SIMBOLOGIA	FONTE ^(1,2,3,4,5)
competitividade mundial	<i>compet_mundial</i>	WCY (IMD) ⁽¹⁾
competitividade digital mundial	<i>compet_dig_mundial</i>	WCY (IMD)
robôs	<i>robos</i>	IFR ⁽²⁾
inovação	<i>inovacao</i>	GII (U. Cornell, INSEAD, WIPO) ⁽³⁾
startups	<i>startups_ia</i>	HAI (AII, U. Stanford) ⁽⁴⁾
reservas de Terras Raras	<i>reservas_tr</i>	USGS ⁽⁵⁾
minas de Terras Raras	<i>minas_tr</i>	USGS
reservas de Terras Raras (y)	<i>reservas_y_tr</i>	USGS
minas de Terras Raras (y)	<i>minas_y_tr</i>	USGS

Fonte: Elaboração própria.

¹ World Competitiveness Yearbook, International Institute for Management Development - Business School;

² International Federation of Robotics;

³ Global Innovation Index;

⁴ Human-Centered Artificial Intelligence - Artificial Intelligence Index (AII);

⁵ United States Geological Survey.

4.2. Metodologia e Modelo

Inicialmente, cabe aqui ressaltar que a especificação econométrica construída e descrita a seguir encontra-se em seu **estágio inicial**. Depreende-se que muitos aprimoramentos ainda deverão ser realizados, visto que não se encontrou trabalhos publicados e/ou disponíveis que abordem o tema e a relação entre as variáveis descritas nesta proposta de modelo.

Neste sentido, foram testadas, preliminarmente, distintas formas funcionais de modelos para dados em painel que mais se adequariam à base de dados selecionada. Assim sendo, o critério utilizado para a escolha do modelo mais adequado foi o que apresentasse, ao mesmo tempo:

- os maiores coeficientes para cada variável, e
- a estatística p valor: a) igual a zero; ou b) próximo de 0,1 (ou 10%) - considerando o Intervalo de Confiança (IC) de 95%, ou c) menor que a estatística (teste) t.

Realizados os testes, verificou-se que o modelo que mais se adequaria à análise do tema deste trabalho seria o MODELO DE MÍNIMOS QUADRADOS ORDINAIS COM EFEITOS ALEATÓRIOS, que tenta expressar a heterogeneidade das unidades por meio do termo de erro. O mesmo pode ser expresso pela seguinte dotação:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_5 X_5 + \beta_6 X_6 + \beta_7 X_7 + \beta_8 X_8 + U_i \quad (\text{EQUAÇÃO 1}),$$

onde:

β_0 = coeficiente da constante;

β_1 = coeficiente da variável competitividade digital mundial;

β_2 = coeficiente da variável robôs;

β_3 = coeficiente da variável inovação;

β_4 = coeficiente da variável startups;

β_5 = coeficiente da variável reservas de Terras Raras;

β_6 = coeficiente da variável minas de Terras Raras;

β_7 = coeficiente da variável reservas de Terras Raras (y);

β_8 = coeficiente da variável minas de Terras Raras (y);

Y = competitividade mundial;

X_1 = competitividade digital mundial;

X_2 = robôs;

X_3 = inovação;

X_4 = startups;

X_5 = reservas de Terras Raras;

X_6 = minas de Terras Raras;

X_7 = reservas de Terras Raras (y);

X_8 = minas de Terras Raras (y);

U_i = termo de erro.

Este modelo estima o valor do intercepto, antes fixo (*Modelo de Mínimos Quadrados Ordinais com Efeitos Fixos*), que passa a ser uma variável aleatória, expressa como:

$$\beta_{li} = \beta_l + \varepsilon_l \quad (\text{EQUAÇÃO 2}),$$

onde as características de cada unidade são observadas no termo de erro.

Na realização das regressões com distintos modelos para a base de dados, observou-se que o Modelo de Mínimos Quadrados Ordinais com Efeitos Aleatórios seria o que mais se adequaria à base de dados selecionada, em detrimento do Modelo de Mínimos Quadrados Ordinais com Efeitos Fixos (escolha realizada mediante ao Teste de Hausman - Anexo D). Salienta-se que tanto o modelo de efeitos fixos como o modelo de efeitos aleatórios são ajustamentos do *Modelo de Pooled* (comumente utilizado na regressão de dados em painel). Nota: todos os testes, bem como seus resultados encontram-se devidamente discriminados na seção “ANEXOS” deste trabalho.

4.3. Resultados

Estimando a regressão no modelo, obtém-se os seguintes coeficientes para as variáveis:

Figura 16 - Modelo de Mínimos Quadrados Ordinais com Efeitos Aleatórios (resultados)

```

. xtreg compet_mundial compet_dig_mundial robos inovacao startups_ia reservas_tr minas_tr reservas_y_tr minas_y_tr, re

Random-effects GLS regression              Number of obs   =   243
Group variable: iid                       Number of groups =    9

R-sq:  within = 0.1819                    Obs per group:  min =   27
       between = 0.9238                    avg           =  27.0
       overall = 0.4584                    max           =   27

corr(u_i, X) = 0 (assumed)                Wald chi2(8)    =   198.02
                                           Prob > chi2     =    0.0000

```

compet_mundial	Coef.	Std. Err.	z	P> z	[95% Conf. Interval]
compet_dig_mundial	.0440498	.0977333	0.45	0.652	-.1475038 .2356035
robos	-.0003089	.000077	-4.01	0.000	-.0004599 -.0001579
inovacao	.5220264	.0657938	7.93	0.000	.393073 .6509799
startups_ia	-.009907	.0064634	-1.53	0.125	-.0225751 .0027611
reservas_tr	1.36e-07	1.39e-07	0.98	0.329	-1.37e-07 4.08e-07
minas_tr	.0004257	.0001285	3.31	0.001	.0001738 .0006776
reservas_y_tr	-.0000892	.00003	-2.98	0.003	-.000148 -.0000305
minas_y_tr	-.0047376	.0015527	-3.05	0.002	-.0077809 -.0016943
_cons	14.11819	1.487561	9.49	0.000	11.20263 17.03376
sigma_u	0				
sigma_e	9.9136853				
rho	0				(fraction of variance due to u_i)

```

.
end of do-file

```

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados gerados no programa STATA_MP 13.

Assim, atribuindo os coeficientes obtidos na regressão para cada variável na EQUAÇÃO 1, temos como resultado o seguinte modelo:

$$\begin{aligned} \text{Compet_mundial} = & 14.11819 + 0.0440498 \text{ compet_dig_mundial} - 0.0003089 \text{ robos} + 0.5220264 \\ & \text{inovacao} - 0.009907 \text{ startups_ia} + 1.36e^{-07} \text{ reservas_tr} + 0.0004257 \text{ minas_tr} - 0.0000892 \\ & \text{reservas_y_tr} - 0.0047376 \text{ minas_y_tr} + U_i \end{aligned} \quad (\text{EQUAÇÃO 3}),$$

onde:

- i. Neste modelo, a variável dependente (*competitividade mundial*) foi adotada como uma *proxy* (representação) da presença da Indústria 4.0 em cada país selecionado, visto não haver uma variável exata que exprima a presença deste quarto estágio da Revolução Industrial;
- ii. Por se tratar de uma base de dados em painel, o número de observações (no período abrangido) mostra-se insuficiente para a análise individual do impacto destas variáveis em cada país. Neste sentido, a única possibilidade a ser considerada foi a da realização de uma “análise conjunta” destas variáveis nestes países;
- iii. Algumas variáveis não apresentaram valores para todos os anos. Mesmo o modelo adotado minimizando e/ou minimizando este impacto negativo para alguns casos, esta ausência de dados pode ter corroborado, em alguma medida, para os valores ínfimos dos coeficientes de cada variável, o que futuramente buscar-se-á neutralizar tal efeito;
- iv. A estatística do *p valor* (teste t) é uma das mais importantes mensurações deste modelo, pois demonstra se as variáveis independentes selecionadas explicam, de alguma forma, efeitos (positivos ou negativos) na variável dependente. Neste sentido, as estatísticas para o *p valor* de cada variável, no modelo proposto, mostraram-se coerentes (não significativos), exceto para a variável *competitividade digital mundial*. Entretanto, futuros ajustes serão realizados no modelo para eliminar e/ou minimizar este resultado;
- v. As variáveis com sinal negativo demonstram que as mesmas afetam, negativamente, a variável dependente (*competitividade mundial*). Entretanto, vale salientar que esta regressão trata-se de uma análise em conjunto dos países escolhidos. Neste caso, mesmo possuindo uma influência “negativa” sobre a competitividade, possa ser que individualmente, em cada país (como para o caso brasileiro), esta influência seja positiva;

- vi. A variável em análise (competitividade mundial) e as variáveis explicativas *competitividade digital mundial* e *inovação* são variáveis qualitativas. Posteriormente, buscar-se-á uma melhor maneira de mensurá-las dentro do modelo proposto.

Em síntese, esta especificação econométrica buscou mensurar a influência dos ETR sobre a Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0). Observou-se que estes elementos possuem, mesmo que em proporções não muito expressivas (se comparados, dentro do modelo, à variável *inovação*), influência sobre este novo estágio da Revolução Industrial. Uma atenção deve ser dada ao elemento ítrio (y), que mesmo integrando os ETR, possui uma análise a parte de seus dados. As ineficientes políticas de/e extração deste elemento adotadas em cada país, podem ser algumas das causas que expliquem, em alguma medida, o impacto negativo das variáveis que o envolvam na competitividade, e por consequência, no fomento da Indústria 4.0.

Reitera-se que a transposição aqui realizada da relação *ETR e Indústria 4.0* para análises em modelagens econométricas trata-se de uma nova proposta/abordagem em caráter essencialmente inicial, entendendo-se que muitos aprimoramentos ainda deverão ser realizados, como: substituição, redefinição, acréscimo e/ou retirada de variáveis no modelo adotado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como objetivo realizar um estudo acerca da possível relação entre a extração dos Elementos de Terras Raras (ETR, ou simplesmente, Terras Raras - TR) com o fomento da Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0) no Brasil.

Preliminarmente, fez-se necessário uma investigação descritiva acerca do que seriam estes elementos, bem como a sua disposição na natureza. Observou-se que tratam-se de elementos que compõem a série dos lantanídeos na tabela periódica, contemplando a série de numeração atômica 57 (lantânio) a 71 (lutécio), com a inclusão do escândio (21) e do ítrio (39). Ademais, constatou-se que devido às suas subclassificações em leves, médios e pesados, a extração de formas distintas destes elementos pode, em alguma proporção, explicar a sua pouca, expressiva ou nenhuma contribuição em termos econômicos e ambientais, como é o caso do ítrio.

Em um segundo momento, foi realizado um estudo acerca destes elementos no Brasil. Tal análise contemplou, especialmente, as políticas governamentais adotadas em favor da extração destes elementos, uma vez comprovada a abundância destes elementos em território brasileiro. A partir desta abordagem, abriu-se margens para a hipótese de que a extração destes elementos corroboraria, em última instância, para o fomento da Indústria 4.0 não só no Brasil, mas no mundo. Especialmente no Brasil, a Minuta 2018 do MCTIC deixa claro que a extração contribui positivamente para o fomento da Quarta Revolução Industrial brasileira.

Não só em termos nacionais verificou-se que, a extração destes elementos, contribui, em alguma medida, para a difusão das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, que geram: produção de baterias e ímãs de alta resistência, mercado de semicondutores, inteligência artificial (contemplando a atual Tecnologia 5G), sensores, catalizadores, entre outras produções (e seus produtos). Tais constatações possibilitaram o avanço para o terceiro momento desta dissertação.

Verificada a possibilidade desta relação, uma abordagem descritiva e em perspectiva cronológica das fases da Revolução Industrial fez-se necessária. Seus distintos estágios no tempo foram descritos, destacando que nem todos os países absorveram todos estes estágios: na realidade, tais estágios ocorreram, ao longo do tempo, de formas diferentes e/ou incompletas nos países.

Pode-se dizer que alguns países encontram-se incorporando o último estágio deste processo (Quarta Revolução Industrial) sem mesmo ter absorvido integralmente o estágio que o antecedeu (Terceira Revolução Industrial). Estas conclusões apontam para o caráter

essencialmente dinâmico deste processo, bem como para a constatação de que o espaço de tempo para a absorção dos sucessivos estágios da Revolução Industrial tem se mostrado cada vez menor. Isto acaba por gerar significativos problemas estruturais, de longo prazo e de desenvolvimento das economias, ressurgindo o debate da visão cepalina do agravamento das relações centro-periferia.

Por fim, lançou-se uma nova proposta de abordagem acerca da relação entre extração de TR e Indústria 4.0. Para tal, foi construída uma modelagem econométrica a partir da construção de uma base de dados em painel e sua posterior regressão. Tal série histórica contemplou os anos de 1994 a 2020 e variáveis que possivelmente contribuiriam para o fomento da Indústria 4.0, à inclusão das TR. Utilizando o modelo mais adequado e realizados os devidos testes e regressão, verificou-se que a extração de TR contribui, em alguma medida, para a difusão da Quarta Revolução Industrial não só no Brasil, mas no mundo.

Ademais, a forma como se extrai as TR, as políticas governamentais adotadas bem como a especificidade destes elementos são decisivos para a sua contribuição neste novo estágio da Revolução Industrial, seja esta contribuição: significativa, irrisória, positiva ou negativa. Reconhece-se, que neste trabalho, não houve uma análise aprofundada, em termos comparativos, sobre estas questões, mediante, por exemplo, a uma possível confrontação entre a política industrial chinesa com a política industrial brasileira. Todavia, tal aprofundamento/comparação não era um objetivo primordial desta dissertação, o que não descarta, em hipótese alguma, futuros trabalhos e/ou abordagens a serem desenvolvidos(as) nesta direção.

Reitera-se que a abordagem em modelagem econométrica aqui realizada encontra-se em caráter essencialmente inicial, o que sugere que muitos aperfeiçoamentos ainda precisarão ser realizados, levando-se principalmente em consideração, o aperfeiçoamento da relação causal e o aprimoramento do tratamento das variáveis selecionadas, dentro do modelo proposto.

Em linhas gerais, verificou-se a estreita relação entre a extração das Terras Raras e o fomento da Indústria 4.0, contribuindo, essencialmente, para um desenvolvimento econômico sólido. Tal constatação parece já ter sido intuída por alguns países, especialmente para a China. Esta intuição é o objeto de estudo que dará continuidade a investigação proposta nesta dissertação, para além do Brasil (como o caso da China), dentro da abordagem/metodologia aqui adotada.

REFERÊNCIAS

ABDI. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial; MDIC. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. 2020. **Agenda brasileira para a Indústria 4.0: o Brasil preparado para os desafios do futuro**. Disponível em: <<http://www.industria40.gov.br/>>. Acesso em: 23 dez. 2020, às 13:44.

ABRÃO, A. Química e tecnologia das terras-raras. **Série Tecnologia Mineral, Nº . 66, CETEM/CNPQ**. 212p., p. 2. Rio de Janeiro. 1994. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/series/serie-tecnologia-mineral/item/download/375_0e3794b9806c46e419885a1224addf2c>. Acesso em: 06 dez. 2019, às 21:43.

AMSDEN. Alice H. **A difusão do desenvolvimento: o modelo de industrialização tardia e a Grande Ásia Oriental**. Departamento de Economia, New School for Social Research. Trad. Ricardo Borges Costa. Revista de Economia Política, v. 12, n. 1 (45), jan. a mar. 1992.

ANDRADE. R. H. P. de. Terras Raras. DNPM-MS. **Sumário Mineral, 2014**. p. 1. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/terras-raras-sumario-mineral-2014>>. Acesso em: 30 nov. 2019, às 12:09.

ANTONIASSI, J. L. **Caracterização tecnológica de recursos minerais de terras raras em complexos alcalinos e alcalino-carbonatíticos do Brasil**. Tese de Doutorado. Biblioteca Digital (USP). 2017. pp. 13-17. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-27112017-143927/publico/JulianaLiviAntoniassiCorr17.pdf>>. Acesso em: 07 dez. 2019, às 07:13.

ANTONIUTTI, C. L. **Usos do Big Data em campanhas eleitorais**. Orientadora: Profa. Dra. Sarita Albagli. Rio de Janeiro, 2015. Tese (Doutorado em Ciência da Informação) - IBICT/UFRJ-ECO. 271 p. 68. Disponível em: <<http://repositorio.ibict.br/bitstream/123456789/849/1/TESE%20DOUTORADO%20CI%C3%80NCIA%20DA%20INFORMA%C3%87%C3%83O%20-%202015%20-%20CLEIDE%20LUCIANE%20ANTONIUTTI%20-%20IBICT-ECO-UFRJ%20%281%29.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2020, às 13:14.

AQUARIUS SOFTWARE. **Cibersegurança é preocupação da Indústria 4.0** (artigo). 2020. Disponível em: <<https://www.aquarius.com.br/ciberseguranca-e-preocupacao-da-industria-4-0/>>. Acesso em: 01 dez. 2020, às 10:15.

ARAÚJO, R. B.; KIRNER, C. **Especificação e análise de um sistema distribuído de realidade virtual**. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Artigo publicado no 14.º Simpósio Brasileiro de Rede de Computadores (SBRC 96). São Carlos, São Paulo. jun. 1996. 18 p. pp. 357-374. Disponível em: <<http://ce-resd.facom.ufms.br/sbrc/1996/p19.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2020, às 15:09.

AZEVEDO, M. T. de. **Transformação Digital na Indústria: Indústria 4.0 e a Rede de Água Inteligente no Brasil**. POLI-USP. São Paulo. 2017. 177 p. pp. 40-41. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-28062017-110639/publico/MarceloTeixeiradeAzevedoCorr17.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2020, às 12:11.

BALARAM, V.; **Geoscience Frontiers**. 2019, 10, p. 1287. pp. 1285-1303. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674987119300258?via%3Dihub>>, e em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1674987119300258?token=8F8A4E8E8D122F51B189EF02C51F14D1D2DCA5E9DDBCBD327264CC013D7A6833804F9BE5A0FE03E9EFF6269DE90342>>. Acesso em: 21 set. 2019, às 10:01.

BCG. **Boston Consulting Group**. 2015. Disponível em: <https://web-assets.bcg.com/dims4/default/40b1d9b/2147483647/strip/true/crop/800x749+0+0/resize/1600x1498!/quality/90/?url=https%3A%2F%2Fmkt-bcg-com-public-images.s3.amazonaws.com%2FIndustry_40_ex01_large_tcm9-61615.jpg>. Acesso em: 22 set. 2020, às 14:08.

BIELSCHOWSKY, Ricardo. **Estratégia de desenvolvimento e as três frentes de expansão no Brasil: um desenho conceitual**. Economia e Sociedade, Campinas, v. 21, Número Especial, dez. 2012. pp. 729-747.

BLOOMBERG NEWS, 2010. **Global rare earth demand to rise to 210,000 metric tons by 2015**. October 18, 2010. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/search?query=BLOOMBERG%20NEWS.%20October%202018,%202010.%20Wang%20Caifeng>>. Acesso em: 04 ab. 2019, às 17:06.

CAMPOS, M. F. de. **Panorama atual sobre as tendências de mercado de produtos de Terras Raras**. Apresentação realizada no IV Seminário Brasileiro de Terras-Raras. Evento promovido pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Out. 2017. p. 5. Disponível em: <http://www.ipt.br/eventos/194-iv_seminario_brasileiro_de_terrass_raras.htm>. Acesso em: 30 dez. 2019, às 17:12.

CASTOR, S.B.; HEDRIK, J.B. **Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets, and Uses**. KOGEL, J.E.; TRIVEDI, N.C.; BARKER, M.J.; KRUKOWSKI, S. T., eds.; Society for

Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME): Littleton, 2006, Cap. 58. Disponível em: <<https://books.google.ne/books?id=zNicdkuulE4C&printsec=copyright&hl=fr#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em: 14 ago.2019, às 13:22.

CBMM. Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração. Relatório apresentado no **IV Seminário Brasileiro de Terras-Raras**. Evento promovido pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Out. 2017. pp. 5-7. Disponível em: <http://www.ipt.br/eventos/194-iv_seminario_brasileiro_de_terras_raras.htm>. Acesso em: 30 dez. 2019, às 17:09.

CEDE. Centro de Estudos e Debates Estratégicos. **Minerais Estratégicos e Terras Raras**. N. 3. Brasília. 2014. p. 49. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/a-camara/estruturaadm/altosestudios/temas/pdf/minerais-estrategicos-e-terras-raras>>. Acesso em: 29 dez. 2019, às 18:08.

CETEM/MCTIC. **Atuação do MCTIC e Parceiros em PD&I para Minerais Estratégico (Lítio) e Oportunidades para a Consolidação da Cadeia Produtiva de Lítio no Brasil**. Seminário sobre Lítio. Desafios para o desenvolvimento da cadeia de lítio no país. Rio de Janeiro. 17 ago. 2018. 22p. p. 8. Disponível em: <<https://www.cetem.gov.br/images/eventos/2018/iii-litio-brasil/apresentacoes/atuacao-mctic-pdi-minerais-estrategicos-li.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2020, às 20:13.

CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. *Ciência, Tecnologia e Inovação. Uso e aplicações de Terras Raras no Brasil: 2012-2030*. Brasília - DF. 2013. 258p. pp. 29-35. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10182/734063/Terras_Raras_Web_9532.pdf>. Acesso em: 30 mar. 2019, às 15:13.

CHANG, Ha-Joon. **Chutando a Escada: A Estratégia do Desenvolvimento em Perspectiva Histórica**. Tradução: Luiz Antônio Oliveira de Araújo. São Paulo: Fundação Editora da UNESP. 2004.

CHENG, Guo-jian et al. Industry 4.0 Development and Application of Intelligent Manufacturing. **2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (isai)**, Hong Kong, pp.407-410, jun. 2016. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISAI.2016.0092>. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7816745>>. Acesso em: 24 abr. 2020, às 14:25.

CONNELLY, N.G.; DAMHUS, T.; HARTSHORN, R.M.; HUTTON, A.T.; **Nomenclature of Inorganic Chemistry – IUPAC Recommendations 2005**, RSC Publishing: Cambridge, 2005. Disponível em: <https://old.iupac.org/publications/books/rbook/Red_Book_2005.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2019, às 11:22.

COTTON, S.; **Lanthanide and Actinide Chemistry**, Wiley: Chichester, 2006. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/05db/3b1911e621802ac154d8cb1852ef8104b73f.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2019, às 08:31.

DAVIS, H.M.; SEABORG, G.T.; **The Chemical Elements**, 3rded, Science Service: Washington, 1961. Disponível em: <<https://link.springer.com/book/10.1007%2F1-4020-3598-5>>. Acesso em: 14 mai. 2019, às 07:23.

EM DISCUSSÃO!. **Revista do SENADO FEDERAL**. N. 17. Ano 4. set. 2013. 64p. pp. 48-49. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/terras-raras.aspx>>, e em: <http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/Upload/201304%20-%20setembro/pdf/em%20discuss%C3%A3o!_setembro_2013_internet.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2019, às 15:07.

ETZKOWITZ, Henry. **Hélice Tríplice**: Universidade-Indústria-Governo. Traduzido de: The triple helix: university-industry-government innovation. EDIPUCRS, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUC RS. 2009. 220 p.

EVANS, Peter. **O Estado como problema e solução**. Estado, Reformas e Desenvolvimento. Lua Nova, n.28-29. São Paulo. Apr. 1993. Plataforma SciELO. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-64451993000100006>. Acesso em: 15. jan. 2019, às 15:43.

FALCÃO, A. C. R. de A. **Sistematização dos Pilares da Indústria 4.0**: Uma Análise Utilizando Revisão Bibliográfica Sistemática. Tese apresentada na Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (USP). 2019. 97 p. pp. 28-65. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-04072019-091814/publico/AnaCarolinaRodriguesFalcaoDEFINITIVO.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2020, às 13:54.

FILHO, P. C. de S.; SERRA, O. A. **TERRAS RARAS NO BRASIL: HISTÓRICO, PRODUÇÃO E PERSPECTIVAS**. Química Nova, Vol. 37, No. 4. pp. 753-760. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140121>>. Acesso em: 06 mai. 2019, às 10:52.

FILHO, P. C. de S.; GALAÇO, A. R. B.S.; SERRA, O. A. **Terras Raras**: Tabela Periódica, Descobrimto, Exploração no Brasil e Aplicações. 2019. pp. 3-8. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/337233630_TERRAS_RARAS_TABELA_PERIODICA_DESCOBRIMENTO_EXPLORACAO_NO_BRASIL_E_APLICACOES>, e em: <<http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170438>>. Acesso em: 15 dez. 2019, às 15:27.

FINCEN. FINANCIAL CRIMES ENFORCEMENT NETWORK. **Application of FinCEN's Regulations to Virtual Currency Mining Operations**, 30 jan. 2014. Disponível em: <https://www.fincen.gov/sites/default/files/administrative_ruling/FIN-2014-R001.pdf>. Acesso em: 06 out. 2020, às 14:31.

FIRJAN. Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro. Panorama da Inovação: Indústria 4.0. **Cadernos SENAI de Inovação**. abr. 2016. 20 p. pp. 4-18. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-inovacao/industria-4-0-1.htm>>. Acesso em: 07 out. 2020, às 15:06.

FREITAS JUNIOR, J. C. S.; OLIVEIRA, M.; MAÇADA, A. C. G.; BRINKHUES, R. A. **Big Data e Gestão do Conhecimento: Definições e Direcionamentos de Pesquisa**. XVIII SEMEAD - Seminários em Administração. ISSN: 2177-3866. nov. 2015. 18 p. p. 4. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283688036_Big_Data_e_Gestao_do_Conhecimento_Definicoes_e_Direcionamentos_de_Pesquisa/link/56433fae08ae451880a32844/download>. Acesso em: 12 out. 2020, às 12:39.

FREITAS, M.C.P. de. **A Transformação da China em Economia Orientada à Inovação**. IEDI - Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial. Ago. 2011, p. 1. Disponível em: <http://www.ipdeletron.org.br/wwwroot/pdf_publicacoes/17/A_transformacao_da_China_em_Economia_Orientada_a_Inovacao.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2019, às 16:11.

GARTNER, **Glossário**. 2020. Disponível em: <<https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/bigdata#:~:text=Big%20data%20is%20high%2Dvolume,decision%20making%2C%20and%20process%20automation.>>. Acesso em: 29 set. 2020, às 09:53.

GII. **Global Innovation Index**. Disponível em: <<https://www.globalinnovationindex.org/Home>>. Acesso em: 28 nov. 2020, às 12:28.

GOLEV, A.; SCOTT, M.; ERSKINE, P. D.; ALI, S. H.; BALLANTYNE G. R. **Rare Earth supply chains: Current status, constrains and opportunities** Williams-Jones (2017) - REE and Critical Metals Course. Resources Policy. ELSEVIER, 2014. pp. 52-59. Disponível em: <https://www.uvm.edu/giee/pubpdfs/Golev_2014_Resources_Policy.pdf>. Acesso em: 30 dez. 2019, às 17:09.

GRIMM, M.; CHRIST, A.; ANDERL, R. **Distributed Additive Manufacturing - Concept for the Application of JT (ISO 14306) as Downstream Process Format**, em ASME 2015 Internationals Design Engineering technical Conferences & Computers and Information Engineering Conference (IDETC/CIE), 2015. Disponível em: <<https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings-abstract/IDETC-CIE2015/57113/V004T05A004/254883>>. Acesso em: 02 dez. 2020, às 15:05.

GSCHEIDNER Jr., K.A.; CAPELLEN, J., eds.; 1787-1987: **Two hundred years of Rare Earths**; Rare-earth Information Center/North-Holland: Ames/ Amsterdam, 1987. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/en/document/read/10175132/1787-1987-two-hundred-years-of-rare-earths-ames-laboratory>>. Acesso em: 15 mai. 2019, às 08:01.

GUPTA, C. K.; KRISHNAMURTHY, N. **Extractive Metallurgy of Rare Earths**. CRC Press. 2005. 484p. Disponível em: <https://vector.umd.edu/images/links/Extractive_Metallurgy_of_Rare_Earths_Gupta.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2019, às 13:23.

GUTIERRES, L. N. M. **O conceito de big data: novos desafios, novas oportunidades**. Dissertação de Mestrado apresentada na Pontifícia Universidade Católica de São Paulo - PUC SP. São Paulo. 2017. 114 p. p. 34. Disponível em: <<https://tede2.pucsp.br/bitstream/handle/20455/2/Luna%20Neide%20Macedo%20Gutierrez.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2020, às 18:33.

HAI. **Human-Centered Artificial Intelligence**: Artificial Intelligence Index (AII). Stanford University. Disponível em: <<https://hai.stanford.edu/>>. Acesso em: 29 nov. 2020, às 07:01.

HOTZA, D. **Prototipagem rápida de pilhas a combustível de óxido sólido**. Revista Matéria. V. 14, N. 4. ISSN: 1517-7076. Laboratório de Hidrogênio PEMM/COPPE/UFRJ. 2009. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11102/>>. Acesso em: 02 dez. 2020, às 16:13.

IFR. **International Federation of Robotics**. Disponível em: <<https://ifr.org/>>. Acesso em: 20 dez. 2020, às 09:41.

IMD. International Institute for Management Development (Business School). **World Competitiveness Yearbook**. Disponível em: <<https://www.imd.org/>>. Acesso em: 26 nov. 2019, às 11:17.

INPI. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. **Radar Tecnológico**, Terras Raras. Rio de Janeiro. 2016. N. 12. 13p. pp. 5-6. Disponível em: <<http://antigo.inpi.gov.br/menu-servicos/informacao/arquivos/n12-radar-tecnologico-terras-raras.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2019, às 13:36.

IPEA. **Texto para Discussão**, n. 2103. Desenvolvimentismo: A Construção do Conceito. Pedro Cezar Dutra Fonseca. Brasília, jul. 2015. p. 12 e 40.

IUPAC. International Union of Pure and Applied Chemistry. **Periodic Table of the Elements**. 2017. Disponível em: <<https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/>>. Acesso em: 07 dez. 2019, às 08:01.

_____, 2016. Disponível em: <https://iupac.org/wp-content/uploads/2015/07/IUPAC_Periodic_Table-28Nov16.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2019, às 07:32.

JAMES, C.; **Journal of the American Chemical Society**. 1911, 33, 1332. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ja02221a007>>. Acesso em: 14 ago. 2019, às 11:46.

JENSEN, W. B. Classification, Symmetry and the Periodic Table. **Computers & Mathematics with Applications**. Vol. 12B. Nos. I/2. pp. 487-510~ 1986 0886-9561/86 \$3.00+ .00 Printed in Great Britain. © 1986 Pergamon Press Ltd. 1986, 12B, 487. [CrossRef]. Disponível em: <<http://www.che.uc.edu/jensen/w.%20b.%20jensen/Reprints/028.%20Periodic%20Table.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2019, às 12:34.

JOHNSON, Chalmers. **The developmental state**: odyssey of a concept. In: WOO-CUMINGS, M. The developmental state. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1999.

JORDENS, A.; CHENG Y. P.; WATERS, K. E. A review of the beneficiation of rare earth element bearing minerals. Department of Mining and Materials Engineering, McGill University, 3610. University, Montreal, Quebec, Canada H3A 0C5. **Minerals Engineering**. Editora Elsevier, 2013. pp. 97-114. Disponível em: <<https://ecotricity.co.nz/wp-content/uploads/2016/12/161207-Rare-Earth-mining-techniques-and-improvement.pdf>>. Acesso em: 28 dez. 2019, às 23:01.

KANG, H. et al. Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 3, n.1, pp. 111-128. 2016. Disponível em: <<https://www.coursehero.com/file/21614014/Smart-Manufacturing-Past-Research-Present-Findings-and-Future-Directions/>>. Acesso em: 11 nov. 2020, às 14:01.

KHAN, Maqbool et al. Big data challenges and opportunities in the hype of Industry 4.0. **2017 Ieee International Conference on Communications (icc)**, [s.l.]. mai. 2017. pp.325-331. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icc.2017.7996801>. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7996801/?reload=true>>. Acesso em: 12 out. 2020, às 14:47.

KUPFER, D. **Indústria 4.0 Brasil**. Valor Econômico. 08 ago. 2016. Disponível em: <<https://valor.globo.com/opiniao/coluna/industria-4-0-brasil.ghtml>>, e em:

<<http://www.robertomoraes.com.br/2016/08/industria-40-no-brasil-por-david-kupfer.html>>. Acesso em: 23 dez. 2020, às 11:55.

LAPIDO-LOUREIRO, F.E. Terras-raras no Brasil: depósitos, recursos identificados, reservas. **Série Estudos e Documentos**, **21**, **CETEM**, 1994. p. 189. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/287>>. Acesso em: 07 dez. 2019, às 08:17.

LEONE, M.; ROBOTTI, N.; Os elementos são elementares? Respostas químicas e espectroscópicas do século XIX. **Physics in Perspective**. 2003, 5, pp. 360-383. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00016-003-0176-9>>. Acesso em: 12 ago. 2019, às 12:07.

LIAO, Y.; LOURES, E. R.; DESCHAMPS, F.; BREZINSKI, G.; VENÂNCIO, A. **The impact of the fourth industrial revolution: a cross-country/region comparison**. Prod. vol.28. São Paulo. 2018. Epub Jan 15, 2018. Print version ISSN: 0103-6513. On-line version ISSN 1980-5411. DOI: <<https://doi.org/10.1590/0103-6513.20180061>>. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132018000100401>. Acesso em: 03 dez. 2020, às 14:25.

LYNAS CORPORATION LTD. **2020a**. Disponível em: <<https://www.lynascorp.com/>>. Acesso em: 11 jan. 2020, às 14:29.

LYNAS CORPORATION LTD. **2020b**. Disponível em: <<https://www.lynascorp.com/products/what-are-rare-earths/#collapseOne>>. Acesso em: 11 jan. 2020, às 16:16.

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012 - 2015: Balanço das Atividades Estruturantes 2011**. Brasília - DF. 2012. 220p. pp. 15-16. Disponível em: <<https://livroaberto.ibict.br/218981.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2020, às 14: 13.

MCTIC - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Minerais Estratégicos**. Brasília. out. 2018. 50p. pp. 22-23. Disponível em: <<https://www.almg.gov.br/export/sites/default/acompanhe/eventos/hotsites/2019/forum-tecnico-ciencia/documentos/material-de-referencia/03plano-ciencia-tecnologia.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2020, às 18:07.

_____. **Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Minerais Estratégicos (2018-2022)**. Minuta. Brasília. out. 2018. 25p. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/a->

camara/estruturaadm/altosestudos/pdf/plano-de-ciencia-tecnologia-e-inovacao-para-minerais-estrategicos-2018-2022>. Acesso em: 14 set. 2020, às 11:44.

MEDEIROS, C. A. de; TREBAT, N. M. **Transforming natural resources into industrial advantage:** the case of China's rare earths industry. *Revista de Economia Política* (impresso), v. 37, no.3 São Paulo. pp. 504-526, Jul-set. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/0101-31572017v37n03a03>>. Acesso em: 06 abr. 2021, às 11:27.

MEDEIROS, C. A. de. **Recursos Naturais, Nacionalismo e Estratégias de Desenvolvimento.** *Revista Oikos* (Rio de Janeiro). V. 12, No. 2, p. 143. pp. 143-167. 2013. Disponível em: <<http://www.revistaoikos.org/seer/index.php/oikos/article/viewArticle/344>>. Acesso em: 06 abr. 2021, às 17:24.

MERTIE JR., J. B.; **Monazite Deposits of the Southeastern Atlantic States, Geological Survey Circular:** Washington, D. C., 1953. 35pp. p. 6. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/circ/1953/0237/report.pdf>>. Acesso em: 08 jul. 2020, às 13:52.

MME - Ministério de Minas e Energia; MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia (Brasil). Grupo de Trabalho Interministerial MME – MCT de Minerais Estratégicos [GTI-ME]. **Relatório Final.** Brasília, 2010. 62p. Disponível em: <<https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/21142>>. Acesso em: 27 set. 2019, às 12:09.

MORAES, L. **Qual o impacto da Inteligência Artificial na economia do Brasil?** Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada - ICA / DEE / PUC-Rio. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). 20 dez. 2019. Disponível em: <<http://www.ica.ele.puc-rio.br/2019/12/qual-o-impacto-da-inteligencia-artificial-na-economia-do-brasil/>>. Acesso em: 11 nov. 2020, às 13:01.

NCE - Núcleo de Computação Eletrônica. UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Mestrado de Informática Aplicado à Educação. **Visão Geral Sobre Inteligência Artificial.** 2020. Disponível em: <[http://www.nce.ufrj.br/GINAPE/VIDA/ia.htm#:~:text=A%20Intelig%C3%A2ncia%20Artificial%20\(IA\)%20%C3%A9,no%20famoso%20encontro%20de%20Dartmouth.](http://www.nce.ufrj.br/GINAPE/VIDA/ia.htm#:~:text=A%20Intelig%C3%A2ncia%20Artificial%20(IA)%20%C3%A9,no%20famoso%20encontro%20de%20Dartmouth.)>. Acesso em: 19 out. 2020, às 14:34.

NIST - National Institute of Standards and Technology. **The NIST Definition of Cloud Computing:** Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. Editores: Peter Mell e Timothy Grance. 7 p. set. 2011. Disponível em: <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>>. acesso em: 13 out. 2020, às 14:27.

OVERSTREET, W. C.; **The Geologic Occurrence of Monazite**. Geological Survey Professional Paper Vol. 530: Washington, D. C., 1967. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/pp/0530/report.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2020, às 17:31.

PETROVIC, V.; GONZALEZ, J. V. H.; FERRANDO, O. J.; GORDILLO, J. D.; PUCHADES, J. R. B.; GRIÑAN, L. P. **Additive layered manufacturing**: sectors of industrial application shown through case studies, em Int. J. Prod. Res., vol.49, no.4, pp. 1061-1079, 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/233164308_Additive_layered_manufacturing_Sectors_of_industrial_application_shown_through_case_studies>. Acesso em: 02 dez. 2020, às 13:35.

PIMENTA, V. O. **Tendências Tecnológicas no Ramo da Robótica Autônoma**: um estudo prospectivo de patentes. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (POLI/UFRJ). dez. 2018. 112 p. p. 9. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10027052.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2020, às 09:09.

PIMENTEL, G. C.; SPRATELY, R. D.; **Understanding Chemistry**, Holden-Day: San Francisco, 1971. Journal of Molecular Structure. V. 21, Ed. 3, pp. 341-486. p. 477. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0022-2860\(74\)80108-0](https://doi.org/10.1016/0022-2860(74)80108-0)>, e em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022286074801080?via%3Dihub>>. Acesso em: 14 ago. 2019, às 08:37.

PIRES, H. F. *Bitcoin*: a moeda do ciberespaço. **Geosp - Espaço e Tempo** (Online), V. 21, N. 2, p. 407-424, ago. 2017. ISSN: 2179-0892. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/134538>>. doi: 10.11606/issn.2179-0892.geosp.2017.134538. Acesso em: 06 out. 2020, às 14:10.

PNM, 2030 - **Plano Nacional de Mineração, 2030**: Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ministério de Minas e Energia. Brasília - DF, fev. 2011. 174 p. p. 64. Disponível em: <<http://www.agp.org.br/wp-content/uploads/2011/06/planoNacionalMinera.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2020, às 12:33.

QUÍMICA VIVA. **Terras Raras**. CRQ4 - Conselho Regional de Química da 4 Região. 2019. p. 1. Disponível em: <https://www.crq4.org.br/print_ver.php?p=8332>. Acesso em: 25 nov. 2019, às 14:47.

QIN, Jian; LIU, Ying; GROSVENOR, Roger. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. **Procedia Cirp**, [s.l.], v. 52, pp.173-178, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711630854X?via=ihub#bib10005>>. Acesso em: 17 set. 2020, às 13:43.

REIS, C. F. de B. **Efeitos de encadeamento e diversificação industrial comercial e produtiva:** uma análise da Indonésia, Malásia e Tailândia entre 1980 e 2010. Economia e Sociedade (UNICAMP), v. 25, n. 1, p. 52, pp. 51-85. Jan-abr. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1982-3533.2016v25n1art3>>. Acesso em: 07 abr. 2021, às 14:56.

_____. **Recursos Naturais e Desenvolvimento Econômico:** da especialização à diversificação produtiva e exportadora nos SEANICs. Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IE/UFRJ). 232 p. p. 14. Dez. 2012. Disponível em: <<https://www.ie.ufrj.br/pos-graduacao-j/pos-graduacao-em-economia/ppge-dissertacoes-e-teses.html#doutorado>>. Acesso em: 07 abr. 2021, às 22:08.

RODRIGUES, G. P.; PORTO, C. M. **Realidade Virtual:** conceitos, evolução, dispositivos e aplicações. Interfaces Científicas - Educação. Aracaju, Sergipe. V.01. N.03. 13 p. pp. 97-109. jun. 2013. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/27d9/9e10d041fdb3b042df8938dc8000181d16e8.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2020, às 15:45.

ROMMEL, S.; FISCHER, A. **Additive Manufacturing - A Growing Possibility to Lighten the Burden of Spare Parts Supply**, em Digital Product and Process Development Systems, 2013.

RÜßMANN, Michael; LORENZ, Markus; WALDNER, Manuela; ENGEL, Pascal; HARNISCH, Michael; GERBERT, Philipp; JUSTUS, Jan. **Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries.** BCG.com. 2015. Disponível em: <https://www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries/>. Acesso em: 22 set. 2020, às 13:34.

SAEZ-PUCHE, R.; CARO, P., eds.; **Rare Earths;** Editorial Complutense: 1. Ed. 128 pp. Madrid, jan. 1998. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=P4UCrfp_s0EC&oi=fnd&pg=PA11&dq=Saez-Puche,+R.%3B+Caro,+P.+\(Eds.\)%3B+Rare+Earths,+Editorial+Complutense:+Madrid,+1998.&ots=H-nqQHke_K&sig=0e6Xt4_wlZ4c8JHMEI9Q_jEIhe4#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=P4UCrfp_s0EC&oi=fnd&pg=PA11&dq=Saez-Puche,+R.%3B+Caro,+P.+(Eds.)%3B+Rare+Earths,+Editorial+Complutense:+Madrid,+1998.&ots=H-nqQHke_K&sig=0e6Xt4_wlZ4c8JHMEI9Q_jEIhe4#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em: 16 ago. 2019, às 12:07.

SANTOS, P. C. M.; **O Brasil nas Exposições Universais (1862 a 1911):** mineração, negócio e Publicações. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009. Disponível em:

<http://www.repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/287014/1/Santos_PauloCoelhoMesquita_M.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2020, às 16:58.

SASTRI, V.R.; BÜNZLI, J.-C.G.; RAO, V.R.; RAYUDU, G.V.S.; PERUMAREDDI, J.R.; **Modern Aspects of Rare Earth and their Complexes**, Elsevier: Amsterdam, 2003. Disponível em: <<https://epdf.pub/queue/modern-aspects-of-rare-earths-and-their-complexes.html>>. Acesso em: 14 mai. 2019, às 11:39.

SCHNEIDER, Carlos. **BRASIL: Fornecedor Mundial de Ímãs e outros produtos de Terras Raras**. Apresentação realizada em 14 mai. 2013. Grupo de Trabalho Cadeia Produtiva de Ímãs de TR no Brasil. SENADO FEDERAL. Disponível em: <http://www.senado.leg.br/comissoes/CCTSTTR/AP/AP20130514_CarlosSchneider.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2020, às 13:35.

SCHUMPETER, Joseph A. **Teoria do desenvolvimento econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico**. São Paulo: Abril Cultural, 1982.

SCHUTZER, D. **Artificial intelligence: an applications-oriented approach**. New York: Van Nostrand Reinhold Company. V. 7. 1987. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177%2F089443938900700230>>. Acesso em: 19 out. 2020, às 15:15.

SCORZELLI, I.B., TOREM, M. L. e ANTONELLO, L. L. **Flotação de minerais de terras-raras: Uma revisão da literatura**. 48º Congresso Anual ABM. V. I, pp. 29-45, 1993.

SENADO FEDERAL. **Subcomissão Temporária de Elaboração do Projeto de Lei do Marco Regulatório da Mineração e da Exploração de Terras Raras no Brasil - CCTSTTR**. Relator: Luiz Henrique da Silveira (PMDB-SC). 38p. 2012. Disponível em: <http://www.senado.leg.br/comissoes/CCT/REL/Rel_Final_Sen_Luiz_Henrique.pdf>. Acesso em: 14 set. 2020, às 14:38.

SERRA, O. A.; LIMA, J. F.; DE SOUSA FILHO, P. C.; **A Luz e as Terras Raras**. Rev. Virtual Quim. 2015, 7, pp. 242-266. Disponível em: <<http://static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/v7n1a12.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2019, às 07:22.

SILVA, D. G. da. **Indústria 4.0: Conceito, tendências e desafios**. UFTPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2017. 42 p. pp. 11-17. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8508/1/PG_COAUT_2017_2_02.pdf>. Acesso em: 22 set. 2020, às 10:48.

SILVA, M. B. F. da. Terras Raras. DNPM-SEDE. **Sumário Mineral, 2008**. p. 2. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2008/terrasraras>>. Acesso em: 30 nov. 2019, às 13:04.

SPEDDING, F.H.; VOIGT, A.F.; GLADROW, E.M.; SLEIGHT N.R.; **J. Am. Chem. Soc.** 1947, 69, 2777. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ja01203a058>>. Acesso em: 12 set. 2019, às 12:03.

SPEDDING, F.H.; VOIGT, A.F.; GLADROW, E.M.; SLEIGHT N.R.; POWELL, J.E.; WRIGHT, J.M.; BUTLER, T.A.; FIGARD, P.; **J. Am. Chem. Soc.** 1947, 69, 2786. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ja01203a060>>. Acesso em: 12 set. 2019, às 12:21.

SPEDDING, F.H.; FULMER, E.I.; BUTLER, T.A.; GLADROW, E.M.; GOBUSH, M.; PORTER, P.E.; POWELL, J.E.; WRIGHT, J.M.; **J. Am. Chem. Soc.** 1947, 69, 2812. Disponível em: <<https://doi.org/10.1021/ja01203a063>>. Acesso em: 12 set. 2019, às 13:09.

USGS - United States Geological Survey. **Mineral Commodity Summaries 2020**. p. 133. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2020, às 10:01.

_____. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information>>. Acesso em: 15 nov. 2019, às 08:04.

VIERA, E. V.; LINS, F. A. F. **Concentração de minérios de terras-raras: uma revisão**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, N. 73. 1997. pp. 4-14. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/127/1/stm-73.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2019, às 14:40.

VLASOV, K.A. (ed.). Geochemistry and mineralogy of rare elements and genetic types of their deposits. Vol. 1: **Geochemistry of rare elements**. 1966. 688 p. Israel Program for Scientific Translations (english transi.). Jerusalem. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0009254169900321?via%3Dihub>>. Acesso em: 07 dez. 2019, às 10:14.

WADE, Robert. **After The Crisis: Industrial Policy & Developmental State**. London School of Economics. March 2010.

WAHLSTER, Wolfgang. **Industrie 4.0: Cyber-Physical Production Systems for Mass Customization. Prague**, apr 11, 2016. 55 p. p. 4. Disponível em: <http://www.dfki.de/wwdata/German-Czech_Workshop_on_Industrie_4.0_Prague_11_04_16/Industrie_4_0_Cyber-Physical_Production_Systems_for_Mass_Customizations.pdf>. Acesso em: 22 set. 2020, às 15:15.

WEEKS, M.E.; **Discovery of the Elements**, 6th ed., Journal of Chemical Education: Easton, 1956. Disponível em: <<https://archive.org/details/discoveryoftheel002045mbp/mode/2up>>. Acesso em: 13 mai. 2019, às 09:08.

WERTS, M.H.V.; **Sci. Prog.** 2005, 88, 101. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.3184/003685005783238435>>. Acesso em: 12 mai. 2019, às 12:21.

WIKIPEDIA. **Gadolinita**. 2019. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Gadolinite>>. Acesso em: 30 dez. 2019, às 18:02.

WEF - WORLD ECONOMIC FORUM. **Deep Shift: Technology Tipping Points and Societal Impact**. 2015. 44 p. p. 6. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/WEF_GAC15_Technological_Tipping_Points_report_2015.pdf>. Acesso em: 29 set. 2020, às 14:44.

WU, C.; YUAN, Z.; BAI, G. Rare earth deposits in China. W: **Rare Earth Minerals: Chemistry, Origin and Ore Deposits**. 1996. London: Chapman & Hall. Chapter Eleven. pp. 281-310. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/292731546_Rare_earth_deposites_in_China_W_Rare_Earth_Minerals_Chemistry_origin_and_ore_deposits>. Acesso em: 28 dez. 2019, às 23:18.

ZHOU, Keliang; LIU, Taigang; ZHOU, Lifeng. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. **2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (fskd)**, Zhangjiajie, pp.2147-2152, ago. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/fskd.2015.7382284>. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7382284>>. Acesso em: 17 set. 2020, às 13:13.

ANEXOS

Anexo A - Modelo de Mínimos Quadrados Ordiniais para Dados Empilhados - Pooled (resultados)

```

. reg compet_mundial compet_dig_mundial robos inovacao startups_ia reservas_tr minas_tr reservas_y_tr minas_y_tr

```

Source	SS	df	MS			
Model	51012.7558	8	6376.59447	Number of obs = 243		
Residual	60281.8944	234	257.614933	F(8, 234) = 24.75		
Total	111294.65	242	459.895249	Prob > F = 0.0000		
				R-squared = 0.4584		
				Adj R-squared = 0.4398		
				Root MSE = 16.05		

compet_mundial	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
compet_dig_mundial	.0440498	.0977333	0.45	0.653	-.1484997	.2365994
robos	-.0003089	.000077	-4.01	0.000	-.0004607	-.0001571
inovacao	.5220264	.0657938	7.93	0.000	.3924025	.6516503
startups_ia	-.009907	.0064634	-1.53	0.127	-.022641	.0028269
reservas_tr	1.36e-07	1.39e-07	0.98	0.330	-1.38e-07	4.10e-07
minas_tr	.0004257	.0001285	3.31	0.001	.0001725	.0006789
reservas_y_tr	-.0000892	.00003	-2.98	0.003	-.0001483	-.0000302
minas_y_tr	-.0047376	.0015527	-3.05	0.003	-.0077967	-.0016785
_cons	14.11819	1.487561	9.49	0.000	11.18747	17.04892

. end of do-file

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados gerados no programa STATA_MP 13.

Anexo D - Teste de Hausman (resultados)

- H_0 (hipótese nula): efeitos aleatórios (não há correlação entre as variáveis X_{is} e o termo de erro);
- H_1 (hipótese alternativa): modelo de efeitos aleatórios não recomendado (possível correlação entre as variáveis X_{is} e o termo de erro).

```
. hausman fe re

Note: the rank of the differenced variance matrix (7) does not equal the number of coefficients being tested (8); be sure this is what you
expect, or there may be problems computing the test. Examine the output of your estimators for anything unexpected and possibly
consider scaling your variables so that the coefficients are on a similar scale.
```

	Coefficients		(b-B) Difference	sqrt(diag(V_b-V_B)) S.E.
	(b) fe	(B) re		
compet_dig~1	.1819576	.0440498	.1379078	.
robos	-.0000449	-.0003089	.000264	.
inovacao	.1676535	.5220264	-.3543729	.
startups_ia	-.0007506	-.009907	.0091564	.
reservas_tr	-2.56e-07	1.36e-07	-3.92e-07	.
minas_tr	.000114	.0004257	-.0003117	.
reservas_y~r	.0000153	-.0000892	.0001046	.0000148
minas_y_tr	-.0012294	-.0047376	.0035082	.

```

      b = consistent under Ho and Ha; obtained from xtreg
      B = inconsistent under Ha, efficient under Ho; obtained from xtreg

Test: Ho: difference in coefficients not systematic

      chi2(7) = (b-B)'[(V_b-V_B)^(-1)](b-B)
              = -112.37   chi2<0 ==> model fitted on these
                          data fails to meet the asymptotic
                          assumptions of the Hausman test;
                          see suest for a generalized test

.
end of do-file
```

Fonte: Elaboração própria, com base nos resultados gerados no programa STATA_MP 13.