

CRITICIDADE DAS TERRAS RARAS PARA APLICAÇÃO EM VEÍCULOS
ELÉTRICOS E NA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Sérgio Eduardo Meirelles de Paula Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira
Filho

Rio de Janeiro
Setembro de 2017

CRITICIDADE DAS TERRAS RARAS PARA APLICAÇÃO EM VEÍCULOS
ELÉTRICOS E NA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Sérgio Eduardo Meirelles de Paula Junior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Examinada por:

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Prof. Lino Guimarães Marujo, D.Sc.

Prof. Alexandre Louis de Almeida D'Avignon, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
SETEMBRO DE 2017

Paula Junior, Sérgio Eduardo Meirelles de

Criticidade das terras raras para aplicação em veículos elétricos e na energia eólica no Brasil/ Sérgio Eduardo Meirelles de Paula Junior. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XV, 131 p.; 29,7 cm.

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Produção, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 107-119.

1. Terra rara. 2. Ímã NdFeB. 3. Criticidade. I. Ferreira Filho, Virgílio José Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

AGRADECIMENTOS

A minha grande amiga e maior incentivadora, Isinha, que esteve ao meu lado praticamente em todos os dias e noites viradas durante a produção dessa dissertação. Se não fosse por ela, provavelmente não teria concluído.

Agradeço também a minha família, especialmente meus pais, pelo apoio e motivação constante.

Ao amigo e sócio, Mauro, por ter segurado os problemas no trabalho enquanto produzia o texto.

Ao professor e orientador Rogerio Valle (*in memoriam*) pelo incentivo e confiança.

Ao professor Alexandre, por ter me colocado de volta ao foco e pela participação na banca de defesa.

Ao professor Virgílio, por ter aceitado se tornar meu orientador e ao professor Lino, pela participação na banca de defesa.

Aos alunos e companheiros do SAGE, Dejair, Sandrine, Alba, Leonardo, Carla, Bruna e Carol, pelo auxílio e parceria.

Não posso esquecer os funcionários do SAGE, Seu Zé, Soyla, Rocha, Juliano, Sheila e Rafa, que deram todo o apoio durante o caminho percorrido.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

CRITICIDADE DAS TERRAS RARAS PARA APLICAÇÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS E NA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Sérgio Eduardo Meirelles de Paula Junior

Setembro/2017

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

Os elementos de terra rara são componentes importantes nas tecnologias que visam a descarbonização da economia, como os carros elétricos e turbinas eólicas. Em 2010, a China, maior produtor mundial desses elementos, criou dificuldades para exportá-los. Países dependentes da oferta chinesa viram os preços aumentarem mais de 600% no ano seguinte e ficaram receosos quanto à estabilidade do suprimento. Assim, foram realizados diversos estudos de criticidade que avaliavam se esses elementos poderiam ser um gargalo para a consolidação dos planos de expansão da frota de veículos elétricos e da energia eólica. O Brasil possui a segunda maior reserva desses elementos e pretende criar uma cadeia produtiva de terra rara com produtos de alto valor agregado. Diante disso, o presente estudo tem o objetivo de avaliar se os elementos de terra rara poderiam vir a ser um gargalo para os planos brasileiros de expansão da frota de veículos elétricos e da energia eólica.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CRITICALITY OF THE RARE EARTH ELEMENTS ON ELECTRIC VEHICLES AND
WIND ENERGY APPLICATIONS IN BRAZIL

Sérgio Eduardo Meirelles de Paula Junior

September /2017

Advisor: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Production Engineering

Rare earth elements are important components in technologies aimed at decarbonising the economy, such as electric cars and wind turbines. In 2010, China, the world's largest producer of these elements, created difficulties to export them. The dependent countries on Chinese supply have suffered an increase of the prices of more than 600% the following year and were worried about the supply. Thus, several criticality studies were carried out to evaluate whether these elements could be a bottleneck for the consolidation of the fleet expansion plans for electric vehicles and wind energy. Brazil has the second largest reserve of these elements and intends to create a rare earth productive chain with products with high added value. Therefore, the present study has the objective of evaluating if the elements of rare earth could become a bottleneck for the Brazilian plans to expand the fleet of electric vehicles and wind energy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS	4
1.2	METODOLOGIA.....	4
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2	TERRAS RARAS	7
2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE TERRA RARA.....	7
2.2	MINERALOGIA.....	11
2.3	DEPÓSITOS DE TERRAS RARAS NO MUNDO E NO BRASIL.....	17
2.3.1	DEPÓSITOS NA CHINA.....	20
2.3.2	DEPÓSITOS NO BRASIL.....	22
2.4	APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DAS TERRAS RARAS	25
2.5	CADEIA PRODUTIVA DAS TERRAS RARAS.....	28
2.5.1	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS.....	29
2.6	IMPACTOS AMBIENTAIS DA MINERAÇÃO DAS TERRAS RARAS.....	36
3	MERCADO DAS TERRAS RARAS	39
3.1	RESERVAS E OFERTA DAS TERRAS RARAS.....	40
3.2	DEMANDA DE TERRAS RARAS NO MUNDO.....	51
3.3	PREÇOS	55
3.4	A CHINA E A CONQUISTA DO MONOPÓLIO	57
4	RISCO DE SUPRIMENTO E CRITICIDADE	63
4.1	CRITICIDADE DAS TERRAS RARAS.....	69
4.2	RISCO DE SUPRIMENTO DAS TERRAS RARAS NO SETOR DE TRANSPORTE E ENERGÉTICO PARA O BRASIL.....	74
4.2.1	SETOR DE TRANSPORTE	76
4.2.1.1	ASPECTOS TECNOLÓGICOS DOS VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS.....	78

4.2.1.2	PROJEÇÃO DA QUANTIDADE DE ELEMENTOS DE TERRA RARA NOS VEÍCULOS HÍBRIDOS E ELÉTRICOS PARA 2050	80
4.2.2	SETOR ENERGÉTICO.....	84
4.2.2.1	ASPECTOS TECNOLÓGICOS DE TURBINAS EÓLICAS <i>ONSHORE</i>	89
4.2.2.2	PROJEÇÃO DA QUANTIDADE DE ELEMENTOS DE TERRA RARA NAS TURBINAS EÓLICAS PARA 2050	96
5	CONCLUSÃO	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107
	APÊNDICE I	120
	APÊNDICE II	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tabela periódica com os ETR destacados.....	8
Figura 2 - Abundância relativa (átomos de elementos por 10^6 átomos de Si) de elementos químicos na crosta continental superior em função do número atômico.	10
Figura 3 - Mapa com a distribuição mundial de depósitos de TR	20
Figura 4 - Mapa da China com as províncias ricas em ETR em destaque	21
Figura 5 - Mapa ocorrências de ETR no Brasil.....	24
Figura 6 - Fluxograma da produção de óxidos de TR (OTR).....	29
Figura 7 - Esquema resumido do processo de produção do ímã NdFeB	32
Figura 8 - Relações entre Resultados de Exploração Mineral, Recursos Minerais e Reservas de Minério.....	41
Figura 9 – Gráfico das reservas mundiais de TR por países referente a 2016.....	44
Figura 10 - Produção mundial de OTR de 1900 a 2014	45
Figura 11 - Produção de óxidos de terra rara no Brasil.....	47
Figura 12 - Gráfico da participação da produção mundial de OTR de 2016	48
Figura 13 - Participação da China na produção mundial de OTR	49
Figura 14- Participação da produção de OTR por elementos em 2015.....	50
Figura 15 - Consumo de OTR por país em 2014	52
Figura 16 - Participação do consumo industrial por valor em 2015	54
Figura 17 - Participação do consumo industrial por volume em 2015	54
Figura 18 - Evolução dos preços dos Óxidos de Terras Raras	56
Figura 19 - Matriz de criticidade desenvolvida pelo NRC (2008).....	66
Figura 20 - Matriz espacial de criticidade	68
Figura 21 - Matriz de criticidade das TR.....	70
Figura 22 - Matriz de criticidade da Comissão Europeia de 2010	71
Figura 23 - Matriz de criticidade da Comissão Europeia de 2013	71
Figura 24 - Matriz de criticidade de curto prazo do US DoE (2011).....	72

Figura 25 - Matriz de criticidade de longo prazo do US DoE (2011).....	73
Figura 26 - Perfil de vendas de automóveis para o Brasil até 2050.....	81
Figura 27 - Gráfico do total de vendas de comerciais leves até 2050	82
Figura 28 - Capacidade instalada mundial 2001-2016	85
Figura 29 - Evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil	87
Figura 30 - Previsão de expansão eólica (MW).....	87
Figura 31 - Divisão básica da turbina eólica.....	90
Figura 32 - Tipos de configurações.....	91
Figura 33 - Configurações de turbinas eólicas encontradas no Brasil até out/2015	93
Figura 34 - Participação dos tipos de turbina nas capacidades instaladas.....	94
Figura 35 - Projeção de crescimento da capacidade instalada de energia eólica até 2050	99
Figura 36 - Projeção de vendas de veículos leves de 2015 a 2050 no Brasil.....	123
Figura 37 - Estimativa da participação da produção de OTR por elementos em 2015	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Elementos de terras raras, número atômico, classificação e concentração média na crosta terrestre	9
Tabela 2 - Principais minerais de TR	12
Tabela 3 - Proporção de ETR em monazitas (%).....	14
Tabela 4 - Teor de terra rara em diversos depósitos.....	16
Tabela 5 - Principais aplicações por elementos de terra rara.....	26
Tabela 6 - Produção mundial de ímãs permanentes em 2016	34
Tabela 7 - Reservas mundiais de TR em 10 ³ t.....	43
Tabela 8 - Produção mundial de OTR (2007-2016)	46
Tabela 9 - Demanda mundial em 2015.....	53
Tabela 10 - Massa de ímã no motor por veículo	79
Tabela 11 - Proporção em massa dos ETR nos ímãs.....	80
Tabela 12 - Demanda futura de ETR para aplicação em motores de veículos híbridos e elétricos do Brasil	83
Tabela 13 - Geração de energia elétrica por fontes renováveis	85
Tabela 14 - Previsão de participação das turbinas eólicas até 2030 no cenário mundial	95
Tabela 15 - Previsão de participação das turbinas eólicas no Brasil até 2050	96
Tabela 16 - Participação por fonte na geração de energia elétrica.....	96
Tabela 17 - Capacidade instalada por fonte no CPG (MW).....	97
Tabela 18 - Capacidade instalada ano a ano.....	98
Tabela 19 - Massa de ímã NdFeB por MW (t/MW)	99
Tabela 20 - Composição dos ímãs NdFeB utilizados nas turbinas eólicas.....	100
Tabela 21 - Demanda futura de ETR para aplicação em turbinas eólicas no Brasil ..	100
Tabela 22 - Estimativa do número de automóveis híbridos e elétricos vendidos entre 2015 e 2050 no Brasil.....	121

Tabela 23 - Estimativa do número de veículos comerciais leves híbridos vendidos entre 2015 e 2050 no Brasil	122
Tabela 24 - Produção de OTR (t) por país	124
Tabela 25 - Proporção de OTR (%) em minas chinesas	125
Tabela 26 - Proporção de OTR em minas não chinesas (%)	126
Tabela 27 - Cotas de produção e produção ilegal da China.....	127
Tabela 28 - Produção estimada de OTR por país em 2015 (t)	128
Tabela 29 - Massa dos ETR para cálculos estequiométricos	129
Tabela 30 - Produção de ETR estimado em 2015 (t)	130

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de depósitos de terras raras/número de ocorrências documentadas, características, principais exemplos.....	18
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACREI	<i>Association of China Rare Earth Industry</i>
AM	Amazonas
ANFAVEA	Associação dos Fabricantes de Veículos Automotores
ANM	Agência Nacional de Mineração
BA	Bahia
BEN	Balanço Energético Nacional
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BGR	<i>German Federal Institute for Geosciences</i>
BGS	<i>British Geological Survey</i>
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CCT	Comissão de Ciência, Tecnologia, Comunicações e Informática
CEDES	Centro de Estudos e Debates Estratégicos
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CODEMIG	Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais
CPG	Cenário do Plano Governamental
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CREI	<i>China Rare Earth Information</i>
CRIRSCO	<i>Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards</i>
DFIG	<i>Double Fed Induction Generator</i>
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DTM	Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral
EESG	<i>Electrically Excited Synchronous Generator</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETR	Elementos de Terra Rara
ETRL	Elementos de Terra Rara Leves
ETRP	Elementos de Terra Rara Pesados

EU	<i>European Union</i>
EUA	Estados Unidos da América
EV	<i>Electric Vehicle</i>
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>
GEE	Gases do Efeito Estufa
GO	Goiás
GWEC	<i>Global Wind Energy Council</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INDC	<i>Intended Nationally Determined Contributions</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
LASUP	Laboratório de Aplicações de Supercondutores
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MG	Minas Gerais
MIIT	<i>Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
NRC	<i>Natitonal Research Council</i>
OMC	Organização Mundial do Comércio
OTR	Óxidos de Terra Rara
PA	Pará
PDE	Planos Decenais de Energia
PEA	<i>Preliminary Economic Assessment</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>

PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i>
PNE	Plano Nacional de Energia
PNE2050	Plano Nacional de Energia 2050
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PR	Paraná
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
REPM	<i>Rare Earth Permanent Magnet</i>
RR	Roraima
SC	Santa Catarina
SCIM	<i>Squirrel Cage Induction Motor</i>
SET-Plan	<i>European Strategic Energy Technology Plan</i>
SGM	Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral
SIGEL EOL	Sistema de Informação Geográfica de Usinas Eólicas
SP	São Paulo
TR	Terra Rara
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
US DoE	<i>United States Department of Energy</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VLT	Veículo Leve sobre Trilho
WRIG	<i>Wound-Rotor Induction Generator</i>

1 INTRODUÇÃO

Os elementos de terra rara (ETR) são componentes críticos para o funcionamento de muitos dispositivos que fazem parte do nosso dia a dia como: *smartphones*, carros, computadores, televisores e lâmpadas. As propriedades únicas presentes nesses elementos são essenciais para a expansão das chamadas tecnologias verdes, as quais têm o objetivo de diminuir a dependência de combustíveis não renováveis e melhorar a eficiência energética.

Com o constante aumento de demanda de energia e buscas por fontes mais limpas, os ETR ganharam interesse econômico, político e acadêmico nos últimos anos. Principalmente depois que a China, maior produtor exportador de terra rara (TR) do mundo, desde a década de 1990, anunciou uma redução nas cotas de exportação em 2010. Os ETR são compostos por 17 elementos, sendo os 15 da família dos lantanídeos mais o escândio (Sc) e ítrio (Y).

A importância dos ETR na indústria está no fato de que muitos desses elementos estão presentes em sistemas de energia eólica, motores elétricos e sistemas de iluminação de alta eficiência, veículos híbridos e elétricos, além da indústria aeroespacial e de defesa.

Os recursos de TR estão distribuídos por todo o planeta, inclusive no Brasil, onde está presente a segunda maior reserva do mundo. Embora sejam abundantes na crosta terrestre, esses são encontrados em concentrações baixas, tornando sua extração custosa e tecnicamente difícil. Na verdade, o termo “rara” não foi dado pelo grau de escassez, o que acaba gerando certa confusão. Foi designado a esse grupo devido à descoberta tardia desses elementos.

Um dos principais problemas, ou possivelmente o causador dos demais, está na concentração da produção em poucos países, mais precisamente um país, a China, que é responsável por mais de 85% da produção mundial atualmente. Então, para suprir a demanda por ETR, as nações de maiores economias - EUA, Japão e países da UE dependem de importação.

A previsão de aumento da demanda por tecnologias verdes nos setores de energia e de transporte é perceptível. Planos de expansão de implantação de turbinas eólicas para geração de energia elétrica e de frota de automóveis híbridos e elétricos são

traçados por diversos países. Muitas das tecnologias aplicadas nos dias de hoje é dependente de ímãs permanentes que utilizam ETR para sua fabricação.

Um exemplo é o projeto Maglev Cobra, veículo baseado em levitação magnética projetado para transporte urbano, desenvolvido pelo Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP), na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). O veículo, que possui vantagens quando comparado com os sistemas roda-trilho e VLT (veículo leve sobre trilho) (SOUZA, 2016), utiliza ímãs de TR ao longo de sua via. Nesse caso, o ímã usado é produzido com o ETR neodímio (neodímio-ferro-boro – NdFeB).

Após o anúncio da redução de cotas de exportação, por parte do governo chinês, os preços, antes modestos, alcançaram picos com valorização de mais de 600% para alguns elementos como disprósio, európio e térbio, entre 2010 e meados de 2011, (MASSARI e RUBERTI, 2013). Parte da elevação extrema no preço dos ETR aconteceu por motivos de especulação, como explica o especialista LIFTON (2012).

Existe muita incerteza sobre as questões de recurso, exploração e mercado dos ETR, uma vez que a maior parte é controlada pela China. Inclusive, sobre o real motivo da restrição chinesa, que por vezes foi justificada por questões ambientais ou por uma possível escassez para o suprimento interno, ZEPF (2013) lembra que ainda pode ter sido motivada por um excedente de oferta.

O autor ainda cita que as informações disponíveis nos relatórios e estudos são baseadas em dados incompletos ou não confiáveis, apesar da grande quantidade de relatórios publicados. Os dados de oferta de TR são basicamente fornecidos por uma fonte, que sob aspectos científicos não são confiáveis nem podem ser provadas por validação. Assim, cria-se um espaço para discussão do quão confiável é a relação oferta-demanda.

Acerca da produção, as informações das reservas e valores no mercado quase não estão disponíveis publicamente. Dados do *United States Geological Survey* (USGS), o Serviço Geológico dos EUA, são os mais utilizados, porém não apresentam com clareza suas fontes. Diversas empresas de consultoria oferecem relatórios que analisam o mercado das TR, mas o acesso a esses documentos é pago, dificultando a obtenção da informação.

A dependência das TR da China alcançou um nível que deixou o governo americano bastante incomodado, pois muitos de seus equipamentos de defesa utilizavam ETR. Inclusive houve tentativas de aprovação de lei para criação de plano estratégico em

2013 e 2014 pelo congresso americano, como os projetos H.R 1063, 2013; H.R 4883, 2013 e S.2006, 2014.¹

Com a alta dos preços desencadeada pela crise de 2010, muitos projetos de exploração de TR em novas minas foram lançados em diversas partes do mundo. Especuladores com pouca experiência no mercado de TR compraram pequenas mineradoras, que chamaram a atenção de investidores, mas os projetos não foram adiante. O desconhecimento sobre o mercado levou os investidores a analisarem os ETR como um todo, não considerando que cada elemento possui seu próprio mercado e sua própria aplicação, como esclarece LIFTON (2012).

Para muitos ETR a produção excede a demanda, apenas alguns são críticos ou raros de fato (LIFTON, 2012). O que ocorre é um problema de balanço na oferta, uma vez que esses elementos não são encontrados isoladamente (BINNEMANS *et al.*, 2013).

O Brasil, que já foi produtor de relevância até meados do século XX e atualmente não produz, tem plano de criar uma cadeia de valor de produção de TR com produtos de alto valor agregado, como ímãs de neodímio (Nd) e, assim, se posicionar como um fornecedor mundial do material.

Dessa forma, há a oportunidade de criar uma cadeia de valor sustentável, que o deixaria em vantagem comparado à China, que sofre com uma série de problemas, como mineração ilegal, contrabando, problemas ambientais e falta de competitividade.

O setor de TR corre o risco de escassez de alguns elementos no curto prazo devido à demanda crescente, principalmente em aplicações nas tecnologias de energia limpa. Com as restrições de oferta devido ao mercado complexo e imprevisível, muitos elementos têm sido identificados como críticos. A reciclagem e a reutilização, que atualmente quase não possuem investimento em pesquisa e desenvolvimento, surgem como soluções promissoras para enfrentar a escassez.

As dificuldades de se inserir como um ator de relevância na cadeia de valor das TR partem principalmente do controle do mercado que a China consegue exercer. Na verdade, a criação de cadeia de valor nacional visa garantir o fornecimento de TR para

¹ Disponíveis em:

<https://www.congress.gov/bill/113th-congress/senate-bill/2006> ,<https://www.congress.gov/bill/113th-congress/house-bill/1063> e <https://www.congress.gov/bill/113th-congress/house-bill/4883>

a aplicação em tecnologias verdes e outras tecnologias sem depender do mercado externo.

Para alcançar os anseios do Brasil, faz-se necessária uma pesquisa multidisciplinar sobre o tema, uma vez que pouco se fala sobre o assunto nos centros de pesquisas nacionais. Além disso, o país possui planos de expansão da frota de veículos híbridos e elétricos e da energia eólica, aumentando a importância desse estudo no meio acadêmico. Dessa forma, a demanda por TR, que estão presentes nos ímãs NdFeB, tende ao aumento. Assim, surge a problematização desse estudo: os ETR seriam um gargalo para a execução dos planos nacionais?

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é verificar se a oferta dos ETR presentes nos ímãs NdFeB seria um obstáculo para a execução dos planos de expansão da frota de veículos híbridos e elétricos e da energia eólica para o Brasil até 2050. Para isso, estabelecer o panorama setorial das TR, bem como verificar as aplicações tecnológicas existentes auxiliam o cumprimento dessa proposta.

Outros objetivos desse estudo são:

- Caracterizar os ETR quanto a sua mineralogia, identificando seus principais minerais, ocorrências e depósitos;
- Descrever a cadeia produtiva das TR e seus processos;
- Analisar o mercado das TR;
- Analisar os aspectos tecnológicos dos veículos híbridos e elétricos e das turbinas eólicas que utilizam ímãs de TR.

1.2 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos traçados no trabalho, foi realizada uma pesquisa bibliográfica em artigos científicos utilizando como base de dados o Portal Periódicos Capes, além de livros, relatórios produzidos por órgãos governamentais nacionais e internacionais, relatórios empresariais, projetos de lei e normas. No primeiro momento, foram identificados os principais artigos sobre TR presentes em *journals* e em diversos órgãos governamentais tais como USGS e *British Geological Survey* (BGS).

Relatórios e estudos de órgãos oficiais do governo como Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), *United States Department of Energy* (US DoE), *United*

States Environmental Protection Agency (USEPA), Joint Research Centre (JRC), publicações e apresentações de conferências nacionais e internacionais, estudos realizados por consultorias, conversa com especialistas, entre outros, também foram fontes de pesquisa. Assim, a análise do mercado das TR foi realizada com base nos dados e informações coletados.

Para o cumprimento do objetivo principal, foram levantados os principais estudos sobre criticidade, escassez, risco de suprimento, além dos dados de oferta mundial dos ETR. Ainda foi identificado o estado da arte das tecnologias empregadas nos veículos híbridos e elétricos e na geração de energia eólica.

Dessa forma, foi definido um cenário baseado no estudo “Emissões de Gases de Efeitos Estufa - 2050: Implicações Econômicas e Sociais do Cenário de Plano Governamental” desenvolvido pelo CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ e no Plano Nacional de Energia 2050 (PNE2050) para projetar a expansão da frota de veículos híbridos e elétricos e da geração de energia eólica para o Brasil. Feito isso, foram calculados a quantidade de ETR demandado por cada uma dessas aplicações.

Por fim, foi discutido o papel da criação da cadeia produtiva das TR nacional para garantir o suprimento do país e poder exportar produtos com valor agregado à países que buscam alternativas aos produtos chineses.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 1, referente à Introdução da dissertação, foram apresentados: o tema contextualizado ao cenário atual para justificar a importância do estudo; os objetivos principal e secundários do trabalho; a metodologia utilizada; e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta informações resultantes da revisão bibliográfica, como a caracterização das terras raras, a mineralogia, os depósitos encontrados no Brasil e no resto do mundo e as principais aplicações dos ETR. Também descreve a cadeia produtiva das TR, destacando seus principais processos.

O capítulo 3 é de teor analítico, em que o mercado das TR é apresentado. Aqui, dados referentes à oferta e demanda mundial são analisados. Ainda é apresentado um tópico que trata a dominância chinesa sobre esse mercado, apontando como o país alcançou esse patamar.

O capítulo 4 apresenta o resultado do principal objetivo desse trabalho. A análise da criticidade dos ETR na aplicação em veículos híbridos e elétricos e em energia eólica

para o Brasil é construída levando-se em consideração a tendência da demanda dessas tecnologias dentro da realidade nacional.

Por último, a conclusão trata de alternativas para a diminuição do fornecimento dos ETR. Além disso, apresenta a situação atual dos planos brasileiros de criar cadeias produtivas das TR.

2 TERRAS RARAS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE TERRA RARA

Os elementos de terra rara (ETR) ou metais de terra rara são tecnicamente definidos como os quinze elementos da família dos lantanídeos - elementos com o número atômico (Z) entre 57 e 71- e mais dois associados, o ítrio (Y) e o escândio (Sc). A Figura 1 apresenta os ETR destacados na tabela periódica. Ítrio e escândio são considerados ETR por estarem presentes nos mesmos depósitos e possuírem propriedades químicas e físicas similares (GUPTA e KRISHNAMURTHY, 2005, JAIRETH *et al.*, 2014).

O termo “terra” deve-se ao fato de que ao longo do século XVIII e XIX, quando tais elementos foram isolados, na forma de óxidos, à época, “terra” designava óxidos metálicos (ex. metais alcalinos terrosos). Já o termo “rara”, se deu devido a descoberta tardia dos primeiros elementos e sua separação complexa (GUPTA e KRISHNAMURTHY, 2005; SOUZA FILHO e SERRA, 2014).

Porém, ao contrário do que se imagina ao ler “terra rara”, esses elementos são abundantes na crosta, como apresentado na Tabela 1. Cério (Ce) e lantânio (La), por exemplo, são mais abundantes que níquel (Ni) e chumbo (Pb), respectivamente. Enquanto o neodímio (Nd) possui uma concentração na crosta maior que o cobre (Cu). Já no grupo dos menos abundantes, como o disprósio (Dy) e érbio (Er) possuem ocorrência maior que o ouro (Au) (MCLENNAN, 2001; RUDNICK e GAO, 2003).

Tabela periódica

3	—	número atômico
Li	—	símbolo químico
lítio	—	nome
[6,938 - 6,997]	—	peso atômico (ou número de massa do isótopo mais estável)

1																	18		
1 H hidrogênio <small>[1,0078 - 1,0082]</small>																	2 He hélio <small>4,0026</small>		
3 Li lítio <small>[6,938 - 6,997]</small>	4 Be berílio <small>9,0122</small>																	9 F flúor <small>18,998</small>	10 Ne neônio <small>20,180</small>
11 Na sódio <small>22,990</small>	12 Mg magnésio <small>[24,304 - 24,307]</small>																	17 Cl cloro <small>[35,446 - 35,457]</small>	18 Ar argônio <small>39,948</small>
19 K potássio <small>39,098</small>	20 Ca cálcio <small>40,078(4)</small>	21 Sc escândio <small>44,956</small>	22 Ti titânio <small>47,867</small>	23 V vanádio <small>50,942</small>	24 Cr cromo <small>51,996</small>	25 Mn manganês <small>54,938</small>	26 Fe ferro <small>55,845(2)</small>	27 Co cobalto <small>58,933</small>	28 Ni níquel <small>58,693</small>	29 Cu cobre <small>63,546(6)</small>	30 Zn zinco <small>65,38(2)</small>	31 Ga gálio <small>69,723</small>	32 Ge germânio <small>72,630(8)</small>	33 As arsênio <small>74,922</small>	34 Se selênio <small>78,971(8)</small>	35 Br bromo <small>[79,901 - 79,907]</small>	36 Kr criptônio <small>83,798(2)</small>		
37 Rb rubídio <small>85,468</small>	38 Sr estrôncio <small>87,62</small>	39 Y ítrio <small>88,906</small>	40 Zr zircônio <small>91,224(2)</small>	41 Nb nióbio <small>92,906</small>	42 Mo molibdênio <small>95,95</small>	43 Tc tecnécio <small>[98]</small>	44 Ru rutênio <small>101,07(2)</small>	45 Rh ródio <small>102,91</small>	46 Pd paládio <small>106,42</small>	47 Ag prata <small>107,87</small>	48 Cd cádmio <small>112,41</small>	49 In índio <small>114,82</small>	50 Sn estanho <small>118,71</small>	51 Sb antimônio <small>121,76</small>	52 Te telúrio <small>127,60(3)</small>	53 I iodo <small>126,90</small>	54 Xe xenônio <small>131,29</small>		
55 Cs césio <small>132,91</small>	56 Ba bário <small>137,33</small>	57 a 71 La lantânio <small>138,91</small>	72 Hf háfnio <small>178,49(2)</small>	73 Ta tântalo <small>180,85</small>	74 W tungstênio <small>183,84</small>	75 Re rênio <small>186,21</small>	76 Os ósio <small>190,23(3)</small>	77 Ir íridio <small>192,22</small>	78 Pt platina <small>195,08</small>	79 Au ouro <small>196,97</small>	80 Hg mercúrio <small>200,59</small>	81 Tl talho <small>[204,38 - 204,39]</small>	82 Pb chumbo <small>207,2</small>	83 Bi bismuto <small>208,98</small>	84 Po polônio <small>[209]</small>	85 At astato <small>[210]</small>	86 Rn radônio <small>[222]</small>		
87 Fr frâncio <small>[223]</small>	88 Ra rádio <small>[226]</small>	89 a 103 Ac actínio <small>[227]</small>	104 Rf rutherfordório <small>[261]</small>	105 Db dúbnio <small>[268]</small>	106 Sg seabórgio <small>[269]</small>	107 Bh bóhrio <small>[270]</small>	108 Hs hássio <small>[269]</small>	109 Mt meitnério <small>[278]</small>	110 Ds darmstádio <small>[281]</small>	111 Rg roentgênio <small>[281]</small>	112 Cn copernício <small>[285]</small>	113 Nh nihônio <small>[286]</small>	114 Fl fleróvio <small>[289]</small>	115 Mc moscóvio <small>[288]</small>	116 Lv livermório <small>[293]</small>	117 Ts tenessino <small>[294]</small>	118 Og oganessônio <small>[294]</small>		
			57 La lantânio <small>138,91</small>	58 Ce cério <small>140,12</small>	59 Pr praseodímio <small>140,91</small>	60 Nd neodímio <small>144,24</small>	61 Pm promécio <small>[145]</small>	62 Sm samário <small>150,36(2)</small>	63 Eu europóio <small>151,96</small>	64 Gd gadolínio <small>157,25(3)</small>	65 Tb térbio <small>158,93</small>	66 Dy disprósio <small>162,50</small>	67 Ho hólmio <small>164,93</small>	68 Er érbio <small>167,26</small>	69 Tm itúlio <small>168,93</small>	70 Yb itérbio <small>173,05</small>	71 Lu lutécio <small>174,97</small>		
			89 Ac actínio <small>[227]</small>	90 Th tório <small>232,04</small>	91 Pa protactínio <small>231,04</small>	92 U urânio <small>238,03</small>	93 Np netúnio <small>[237]</small>	94 Pu plutônio <small>[244]</small>	95 Am américio <small>[243]</small>	96 Cm cúrio <small>[247]</small>	97 Bk berquélío <small>[247]</small>	98 Cf califórnio <small>[251]</small>	99 Es einsténio <small>[252]</small>	100 Fm fermío <small>[257]</small>	101 Md mendelévio <small>[258]</small>	102 No nobélio <small>[259]</small>	103 Lr lawrêncio <small>[262]</small>		

Figura 1 - Tabela periódica com os ETR destacados

Fonte: TABELA PERIÓDICA (2016)

De acordo com WALTERS *et al.* (2011), os ETR podem ser classificados, de acordo com o número atômico (Z), em leves ou pesados. Do lantânio (Z=57) ao európio (Z=63) são classificados como elementos de terra rara leves (ETRL). Enquanto do gadolínio (Z=64) ao lutécio (Z=71) são os elementos classificados como terra rara pesados (ETRP). Já o ítrio (Z=39) geralmente é classificado como pesado e o escândio não é assim classificado.

Em algumas classificações, o samário e o europóio podem ser classificados como ETRP (HOATSON *et al.*, 2011). O USGS classifica como ETRL os elementos do lantânio ao gadolínio; como ETRP do térbio ao lutécio; e não classifica o ítrio e o escândio (USGS-MY, 2011).

Ainda existem alguns autores que classificam os ETR em três categorias, leve, médio e pesado. Nessa classificação, de acordo com CHEN (2011), do lantânio ao europóio são ETRL; gadolínio ao hólmio, ETR médios; e érbio ao lutécio, além do escândio e ítrio, os ETRP.

Tabela 1 - Elementos de terras raras, número atômico, classificação e concentração média na crosta terrestre

Elemento	Número atômico	Nome do elemento	Classificação		Concentração média na crosta terrestre [ppm]		Raio iônico [pm]
			WALTERS <i>et al.</i> (2011)	USGS-MY (2011)	MCLENNAN (2001) ¹	RUDNICK e GAO (2003) ²	GUPTA E KRISHNAMURTHY (2005)
Sc	21	Escândio	NA	NA	13,6	14	68
Y	39	Ítrio	Pesado	NA	22	21	88
La	57	Lantânio	Leve	Leve	30	31	106
Ce	58	Cério	Leve	Leve	64	63	103
Pr	59	Praseodímio	Leve	Leve	7,1	7,1	101
Nd	60	Neodímio	Leve	Leve	26	27	99
Pm	61	Promécio	Leve	Leve	*	*	98
Sm	62	Samário	Leve	Leve	4,5	4,7	96
Eu	63	Európio	Leve	Leve	0,88	1	95
Gd	64	Gadolínio	Pesado	Leve	3,8	4	94
Tb	65	Térbio	Pesado	Pesado	0,64	0,7	92
Dy	66	Disprósio	Pesado	Pesado	3,5	3,9	91
Ho	67	Hólmio	Pesado	Pesado	0,8	0,83	89
Er	68	Érbio	Pesado	Pesado	2,3	2,3	88
Tm	69	Túlio	Pesado	Pesado	0,33	0,3	87
Yb	70	Itérbio	Pesado	Pesado	2,2	1,96	86
Lu	71	Lutécio	Pesado	Pesado	0,32	0,31	85
Ni	28	Níquel	-	-	44	47	
Cu	29	Cobre	-	-	25	28	
Au	79	Ouro	-	-	1,8	1,5	
Pb	82	Chumbo	-	-	17	17	

Obs.:

¹MCLENNAN (2001) atualizou os valores de concentração do Sc, Ni e Pb o restante foi extraído do artigo TAYLOR e MCLENNAN (1985,1995).

²RUDNICK e GAO (2003) utilizou diversas fontes para calcular a concentração dos elementos na crosta.

* O Pm não é contabilizado, pois não é encontrado em condições naturais na crosta terrestre (EGGERT *et al.*, 2016)

NA= Não se aplica

Fonte: elaboração própria com base em MCLENNAN (2001), RUDNICK e GAO (2003), USGS-MY (2011) e WALTERS *et al.* (2011)

Como apresentado na Tabela 1, os ETR de número atômico par são mais abundantes na crosta que seus vizinhos de número atômico ímpar. E os ETR de menores números atômicos (ETRL) têm raios iônicos maiores e são mais abundantes que os de maior número atômico (ETRP). Assim, lantânio (La), cério (Ce), praseodímio (Pr) e neodímio (Nd) são os ETR mais abundantes. A Figura 2 mostra a abundância dos ETR na crosta terrestre, que forma uma espécie de zigue-zague no gráfico.

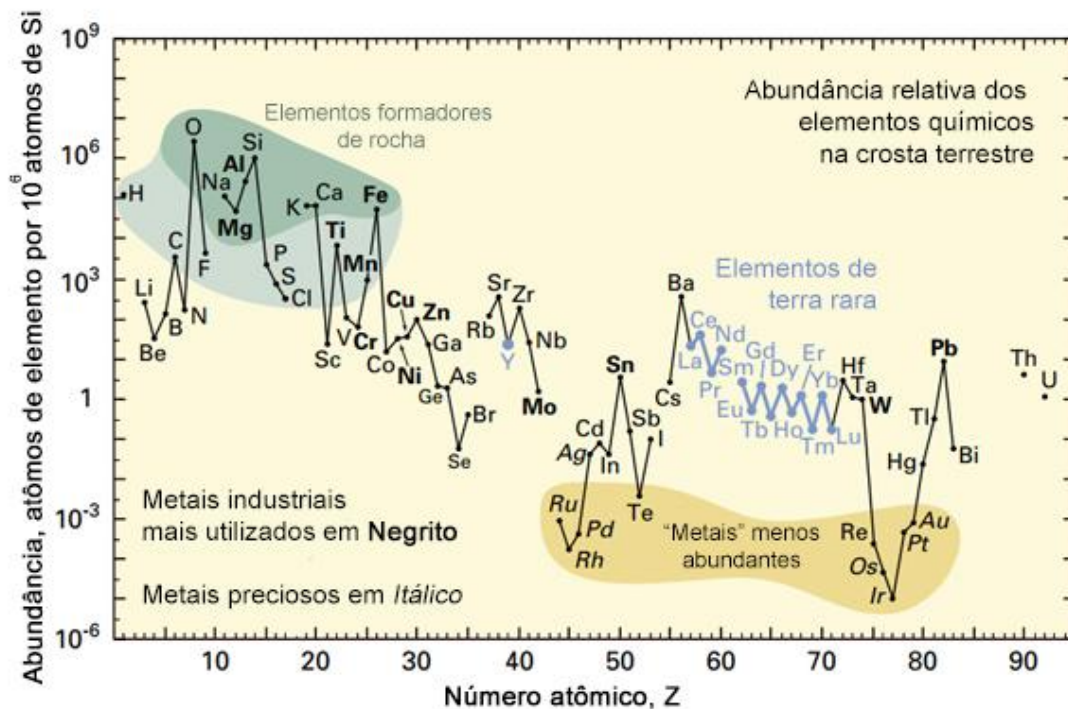


Figura 2 - Abundância relativa (átomos de elementos por 10^6 átomos de Si) de elementos químicos na crosta continental superior em função do número atômico.

Fonte: USGS (2002)

A similaridade química dos ETR, quanto ao raio iônico e estados de oxidação, facilita a presença de mais de um ETR em um mineral. Já que eles podem ser substituídos por outro na estrutura cristalina do mineral (CASTOR e HEDRICK, 2006).

A presença dos ETR na crosta terrestre em quantidades maiores que outros elementos mais conhecidos cria outra falsa impressão de que podem ser mais facilmente obtidos. Na verdade, isso não ocorre porque as concentrações de ETR nos minérios explorados são baixas, o que faz com que sejam produzidos como coprodutos ou subprodutos. Além do teor de ETR no minério, outros fatores irão definir a viabilidade da exploração, como propriedades geológicas do depósito, complexidade de processamento e refino do minério, impactos ambientais de todas as etapas de produção e o impacto social no entorno das plantas (LONG *et al.*, 2010).

A exploração de ETR como produto principal em uma mina se torna viável economicamente em poucos casos. As minas de Mountain Pass², na Califórnia, e Mount Weld, na Austrália, são algumas das exceções, que tem como produtos principais os ETR (GUPTA e KRISHNAMURTHY, 2005; LYNAS, 2015).

Existem mais de 200 minerais conhecidos contendo ETR e os mais comuns ou mais explorados são monazita, bastnaesita e xenotímio. A monazita e a bastnaesita possuem maior concentração de elementos de terras raras leves (ETRL) e o xenotímio de elementos de terras raras pesados (ETRP) e ítrio (LAPIDO-LOUREIRO, 2013).

2.2 MINERALOGIA

Neste tópico, algumas definições de termos pouco utilizados na literatura não especializada são necessárias para melhor entendimento. Mineral é uma substância homogênea formada naturalmente. Com algumas exceções, como o petróleo, por exemplo, os minerais são inorgânicos, sólidos e cristalinos. Mineralogia é o ramo das Ciências Geológicas que estuda os minerais por meio de suas propriedades, constituição, estrutura, gênese e modos de ocorrência (MARAGON, 2009; ZEPF, 2013).

Rocha é um agregado natural de um ou mais minerais, ou vidro vulcânico, ou ainda matéria orgânica, que formam vastos corpos geológicos. Elas podem ser identificadas pelo mineral que as integra: mineral essencial é o mineral que caracteriza o tipo da rocha; minerais acessórios revelam as condições especiais de cristalização; e minerais secundários são formados da alteração de outros minerais (MARAGON, 2009).

Já os minérios são rochas que contém metais ou compostos metálicos. Quando numa área delimitada espacialmente podem ser encontrados minerais concentrados, ela é chamada de ocorrência e quando pode ser explorável recebe o nome de depósito (ZEPF, 2013).

O raio iônico dos ETR é maior que os elementos formadores de rocha comuns, como alumínio, cromo, ferro ou enxofre, então os ETR não são principais formadores de rocha. Os ETR agregam-se em fluidos residuais e enriquecem os minerais acessórios (ZEPF, 2013).

² A mina encerrou suas atividades em 2002, foi reaberta em 2010 e fechada novamente em 2015 por questões financeiras (JAMASMIE, 2015).

As TR não ocorrem como elementos metálicos na natureza, as suas ocorrências consistem em uma mistura de vários ETR e não metais (CHRISTIE *et al.*, 1998). Ocorrem em uma ampla gama de tipos minerais incluindo haloides, óxidos, carbonatos, fosfatos e silicatos (WALTERS *et al.*, 2011). A forte afinidade dos ETR com o oxigênio faz com que sejam encontrados na forma de óxidos na maior parte das ocorrências (GUPTA E KRISHNAMURTHY, 2005).

O entendimento da mineralogia e do contexto geológico do minério possibilita prever o custo de operação com base na tecnologia de processamento que será utilizada (MARIANO e MARIANO JR, 2012).

A Tabela 2 apresenta alguns minerais de interesse exploratório em ordem decrescente de teores de óxidos de terra rara (OTR).

Tabela 2 - Principais minerais de TR

Mineral	Fórmula	OTR (aprox.) %
Bastnaesita-(Ce)	(Ce,La)(CO ₃)F	75
Monazita-(Ce)	(Ce,La,Nd,Th)PO ₄	65
Xenotímio	YPO ₄	61
Parisita-(Ce)	Ca(Ce,La) ₂ (CO ₃)F ₂	61
Gadolinita-(Y)	(Ce,La,Nd,Y)Fe ²⁺ Be ₂ Si ₂ O ₁₀	60
Ytrocrita-(Y,Ce)	(Ca,Ce,Y,La)F ₃ .nH ₂ O	53
Fergusonita-(Ce)	(Ce,La,Nd)NbO ₄	53
Synchysita-(Ce)	Ca(Ce,La)(CO ₃) ₂ F	51
Huanghoita-(Ce)	(Ba,Ce)(CO ₃)F	39
Allanita-(Ce)	(Ce,Ca,Y) ₂ (Al,Fe ³⁺) ₃ (SiO ₄) ₃ OH	38
Kainosita-(Y)	Ca ₂ (Y,Ce) ₂ Si ₄ O ₁₂ CO ₃ .H ₂ O	38
Aechynita-(Ce)	(Ce,Ca,Fe,Th)(Ti,Nb) ₂ (O,OH) ₆	32
Britholita-(Ce)	(Ce,Ca) ₅ (SiO ₄ .PO ₄) ₃ (OH,F)	32
Florencita-(Ce)	CaAl ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₆	32
Cebaita-(Ce)	Ba ₃ Ce ₂ (CO ₃) ₅ F ₂	32
Loparita	(Ce,La,Na,Ca,Sr)(Ti,Nb)O ₃	30
Euxenita-(Y)	(Y,Ca,Ce,U,Th(Nb,Ta,Ti) ₂)O ₆	24
Samaraskita-(Y)	(Y,Ce,U,Fe ³⁺) ₃ (Nb,Ta,Ti) ₅ O ₁₆	24
Apatita	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (F,Cl,OH)	19
Eudialita	Na ₄ (Ca,Ce) ₂ (Fe ²⁺ ,Mn,Y)ZrSi ₈ O ₂₂ (OH,Cl) ₂	9
Brannerita	(U,Ca,Y,Ce)(Ti,Fe) ₂ O ₆	9
Knopita	(CaTi,Ce ₂)O ₃	nd

nd = não disponível

Fonte: adaptado de WALTERS *et al.*(2011).

Como citado anteriormente, os minerais de TR mais explorados são: monazita, bastnaesita e xenotímio. Sendo assim, vale comentar acerca de cada um deles.

Monazita

A monazita é um dos minerais de TR mais importantes devido à sua abundância e teor. Possui fórmula geral $A B O_4$, sendo $A = Bi, Ca, Ce, La, Nd, Th$ e U ; e $B = As^{5+}, P^{5+}$ ou Si^{4+} . É encontrada principalmente em granitos, pegmatitos e carbonatitos. Tem ocorrência secundária em *placers* marinhos e fluviais (LAPIDO-LOUREIRO, 2013). Os *placers* são depósitos formados em córregos, rios ou praias pela acumulação de minerais detríticos mais resistentes e densos resultantes de processo de intemperismo físico e químico (LONG *et al.*, 2010).

Os teores de ETR encontrados na monazita são variáveis de acordo com a formação do mineral, assim como os teores de tório e urânio quando presentes. Esses últimos, radioativos, podem representar um desafio na exploração devido às regras especiais de manuseio, depósito e licenciamento ambiental. Em contrapartida podem ser aproveitados e produzidos como coproduto ou subproduto, agregando mais valor à exploração (WEBER e REISMAN, 2012).

Do início do século XX até meados da década de 1960, a monazita era o mineral mais explorado para obtenção de TR, inclusive, o período ficou conhecido como “Era da monazita” (USGS, 2002). A exploração de monazita em areias pesadas do litoral logo perdeu espaço e foi reduzida, principalmente pela presença de elementos radioativos (ZEPF, 2013). O período que sucedeu a “Era da monazita” e perdurou até meados de 1980 ficou conhecido como “Era de Mountain Pass”, quando os EUA tornaram-se o maior produtor de TR do mundo explorando bastanésita na mina da Califórnia. A terceira e última fase, a “Era chinesa” iniciou-se no início da década de 1990, quando a China assumiu o posto de maior produtor de TR do mundo, e continua até os dias atuais (USGS, 2002).

A monazita pode ser encontrada em grandes quantidades na Austrália, Brasil, China, Índia, Malásia, África do Sul e EUA. A Tabela 3 apresenta teores de ETR de monazitas encontradas em algumas localidades.

Tabela 3 - Proporção de ETR em monazitas (%)

Elemento de terra rara	Austrália, North Stradbroke Island, Queensland	Austrália, Capel, Western Australia	Brasil, Costa leste	China, Nangang, Guangdong	Índia	EUA, Green Cove Springs, Florida,	EUA, Bear Valley, Idaho	Australia, Mount Weld
La	21,50	23,90	24,00	23,35	23,00	17,50	26,23	26,00
Ce	45,8	46,02	47,00	42,70	46,00	43,70	46,14	51,00
Pr	5,3	5,04	4,50	4,10	5,50	5,00	6,02	4,00
Nd	18,6	17,38	18,50	17,00	20,00	17,50	16,98	15,00
Sm	3,1	2,53	3,00	3,00	4,0	4,90	2,01	1,8
Eu	0,8	0,05	0,055 0	0,10		0,16	1,54	0,4
Gd	1,8	1,49	1,00	2,03		6,60	0,77	1,0
Tb	0,29	0,04	0,1	0,70		0,26		0,1
Dy	0,64	0,69	0,35	0,80		0,90	Tb,Dy: 0,31	0,2
Ho	0,12	0,05	0,035	0,12		0,11		0,1
Er	0,18	0,21	0,07	0,30		0,04		0,2
Tm	0,03	0,01	0,005	traços		0,03		traços
Yb	0,11	0,12	0,02	2,40		0,21		0,1
Lu	0,01	0,04		0,14		0,03	Ho-Lu: 0,15	traços
Y	2,50	2,41	1,4	2,40	Eu-Y: 1,50	3,20	1,39	traços

Fonte: GUPTA e KRISHNAMURTHY (2005)

Bastnaesita

A bastnaesita é um mineral formado pela combinação de fluoretos e carbonatos (ROCIO *et al.*, 2012). Ocorre no contato ou em zonas de alteração de rochas alcalinas (LAPIDO-LOUREIRO, 2013). Com cerca de 70% de OTR, dificilmente contém elementos radioativos. A bastnaesita é uma fonte de ETRL, foi explorada em Mountain Pass, na Califórnia e é o principal mineral de terra rara da mina de Bayan Obo, na China (GUPTA e KRISHNAMURTHY, 2005).

Xenotímio

O xenotímio é um fosfato de ítrio, um mineral acessório em rochas ácidas ou alcalinas, principalmente em pegmatitos. Ocorre também em rochas ígneas e metamórficas. Menos abundante que a monazita, é rico em ETRP e ítrio, e elementos radioativos podem ocorrer. Possui cerca de 67% de OTR (GUPTA e KRISHNAMURTHY, 2005; LAPIDO-LOUREIRO, 2013; LIU, 2016).

Outro material explorado, que ocorre principalmente na China, é a argila de adsorção iônica. É rica em ETRP e ítrio e fornecem a maior parte desses elementos para o mercado, pois a mineração e o processamento são relativamente fáceis, além de

serem livres de elementos radioativos (WÜBBEKE, 2013). Juntamente com a monazita, bastnaesita e xenotímio, esses quatro minerais representam mais de 90% da produção de TR do mundo (ZEPF, 2013).

A Tabela 4 apresenta o teor de OTR em alguns depósitos espalhados pelo mundo. É possível notar que a concentração de ETRP é maior nas argilas de adsorção iônica e no xenotímio, quando comparados com os outros minerais.

Tabela 4 - Teor de terra rara em diversos depósitos

Fonte primária	País	Localização	Proporção de óxidos de terra rara (OTR)(%)														
			Terras raras leves						Terras raras pesadas								
			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
Bastnaesita	China	Bayan Obo, Inner Mongólia	23,00	50,00	6,20	18,50	0,80	0,20	0,70	0,10	0,10	–	–	–	–	–	–
		Dechang, Sichuan	35,63	43,81	4,73	13,06	1,22	0,23	0,52	0,06	0,09	0,05	0,04	0,01	0,06	–	0,40
		Maoniuping, Sichuan	29,49	47,56	4,42	15,18	1,24	0,23	0,65	0,12	0,21	0,05	0,06	0,04	0,05	0,01	0,70
		Weishan, Shandong	35,46	47,76	3,95	10,90	0,79	0,13	0,53	0,14	–	–	–	–	0,03	–	0,76
	EUA	Mountain Pass, CA	34,00	48,80	4,20	11,70	0,79	0,13	0,21	–	–	–	–	–	–	–	0,12
Loparita	Rússia	Revda, Murmansk	25,00	50,50	5,00	15,00	0,70	0,09	0,60	–	0,60	0,70	0,80	0,10	0,20	0,15	1,30
Monazita	Austrália	Mount Weld, Central	23,88	47,55	5,16	18,13	2,44	0,53	1,09	0,09	0,25	0,03	0,06	0,01	0,03	–	0,76
	China	Nangang, Guangdong	23,00	42,70	4,10	17,00	3,00	0,10	2,00	0,70	0,80	0,12	0,30	–	2,40	0,14	2,40
	Índia	Manavalakurichi	22,00	46,00	5,50	20,00	2,50	0,02	1,20	0,06	0,18	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,45
Argilas de adsorção iônica	China	Xunwu, Jiangxi	38,00	3,50	7,41	30,18	5,32	0,51	4,21	0,46	1,77	0,27	0,88	0,13	0,62	0,13	10,0
		Xinfeng, Jiangxi	27,26	3,23	5,62	17,55	4,54	0,93	5,96	0,68	3,71	0,74	2,48	0,27	1,13	0,21	24,2
		Longnan, Jiangxi	2,18	<1,09	1,08	3,47	2,34	<0,3	5,69	1,13	7,48	1,60	4,26	0,60	3,34	0,47	64,9
Xenotímio	China	Southeast, Guangdong	1,20	3,00	0,60	3,50	2,20	0,20	5,00	1,20	9,10	2,60	5,60	1,30	6,00	1,80	59,3

Fonte: USGS-MYB (2014)

Além dos minerais atualmente explorados e conhecidos, novos recursos foram descobertos nas profundezas do mar recentemente. KATO *et al.* (2011) publicaram um artigo apresentando a descoberta de um novo recurso de ETR no Oceano Pacífico com altas concentrações. As composições minerais e concentrações mostram estruturas promissoras que permitem um refino relativamente fácil. No entanto, a extração nos dias atuais não é viável, uma vez que os recursos encontram-se em profundidades entre 4000 e 5000 m. No futuro, a exploração desse tipo de depósito poderá se tornar viável.

2.3 DEPÓSITOS DE TERRAS RARAS NO MUNDO E NO BRASIL

Os depósitos minerais de ETR ocorrem em uma ampla gama de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. A concentração e a distribuição de ETR em depósitos minerais são influenciadas pelos processos hidrotermais e de formação de rochas, que incluem: o enriquecimento em fluidos magmáticos ou hidrotermais; a separação em fases minerais e precipitação; e subsequente redistribuição e concentração por intemperismo, além de outros processos superficiais. Esses depósitos podem ser categorizados em primários ou secundários. Os primários estão associados a processos ígneos e hidrotermais, enquanto os secundários são concentrados por processos sedimentares e intemperismo (WALTERS *et al.*, 2011).

Em 2002, o USGS lançou uma compilação de dados sobre minas, depósitos e ocorrências de TR. Para tal, os dados foram coletados de uma variedade de fontes, incluindo: bases de dados do USGS e outras agências, literatura publicada, dados e compilações não publicados, sites de empresas, instituições e governos. Vale frisar que os dados de ocorrência foram incluídos juntamente com os depósitos de potencial econômico conhecido para mostrar o espectro geológico de concentração de ETR. Muitas das ocorrências não foram bem estudadas e o potencial econômico não é conhecido. Nessa compilação foram listadas cerca de 800 ocorrências espalhadas por mais de 70 países (ORRIS e GRAUCH, 2002).

Com base nesses dados, WALTERS *et al.* (2011) resumiram em um quadro as características chave e exemplos dos principais tipos de depósitos de ETR. LAPIDO-LOUREIRO (2013) adicionou mais dois tipos de ocorrências, que estão representadas no Brasil (destacadas em negrito no Quadro 1). Estas são minérios que contém P, TR,

Ti e Nb associados a carbonatitos, e granitos alcalinos mineralizados em cassiterita, zircão e niobo-tantalitas da Amazônia. Para o último, LAPIDO-LOUREIRO (2013) não apresentou o número de ocorrências, nem os teores de OTR.

Quadro 1 - Tipos de depósitos de terras raras/número de ocorrências documentadas, características, principais exemplos

Tipos/ Nº de ocorrências	Características	Reservas/Teores OTR	Exemplos Principais
Depósitos Primários			
Associados a carbonatitos/ 107	Complexos alcalinos / zonas de falha	Dezenas de milhar a milhões de toneladas / 0,1-10%	Mountain Pass (EUA); Bayan Obo (China); Catalão - GO, Araxá - MG (Brasil); Kangankunde (Malawi)
Associados a carbonatitos em minérios de P, Ti, Nb/ 4	Complexos alcalinos / zonas de falha	Dezenas a centenas de milhares de toneladas / 0,5-10%	Tapira - MG), Araxá - MG, Catalão – GO e Maicuru – AM (Brasil)
Associados a rochas alcalinas/ 122	Rochas ricas de minerais alcalinos e enriquecimento em HFSE	Dezenas a mais de 1000 Milhões de toneladas / <5%	Ilimaussak (Groenlândia); Khibiny e Lovozero (Rússia); Thor Lake e Strange Lake (Canadá); Weishn (China); Brockman (Austrália), Pajarito (EUA)
Fe-TR-Cu-Au/ 4	Depósitos de Cu-Au ricos em óxidos de Fe	Olympic Dam: 2000 Milhões de toneladas / 0,3295%	Olympic Dam (Austrália); Pea Ridge (EUA)
Minérios de Zr, Nb-Ta, Sn e respectivos eluviões e aluviões em granitos alcalinos/ (?)	Granitos mineralizados em zircão, niobo-tantalitas, cassiterita e xenotímio	-	Pitinga – AM e outros depósitos de cassiterita do norte do Brasil
Hidrotermais/ 63	Veios poliminerálicos de quartzo, fluorita e pegmatitos	Comum, < 1 milhão de toneladas, raramente até 50 milhões de toneladas / 0,5-4% (raramente até 12%)	Karonje (Burundi); Naboomspruit e Steenkampskraal (África do Sul); Lehmi Pass, Snowbird e Bea Lodge (EUA); Hoidas Lake (Canadá)
Depósitos Secundários			
'Placers' Marinhas / 264	Acumulações de minerais pesados em areias de praia e cordões litorais	Reservas muito variáveis, de dezenas até 1-3 centenas de milhões de toneladas/ < 1% de monazita	Eneaba, Jangarup, Capel, WIM 150 (Austrália); Green Cove Springs (EUA); Richards Bay (África do Sul); Chavara (Índia); Cumuruxatiba - BA, Guarapari - ES e Buena - RJ (Brasil)
'Placers' aluvionares/ 78	Acumulações de minerais pesados em canais fluviais	Dezenas até <200 Milhões de toneladas / < 0,1% de monazita	Perak (Malásia); Chavara (Índia); Carolina monazite belt e Horse Creek (EUA); Guangdong (China)

'Paleoplacers'/ 13	Antigos 'placers' consolidados	Dezenas de MILHÕES DE TONELADAS até 100 Milhões de toneladas/<0,1%	Elliot Lake (Canadá); Bald Mountain (USA)
Depósitos lateríticos / 42	Depósitos superficiais residuais formados por intemperismo químico de rochas ígneas enriquecidas com ETR	Dezenas de milhares até centenas de milhões de toneladas / 0,1-10%	Mount Weld (Austrália); Araxá (Brasil); Kangankunde (Malawi)
Argilas de adsorção iônica / >100	Depósitos residuais de argila formados por intemperismo de granitos enriquecidos com ETR	Maior parte <10000 toneladas, / baixo grau (0,03-0,35%)	Longnan, Xunwu (China)

Fonte: Adaptado de WALTERS *et al.* (2011) e LAPIDO-LOUREIRO (2013)

A Figura 3 apresenta o mapa com a distribuição de algumas ocorrências de TR no mundo como indicado por WALTERS *et al.* (2011). É válido destacar os principais depósitos e ocorrências, os quais serão comentados brevemente a seguir. (Os números entre “[]” são referentes ao mapa da Figura 3).

Os depósitos associados a carbonatitos são a fonte mais importante de ETR. O maior depósito de ETR do mundo, Bayan Obo [64] e o outro depósito mais conhecido, Mountain Pass [2], são exemplos (LIU, 2016).

Os depósitos associados às rochas alcalinas representam a segunda fonte de recursos de ETR do mundo. O mais importante é o complexo de Kvanefjeld [23], na Groelândia. Geralmente são maiores em tamanho e possuem teores de OTR mais baixos. No entanto, a proporção de ETRP nesses depósitos é muito maior do que nos carbonatitos. A proporção média de OTRP pode atingir 31%, enquanto nos carbonatitos podem chegar a 9% (LIU, 2016).

Já os depósitos lateríticos, também chamados de residuais, enriquecidos com ETR, são formados por intemperismo. Mount Weld [69], Araxá [28] e Zandkopsdrift [36] são exemplos de depósitos lateríticos associados a carbonatitos (LIU, 2016). Destaque para Araxá que possui ocorrência de três maneiras distintas: residuais, ligados ao minério de nióbio e associados ao minério de fosfático (LAPIDO-LOUREIRO, 2013).

Os depósitos de argila de adsorção iônica representam apenas 0,37% dos recursos globais. Esses são pequenos e apresentam teor médio de OTR baixo (apenas 0,11%). Por outro lado, possuem alta proporção de ETRP e estão localizados principalmente no sul da China. Três depósitos similares são encontrados no Brasil, no Canadá e no Malawi (LIU, 2016). O depósito Serra Verde, localizado em Minaçu (GO), contém 22Mt

de recurso medido de OTR com teor de 0,21%. O projeto encontra-se em estágio avançado de desenvolvimento com previsão para início da operação em 2020 (VILELA, 2017).

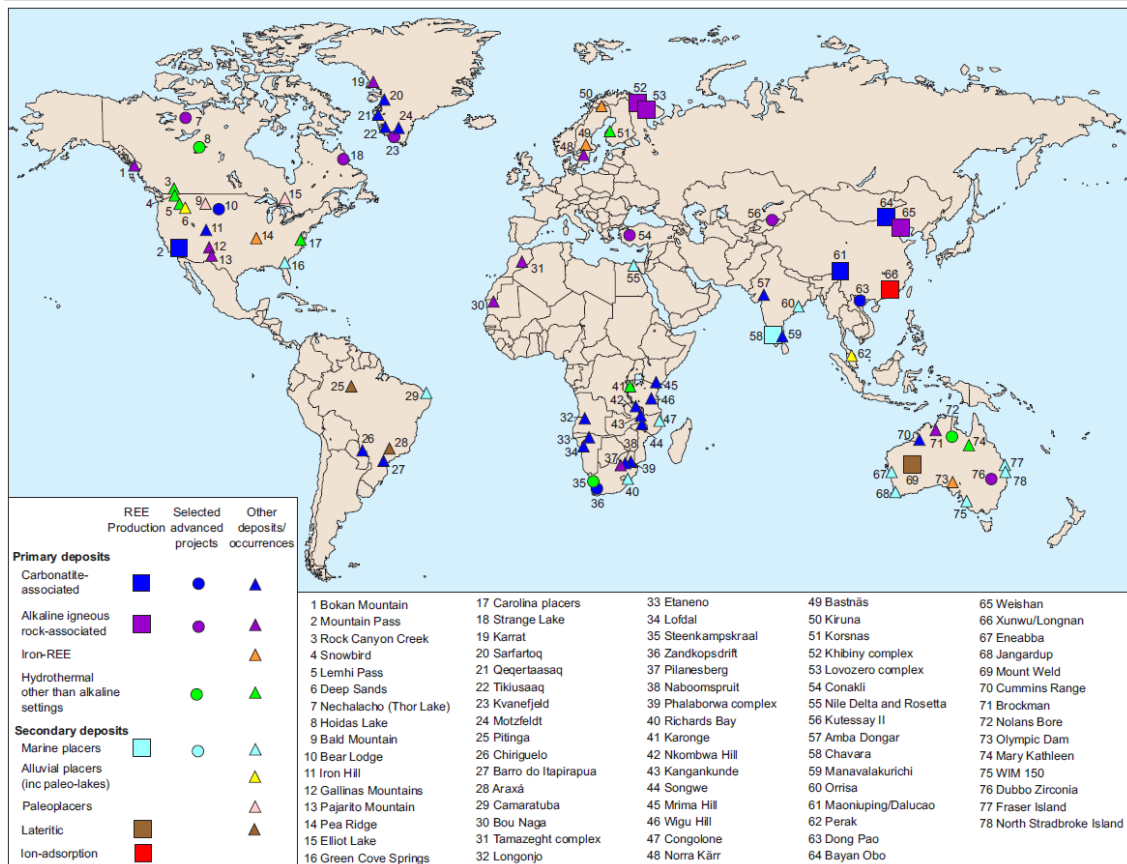


Figura 3 - Mapa com a distribuição mundial de depósitos de TR

Fonte: WALTERS *et al.* (2011)

2.3.1 DEPÓSITOS NA CHINA

A China é rica tanto em ETRL quanto ETRP. No Norte do país, concentram-se os leves e no Sul os pesados. As três principais áreas de mineração estão localizadas no município de Baotou, Inner Mongolia e nas províncias de Jiangxi e Sichuan, que juntos recebem 88% dos depósitos chineses. Em Baotou está localizada a mina de Bayan Obo, que é rica em bastnaesita e monazita, concentrando 83% dos depósitos chineses. As províncias de Sichuan e Jiangxi concentram cerca de 3% cada. O restante está disperso por toda a China (CHEN, 2011). A Figura 4 destaca as províncias onde estão localizados os principais depósitos.

A mineração de TR em Bayan Obo, a maior mina de TR do mundo, com reservas de 57,4 milhões de toneladas e teor médio de OTR de 6%, começou no final dos anos 1950, embora já houvesse exploração de minério de ferro. Assim, as TR são produzidas como subproduto. Para exemplificar o potencial de produção dessa mina, em 2015, de acordo com as cotas de produção adotada pelo país, a província de Inner Mongolia foi responsável por mais da metade do total de TR produzido na China (MORRISON e TANG, 2012; MLR, 2015).

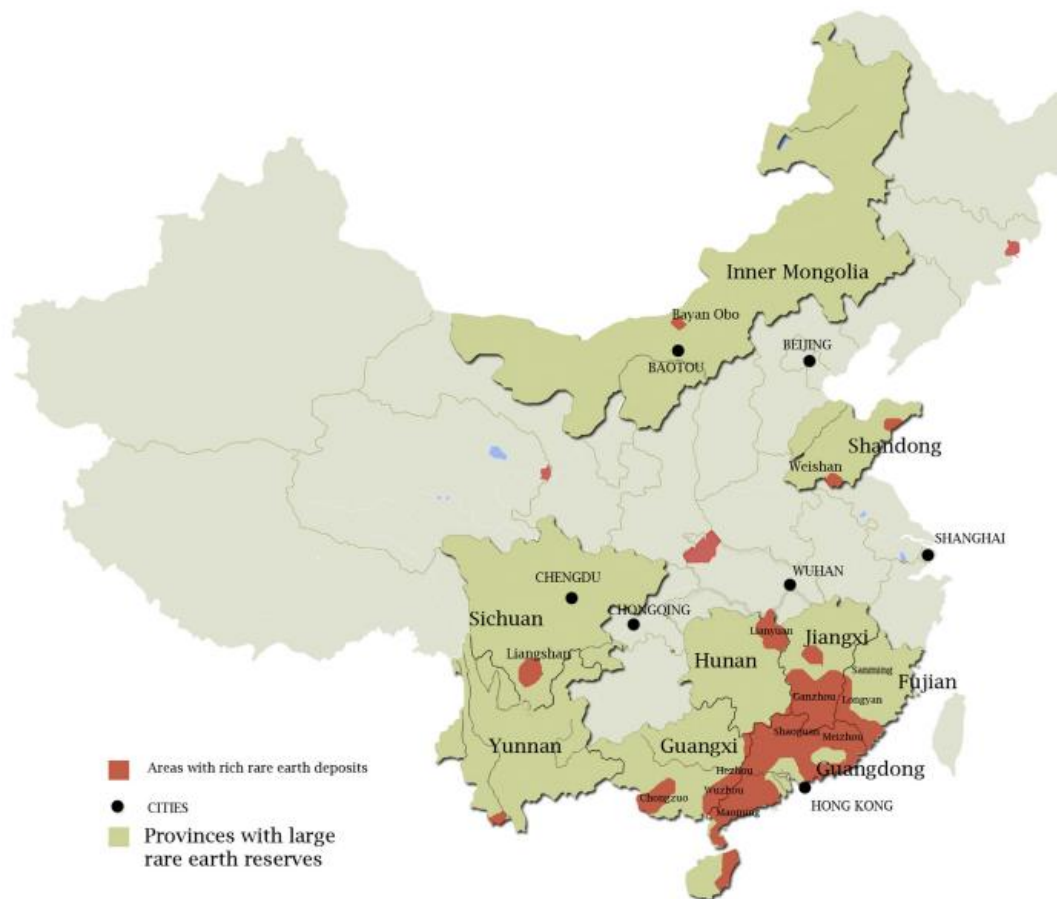


Figura 4 - Mapa da China com as províncias ricas em ETR em destaque

Fonte: WÜBBEKE (2013)

As argilas de adsorção iônica, ricas em ETRP, estão concentradas no Sudeste da China, em várias províncias ao redor de Jiangxi. Estas argilas foram responsáveis por 17% da produção de ETR da China em 2015 e pela maior parte da produção de ETRP do mundo (MLR, 2015; CWR, 2016; FAN *et al.*, 2016).

2.3.2 DEPÓSITOS NO BRASIL

O Brasil aparece na maioria das publicações e revisões sobre a história, a ocorrência e prospecções desses elementos. Foi o maior produtor de terra rara até 1915. Depois ficou trocando a liderança dos maiores produtores de terras raras com a Índia, até 1960.

No final do século XIX, foram descobertos depósitos de areias ricas em ETR entre o norte do Rio de Janeiro e o sul da Bahia, passando por todo litoral do Espírito Santo. Essas areias saíam daqui como lastro de navio. Depois, passaram a ser vendidas para a Europa como matéria-prima das mantas incandescentes dos lampiões à gás. Eram as TR que davam às mantas a capacidade de não se queimarem em contato com o fogo (SOUZA FILHO e SERRA, 2014).

Em meados século passado, quando as TR ainda não eram tão utilizadas e o Brasil era líder do setor, a empresa ORQUIMA produzia óxidos de TR com grau de pureza elevado (99,9 a 99,99%) e dominava todo o processo de extração, purificação e separação. Nos anos 50, os EUA importaram TR para serem utilizadas no controle da absorção de nêutrons do reator atômico do USS Nautilus, o primeiro submarino de propulsão nuclear da história.

TAKEHARA (2015), no documento “Avaliação do Potencial de Terras Raras no Brasil” destacou alguns depósitos com potencial econômico reconhecido para TR em complexos alcalinos, rochas graníticas e *placers* marinhos e fluviais.

Os complexos alcalinos brasileiros são os tipos de depósitos mais conhecidos e com o maior potencial econômico da atualidade, pois existe a possibilidade de extração como subproduto de outros materiais que já são explorados. Os mais importantes são Araxá (MG), depósito que apresenta o maior potencial econômico de TR conhecido no Brasil, com 24,23 Mt de OTR, e Catalão I (GO). Atualmente, nesses depósitos existem a exploração de nióbio e de fosfato, respectivamente, (TAKEHARA, 2015).

Morro dos Seis Lagos (AM), Barra do Itapirapuã I e II (SP e PR), Catalão II (GO), Tapira (MG), Morro do Ferro – Poços de Caldas (MG) e Salitre I, II e III (MG) são outros exemplos. Além desses depósitos com potencial reconhecido, outros complexos que possuem mineralização de ETR, porém sem cálculos de recursos/reservas estimadas para ETR, são: Angico dos Dias (BA), Maicuru (PA),

Mata da Corda (MG), Serra do Repartimento (RR), Serra Negra (MG), Lages (SC), Mato Preto (PR), Anitápolis (SC), Juquiá (SP), Jacupiranga (SP).

Nesse contexto, os depósitos mais avançados em termos de produção de ETR são Araxá e Morro do Ferro. O primeiro vem sendo explorado em escala piloto pela empresa Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM). A antiga mineradora canadense, MBAC Fertilizantes, agora ITAFOS, também realizou uma avaliação econômica preliminar (PEA) em Araxá, em 2012, em outro lote do depósito (CLAY e ACKROYD, 2013). Nesse período, houve uma produção teste de 200kg de concentrado de OTR que alcançou 98% de grau de pureza. Porém nos novos planos da ITAFOS, o “Projeto Araxá” tem como principal finalidade a exploração de fosfato, mas ainda frisa a riqueza de TR e nióbio na região. Muito provavelmente, o interesse foi deixado de lado pela queda dos preços das TR. De todo modo, este é um projeto encarado pela mineradora como de médio-prazo. Caso, os preços dos ETR voltem a subir, os objetivos antigos podem ser retomados, de acordo com a própria empresa (ITAFOS, 2017). Já o Morro do Ferro está sendo estudado pela Prime Star Brasil Mineração LTDA.

No complexo carbonatítico de Catalão I, foram identificados recursos de TR de mais de 125 milhões de toneladas com teor de corte de 2% de OTR. Vale destacar o Depósito do Córrego do Garimpo, que pertence ao complexo e apresenta características como o tamanho reduzido da monazita e a ausência de tório, tornando a exploração atrativa (LAPIDO-LOUREIRO, 2013).

As rochas graníticas têm sua importância por gerar depósitos ricos em ETRP. Os principais depósitos são Pitinga (AM) e Granito Serra Dourada (GO), estando o último em estágio avançado de estudo pela Mineração Serra Verde, como destacado anteriormente. Este depósito possui semelhança com os depósitos de argilas de adsorção iônica do sul da China. Sendo assim, o processo de separação que será utilizado pela Mineração Serra Verde é mais simples e menos custoso que o convencional de separação por solventes (MSV, 2016).

Os depósitos do tipo *placers* foram de grande importância para o desenvolvimento de uma rota de extração de ETR a partir de monazita no século passado. Atualmente, extração é de baixo custo, mas o alto teor de elementos radioativos tornou o mineral pouco atrativo (TAKEHARA, 2015).

Comumente encontrados em ambientes costeiros de margens continentais passivas, os *placers* marinhos estão distribuídos por toda a costa brasileira desde o Pará até o Rio Grande do Sul. Com destaque para Maranhão, Piauí, Rio Grande do Norte, Ceará, Paraíba, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul. Historicamente, foram esses depósitos que colocaram o país entre os maiores produtores de ETR até os anos 1950. (TAKEHARA, 2015).

Já os *placers* fluviais apresentam potencial para minerais contendo monazita e xenotímio e estão presentes no estado da Bahia, Rio Grande do Norte e Rio Grande do Sul, porém sem valor econômico devido à baixa concentração. Por outro lado, São Gonçalo do Sapucaí (MG) é um depósito de pequeno porte, mas existe potencial econômico.

A Figura 5 apresenta o mapa do Brasil com as principais ocorrências de ETR.

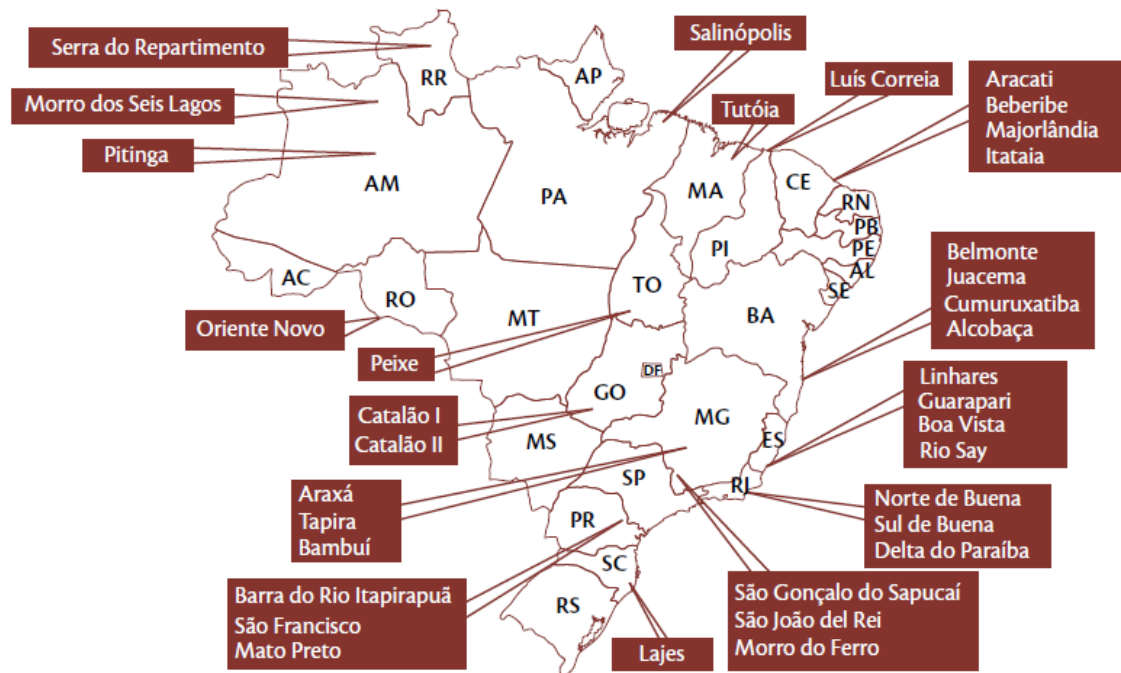


Figura 5 - Mapa ocorrências de ETR no Brasil

Fonte: CGEE (2013)

Mesmo com as numerosas ocorrências de TR no Brasil, existe a necessidade de um aprofundamento nos estudos de viabilidade tanto no âmbito técnico quanto econômico

para melhor conhecer o verdadeiro potencial do país na produção de TR (CGEE, 2013).

2.4 APLICAÇÕES TECNOLÓGICAS DAS TERRAS RARAS

Os ETR possuem variadas aplicações na indústria. A primeira aplicação foi na produção de manto (camisa) para lampiões à gás, criado por um austríaco na segunda metade do século XIX. Logo no início do século seguinte, o mesmo criador, Carl Auer von Welsbach, inventou a pedra de isqueiro, uma mistura de *mischmetal* (mistura de ETR) com ferro, para acender esses lampiões à gás. Essa foi a primeira produção industrial em larga escala utilizando ETR. O escopo de aplicação aumentou com o passar dos anos, participando de tecnologias metalúrgicas, magnéticas, cerâmicas, eletrônicas, químicas, ópticas, médicas e nucleares (GUPTA e KRISHNAMURTHY, 2005).

Com as grandes guerras e a evolução da física nuclear, mais precisamente, da década de 1930 até a de 1960, os estudos sobre TR, que já eram minerais estratégicos para o programa de armas nucleares, estavam voltados para suas propriedades químicas. Urânio e tório, além de tungstênio, platina e vanádio, já foram considerados parte do grupo de ETR, assim a produção e exploração desses elementos eram consideradas questões de interesse nacional pelos EUA (KLINGER, 2015).

Já nos anos 1960, a aplicação de ETR no craqueamento do petróleo revolucionou a setor petrolífero (SOUSA-AGUIAR *et al.*, 2013). Da década de 1970 ao início dos anos 2000, o desenvolvimento do mercado de eletrônicos e da indústria de computadores pessoais mudou o rumo das aplicações de ETR. Assim, passaram a atender setores civis, além das funções militares (KLINGER, 2015).

A variedade de campos de aplicação dos ETR é atribuída às suas propriedades químicas, magnéticas, condutoras e luminescentes (KLINGER, 2015). Devido a essas características, tornaram-se importantes materiais em eletrônicos, em catalisadores de automóveis e no refino de petróleo (HUMPHRIES, 2013).

O aumento da demanda mundial por ETR está diretamente ligado à vasta aplicação nas mais diversas áreas, como os ímãs permanentes, por exemplo. Num primeiro

momento o ímã permanente de samário (SmCo) e posteriormente o de neodímio (NdFeB), com mais de 2,5 vezes a potência do primeiro (WALTERS *et al.*, 2011). Os ímãs são componentes fundamentais para as novas tecnologias que visam a descarbonização da economia, como os carros híbridos e elétricos, as turbinas eólicas, entre outros (KLINGER, 2015).

Um exemplo é o projeto Maglev Cobra, como citado na Introdução. O veículo projetado pelo LASUP/UFRJ, para transporte urbano de passageiros, utiliza levitação supercondutora. Ela é criada a partir dos mancais supercondutores (YBaCuO) instalados no veículo e da linha de ímãs permanentes ao longo de sua via. A escolha pelos ímãs NdFeB foi motivada pelo baixo custo praticado pela China entre 2003 e 2008, além de apresentarem melhores parâmetros como densidade de fluxo magnético, força coercitiva e coercividade intrínseca (SOUZA, 2016).

Os ETR também são aplicados em ligas de armazenamento de hidrogênio (LaNi), telas de LCD (Tb, Lu, Sc) e supercondutores de alta temperatura (YBaCuO). A Tabela 5 apresenta mais funções desse grupo de elementos, com destaque para a maior amplitude de uso do lantânio (La), cério (Ce) e escândio (Sc).

Tabela 5 - Principais aplicações por elementos de terra rara

Principais aplicações por elemento			
Lantânio	<ul style="list-style-type: none"> • Baterias para carros híbridos • Lentes óticas • Craqueamento de petróleo 	Európio	<ul style="list-style-type: none"> • Luminóforos
	<ul style="list-style-type: none"> • Células de combustível • Luminóforos • Ligas metálicas 	Gadolínio	<ul style="list-style-type: none"> • Ímãs • Lasers • Equipamentos de ressonância magnética
		Térbio	<ul style="list-style-type: none"> • Luminóforos • Materiais magnetostrictivos
Cério	<ul style="list-style-type: none"> • Catalisadores de automóveis • Craqueamento de petróleo • Ligas metálicas • Aditivo para vidros • Luminóforos • Polimento de vidros, lentes e semicondutores • Proteção contra corrosão 	Disprósio	<ul style="list-style-type: none"> • Ímãs • Lasers • Luminóforos
		Hólmio	<ul style="list-style-type: none"> • Lasers
		Érbio	<ul style="list-style-type: none"> • Fibras óticas • Lasers
		Túlio	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos de raio-X • Lasers
Praseodímio	<ul style="list-style-type: none"> • Ímãs • Fibras óticas • Corantes 	Itérbio	<ul style="list-style-type: none"> • Lentes óticas • Sensores de pressão

Neodímio	<ul style="list-style-type: none"> • Ímãs para motores, HDD's, turbinas eólicas, autôfalantes • Lasers 	Lutécio	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos de PET scan
Promécio	<ul style="list-style-type: none"> • Baterias nucleares • Lasers 	Ítrio	<ul style="list-style-type: none"> • Supercondutores • Lasers
Samário	<ul style="list-style-type: none"> • Ímãs • Corantes • Luminóforos 	Escândio	<ul style="list-style-type: none"> • Ligas de alto desempenho • Lasers • Luminóforos • Cerâmicas

Fonte: Elaboração própria baseada em: GUPTA E KRISHNAMURTHY (2005), HURST (2010), GSCHNEIDNER JR (2011).

De acordo com GOONAN (2011), os setores que utilizam os ETR podem ser divididos em dois grupos. O primeiro abrange as aplicações com grau de maturidade elevado, tais como: craqueamento de petróleo e catalisadores de automóveis; vidros e metalurgia; e luminóforos (fósforos), que tem a taxa de crescimento de uso ditado pela economia geral. O outro grupo é de setores em desenvolvimento. Este cresce com a alta tecnologia, principalmente com sistemas de energia alternativo, como as baterias para carros elétricos e híbridos, motores elétricos e turbinas eólicas.

Na maior parte das aplicações são utilizadas pequenas quantidades de ETR, por exemplo, 2 a 3g em uma lâmpada fosforescente de 20W (KOLTUN e THARUMARAJAH, 2014). Contudo, aplicações em energias limpas, como as baterias de alta capacidade do tipo NiMH (níquel hidreto metálico), utilizadas em veículos híbridos elétricos, contém de 8-10% de *mischmetal* (La, Ce, Pr e Nd) em peso (MULLER e FRIEDRICH, 2006). Um *Toyota Prius 2ª* Geração possui cerca de 2,5kg de ETR em seu conjunto de baterias (BUCHERT, 2010). Porém esse tipo de bateria tem sido substituído pela bateria de íon lítio, que não utiliza ETR e possui um melhor desempenho (US DOE, 2011).

Em motores elétricos dos sistemas de propulsão de veículos elétricos e híbridos, que utilizam ímãs NdFeB, podem conter de 0,31 a 0,75 kg de ETR (SCHULZE e BUCHERT, 2016). Já uma turbina eólica com capacidade de 3 MW utiliza cerca de 2 t de ímã NdFeB (PAVEL *et al.*, 2017). Para essa aplicação, o ímã contém de 29-32% de Pr-Nd e são adicionados 3-6% de Dy para aumentar a coercividade em temperaturas mais elevadas (LACAL-ARÁNTGUI, 2015). Assim, uma turbina pode conter até 760 kg de ETR em seu gerador.

Voltando ao exemplo do Maglev Cobra, cerca 90kg de ímã NdFeB estão distribuídos por metro de via. Ou seja, a linha de 5km, projetada para construção no Campus Cidade Universitária - UFRJ, utilizaria 450 t de ímã NdFeB.

Percebe-se, assim, que as novas tecnologias verdes demandam uma grande quantidade de ETR para suas aplicações. Por isso, pesquisas que buscam redução da utilização das TR são importantes para um cenário futuro.

2.5 CADEIA PRODUTIVA DAS TERRAS RARAS

A demanda mundial de TR é dominada pela necessidade de ETR isolados com grau de pureza elevado, diferente dos concentrados com graus inferiores produzidos pela indústria de mineração, como os de cobre, de níquel e de alumínio. Isso significa que os processos necessários para a obtenção desses ETR devem ser controlados para alcançar a pureza desejada. Além disso, os processos são específicos para cada depósito ou podem, até mesmo, ser diferentes num mesmo depósito, de acordo com as propriedades do minério explorado. Existe também uma demanda por OTR, porém o valor agregado é menor por ser um produto mais bruto.

Essa complexidade é um fator de risco adicional que deve ser considerado em uma exploração de ETR. O custo da implementação de plantas produtoras de ETR se torna alto, o que pode limitar a eficiência da produção. Dificilmente uma planta poderá receber minérios de diversas minas diferentes, como acontece em minerações mais comuns. Assim, depósitos com uma concentração muito baixa de ETR podem se tornar economicamente inviáveis ou ter um tempo de retorno muito prolongado, o que em situações turbulentas da economia também inviabilizaria a exploração.

Para definir os processos a serem seguidos na produção de uma determinada mina, em muitos casos, é necessário um estudo mineralógico complexo a fim de analisar a viabilidade do projeto.

Os processos da cadeia produtiva de ETR, da mineração à produção de elementos metálicos, variam de acordo com as empresas que os executam. Dessa forma, é de extrema importância avaliar a cadeia produtiva, os fundamentos geológicos, as etapas de produção, as estatísticas do setor e as informações de mercado (GOLEV *et al.*, 2014).

2.5.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS

A prospecção e pesquisa mineral é uma fase prévia da mineração. Podendo ter uma duração de mais de 10 anos, abrange as seguintes etapas: seleção de alvos (anomalias); levantamentos geológicos, geoquímicos e geofísicos; planejamento, execução e interpretação de trincheiras, poços de pesquisa e sondagem, quantificação de reservas minerais e determinação da viabilidade técnica do seu aproveitamento econômico, incluindo os estudos ambientais (CAVALCANTI e ROCHA, 2010). Por ser um processo demorado, a mineração não reage rapidamente à demanda.

As etapas de cadeia produtiva das TR são: lavra, beneficiamento mineral, lixiviação, e separação e purificação, como apresentado no esquema da Figura 6 (em azul são destacados os produtos de cada etapa).

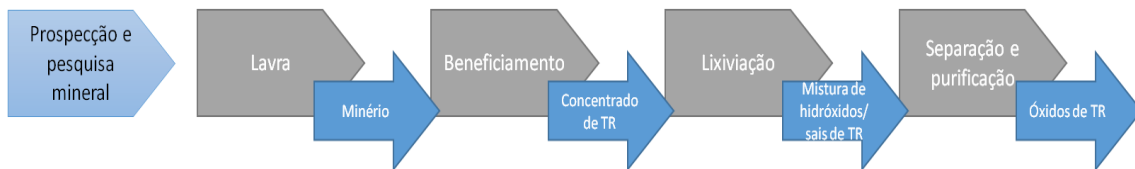


Figura 6 - Fluxograma da produção de óxidos de TR (OTR)

Fonte: Elaboração própria

Lavra

A primeira etapa da cadeia produtiva das TR é a lavra, fase em que os minérios que contém TR são recuperados da rocha hospedeira. Geralmente esse processo ocorre a céu aberto, como acontece em Bayan Obo, na China e Mount Weld, na Austrália. A mineração subterrânea é identificada em poucas explorações, como por exemplo, em minas da Rússia e África do Sul (LIU, 2016).

Nos *placers*, a lavra pode ser feita por dragagem. Caso não estejam cobertas por água, pode ser realizada por variações de escavação a céu aberto, como raspadores e escavadeiras, por exemplo (GUPTA e KRISHNAMURTHY, 2005).

Beneficiamento

A etapa de beneficiamento é realizada por meio da fragmentação e separação física de acordo com a mineralogia do depósito, tendo como resultado o concentrado de TR. Nessa fase podem ser utilizados processos de separação gravitacional, separação

magnética, separação eletrostática ou flotação (GOLEV *et al.*, 2014; MACHACEK e FOLD, 2014).

Já o beneficiamento das argilas de adsorção iônica, não requer tratamento físico devido à forma que são exploradas na China, podendo ser diretamente processadas utilizando técnicas hidrometalúrgicas (LIU, 2016).

Nos depósitos tipo *placer*, a separação gravitacional é comumente utilizada para remover a ganga de silicato, e a separação magnética e eletrostática é utilizada para concentrar a monazita dos outros minerais pesados - ilmenita, rutilo, zircão e leucoxênio (GOLEV *et al.*, 2014).

Lixiviação

Os concentrados de TR geralmente passam por uma lixiviação química ácida ou alcalina a depender da origem e da composição mineral. Nesta etapa, os resíduos de tório (Th) são removidos do concentrado. Ácido sulfúrico e hidróxido de sódio são as soluções de lixiviação típicas usadas para a digestão. Dependendo da relação ácido/minério, temperatura e concentração, tanto o Th quanto as TR podem ser seletivamente solubilizados pelo ácido sulfúrico (GUPTA e KRISHNAMURTHY, 2005).

Já o tratamento da monazita com soda cáustica permite a recuperação de um subproduto comercializável, o fosfato trissódico. Como resultado é gerado um resíduo de hidróxido de TR e Th insolúvel, que pode ser lixiviado com ácido como preparação para a extração por solvente (GOLEV *et al.*, 2014).

Enquanto nas argilas de adsorção iônica do sul da China, a lixiviação é realizada *in situ*, em uma solução química é aplicada diretamente no corpo do minério. A aplicação desse método depende de muitos fatores: a solubilidade dos minerais de TR, as características geoquímicas e hidrológicas do minério e sua permeabilidade (LIU, 2016).

Esse processo resulta numa solução aquosa de elementos mistos de TR, nas mesmas proporções encontradas no depósito. A solução é posteriormente processada/precipitada como uma mistura de hidróxidos ou carbonatos a tipicamente <5 ppm, para ajustar o pH. O objetivo dessa fase é facilitar o transporte, além de remover impurezas e elementos perigosos, que incluem tório (Th) e urânio (U) (MACHACEK e FOLD, 2014).

Separação e purificação

O próximo processo é a separação química em ETR individuais. Essa etapa é um verdadeiro gargalo, uma vez que poucas empresas são capazes de controlar a separação fora da China. Duas dessas de base europeia e outras duas japonesas. As principais dificuldades surgem devido à similaridade das propriedades químicas das TR. Os ETR são separados utilizando as diferenças de basicidade resultantes de seus raios iônicos. As tecnologias de processamento aplicadas em escala industrial são a extração por solvente e a troca de iônica, embora a oxidação/redução seletiva e a cristalização/precipitação fracionada também possam ser utilizadas (GOLEV *et al.*, 2014; MACHACEK e FOLD, 2014).

A intensidade de separação é diferente para ETRL e ETRP. O promécio (Pm), que não possui isótopos estáveis “separa” o grupo La-Ce-Pr-Nd mais facilmente. Já os ETRP necessitam de mais especialização, uma vez que são mais difíceis de separar. Mesmo que o processo não esteja mais protegido por patente e seja de simples explicação, para uma separação de ETRP bem-sucedida, as condições de operação devem estar bastante ajustadas e controladas (MACHACEK e FOLD, 2014).

Os resultados desta separação são produtos intermediários, os óxidos de terras raras (OTR), tais como óxido de neodímio (Nd_2O_3) ou óxido de lantânio (La_2O_3), que ainda contêm proporções de outros ETR, por exemplo, 0,1% de Ce, 0,01% de Y. O grau de pureza é definido pelos compradores de acordo com a aplicação destinada. Geralmente, o cliente testa o produto para garantir as especificações exigidas. É bem comum que os OTR ainda sejam submetidos a um processo adicional de refino para atingir níveis de pureza na gama de 99 a 99,999%.

Os OTR separados podem ser aplicados em diversos setores industriais como o de magnetos, metalurgia, ligas para baterias, pós para polimento, catalisadores automotivos, catalisadores FCC, vidros, cerâmicas, fósforos e outros (MANCHERI e MARUKAWA, 2016).

A separação em OTR agrega valor principalmente com o processo purificação. Quanto mais a jusante da cadeia, maior o valor agregado. A China é um bom exemplo para verificar a dinâmica de agregação de valor da cadeia de TR. Na década de 1990, a produção de ETR separados era de menos de 10%. Já em 2011, alcançou mais de 60% do total produzido. As exportações também seguiram o mesmo caminho: antes, os concentrados de TR eram o principal produto, e posteriormente, o foco tornou-se os

OTR e ETR metálicos. No final da década de 1990, as exportações de produtos com TR eram ímãs, fósforos e pós para polimento. Após a virada dos anos 2000, as exportações começaram a incluir computadores, baterias, celulares e telas LCD (KINGSNORTH, 2012).

O desenvolvimento de cadeias produtivas de aplicações de TR é um objetivo do Brasil e a cadeia de ímãs permanentes de TR foi classificada como prioritária (CGEE, 2013). Atualmente essa aplicação tem a maior participação no valor de mercado das TR, com mais de 60% (ARGUS, 2016). Diante da relevância da cadeia produtiva de ímãs permanentes, faz-se necessário a apresentação de seus processos neste estudo.

Processo de produção do ímã NdFeB

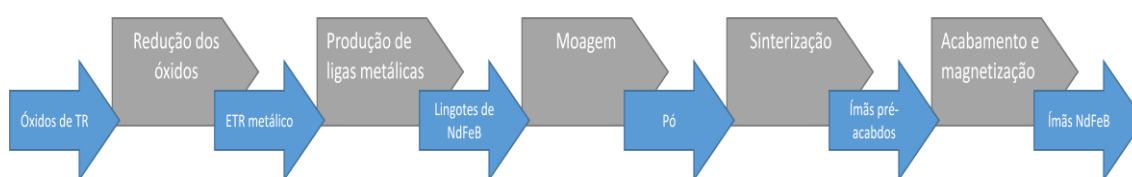


Figura 7 - Esquema resumido do processo de produção do ímã NdFeB

Fonte: elaboração própria com base em WENDHAUSEN (2015)

O primeiro passo para a produção de ímãs permanentes de TR, mais especificamente o ímã NdFeB, é reduzir os óxidos à metais, como pode ser visto na Figura 7. Para tal, os OTR individuais são submetidos ao processo de eletrólise em sais fundidos de TR ou em líquido iônico (CGEE, 2013).

Após redução, os metais de TR não podem entrar em contato com o ar, para evitar sua oxidação. A produção das ligas é realizada mediante fusão a vácuo, o que aumenta a complexidade e o custo dos equipamentos envolvidos. Os ETR metálicos também podem ser utilizados na indústria metalúrgica e na produção de ligas para baterias (MACHACEK e FOLD, 2014).

Os ímãs permanentes NdFeB foram criados em 1983, e nos dias de hoje se tornaram indispensáveis nas aplicações de alta tecnologia, já que são difíceis de serem substituídos sem nenhuma perda de desempenho. São comumente chamados de ímãs de neodímio.

Nesse caso, a demanda pelo neodímio, presente com cerca de 30% em massa em sua liga, é a mais importante. Outros ETR podem ser usados como aditivos ou para substituir parte do Nd, como praseodímio (Pr), disprósio (Dy) e térbio (Tb), mas em

menores quantidades (CGEE, 2013). A concentração do boro (B) no ímã é de aproximadamente 1%. Na verdade, a necessidade de adição de outros metais depende do processo de produção e dos parâmetros desejados na sua aplicação final.

Para a produção de ímãs sinterizados, processo que o Brasil pretende reproduzir em escala industrial, as ligas passam por uma moagem a jato para obter o tamanho de partícula necessário ao processo de sinterização (de 3 a 15 μm). O controle da atmosfera ao longo de todo o processo é necessário para evitar a oxidação do material, que pode afetar a qualidade do ímã (WENDHAUSEN, 2015).

Na etapa seguinte, as partículas de pó são magneticamente alinhadas e então prensadas de forma que seus eixos de magnetização fiquem paralelos. Quando compactados, os ímãs são sinterizados em torno de 1.100°C em vácuo ou atmosfera inerte para atingir 95% da densidade teórica. Um tratamento térmico pós-sinterização, geralmente em torno de 650°C durante uma hora, aumenta a coercividade dos ímãs NdFeB (CGEE, 2013).

Os ímãs ainda são revestidos com uma camada metálica, geralmente de níquel, estanho ou alumínio para evitar corrosão. Após o acabamento final, são magnetizados até apresentarem as propriedades desejadas para o material. A magnetização é realizada por meio da exposição do ímã a um campo magnético externamente alto. Esse campo pode ser criado por outros ímãs permanentes ou até mesmo por corrente elétrica aplicada em uma bobina (CGEE, 2013).

No mercado mundial de ímãs de Nd, o Japão foi o segundo maior produtor, em 2013, com cerca de 19% da oferta, atrás apenas da China (NEOMAG, 2017). Sendo o maior produtor de carros híbridos e elétricos do mundo, para não ficar dependente da China, o país vem investindo em tecnologias menos dependentes do uso de ETR.

Nos ímãs que operam em temperaturas mais elevadas, como os utilizados nos motores elétricos, é comum a presença de disprósio em pequenas quantidades. Esse elemento mais escasso é usado para aumentar a coercividade do ímã. Vale lembrar que o Dy é um ETRP e sua produção está concentrada na China.

SEO e MORIMOTO (2014) apresentaram um cenário em que a redução do uso de Dy em ímãs (*low-Dy magnets*) permanentes NdFeB poderia reduzir sua demanda em 47%, em 2030. O uso dos ímãs em carros híbridos e elétricos são os que mais exigem o uso de Dy (7 a 8% em massa). Desde 2011, quando o governo lançou um programa

de redução e substituição de OTR e ETR, os *low-Dy magnets* vêm sendo testados, mas no setor de automóveis a sua aplicação é mais restrita. Mesmo assim, acredita-se que gradualmente o uso de *low-Dy magnets* aumentaria nos demais setores.

Outro cenário analisado mostra que um aumento na reciclagem de ímãs reduziria a demanda de Dy em 6,3% em 2030. O valor é muito abaixo comparado com o outro cenário, pois a maior parte dos produtos finais é exportada para a América do Norte e Europa, o que pulverizaria o material reciclável. Além disso, ímãs com baixa concentração de Dy dificultariam a recuperação desse elemento na reciclagem (SEO e MORIMOTO, 2014).

Tabela 6 - Produção mundial de ímãs permanentes em 2016

Tipo de ímã	Toneladas (x1000)	% por peso	Milhões de US\$	% por valor
NdFeB	90	13,5	12.200	61
Ferrite	565	85	6.780	33,9
Samário Cobalto (SmCo)	4	0,6	600	3
AlNiCo	6	0,9	420	2,1
TOTAL	665	100%	\$20.000	100%

Fonte: BENECKI (2017)

Os esforços na busca de substitutos do Nd em ímãs permanentes vêm sendo feitos há 20 anos, porém sem muito sucesso. Mesmo com uma oferta de Nd suficiente para suprir a demanda de produção de magnetos, existe a busca de um material com custo inferior. Nesse sentido, JIN *et al.* (2016) publicaram um artigo, que apresenta a substituição de parte do Nd por La-Ce, obtendo resultados promissores com um custo inferior, já que os substitutos são de menor valor. A Tabela 6, apresentada no *Magnetics 2017*³, mostra a quantidade de ímãs produzidos em 2016. Nota-se que os ímãs NdFeB representam 13,5% do total em massa, mesmo assim, são responsáveis por 61% do valor de mercado de ímãs.

Em contrapartida, dados chineses apresentam valores acima dos indicados na Tabela 6. De acordo com DONG *et al.* (2017), a China produziu mais de 126.000 t e consumiu

³ *The International Forum on Magnetic Applications, Technologies & Materials* realizado em Orlando nos dias 18 e 19 de janeiro de 2017.

90% do total de ímãs de NdFeB do mundo, em 2016. Com capacidade de produção de mais de 300.000 t/ano, muito além da demanda mundial, atualmente, a China já consegue produzir até os ímãs mais nobres. Para exemplificar o potencial e o crescimento do setor no país, de 1997 a 2015, a produção aumentou 5000%.

Reciclagem

A reciclagem de ETR pode ser considerada uma solução para países que não possuem produção desses elementos, assegurando, assim, o fornecimento. Os ETR são considerados críticos por diversos países, como EUA, Japão, Coréia do Sul, Reino Unido, União Europeia e Brasil, principalmente devido à concentração das plantas de produção e conhecimento técnico na China (GOLEV *et al.*, 2014).

A principal barreira da reciclagem das TR era a pequena quantidade dos elementos utilizada. A dificuldade de separação e extração dos ETR dos resíduos, somada ao preço relativamente baixo e o excedente da oferta também eram empecilhos para o desenvolvimento da reciclagem. A situação mudou com a incerteza do fornecimento por parte da China e desde então o interesse na reciclagem vem aumentando (GOLEV *et al.*, 2014).

Como os custos de produção de cada elemento são semelhantes, a variação do preço é conduzida pelas curvas de oferta e demanda. Assim, os ETR mais abundantes, como cério e lantânio, por exemplo, são comumente subvalorizados e têm o seu fornecimento precificado abaixo dos custos médios de produção. Já os elementos menos disponíveis possuem valores elevados, ou seja, a demanda por esses elementos dita uma oferta excedente para os mais abundantes. Sendo assim, um aumento da procura por determinado elemento pode acarretar um excedente na oferta de outro.

No caso da reciclagem, os elementos de valor mais baixo são inviáveis, enquanto os de alto valor pode tornar-se um bom negócio (GOLEV *et al.*, 2014). A reciclagem surge como uma possível solução para as limitações de oferta e para o problema do equilíbrio entre oferta e demanda. Porém, atualmente, a quantidade de ETR recicladas ainda não alcança 1% do produto no seu fim de vida. A reciclagem é realizada em áreas onde o resíduo contém certa concentração de ETR, principalmente os mais valorizados, como por exemplo, ímãs permanentes, lâmpadas de fósforos e baterias níquel metal hidreto (NiMH) (BINNEMANS *et al.*, 2013; WEBER e REISMAN, 2012; SCHÜLER *et al.*, 2011; TANAKA *et al.*, 2013).

Algumas companhias japonesas, como Toyota, Hitachi, Honda e Mitsubishi, possuem meta de suprirem 10% da demanda através da reciclagem em um futuro próximo. (CLENFIELD *et al.*, 2010).

Na França, o *Solvay Group* recicla ímãs permanentes (Pr, Nd, Dy e Tb), baterias NiMH (La, Ce, Pr e Nd) e lâmpadas de fósforo (La, Ce, Eu, Y e Tb) (BINNEMANS *et al.*, 2013; ROLLAT, 2012). A meta da companhia é processar 3 mil toneladas de resíduos por ano. Com essa quantidade, a demanda por ETR críticos na produção de lâmpadas fluorescentes estaria assegurada.

O fornecimento de ETR recuperados na reciclagem poderia apresentar uma parcela mais significativa. No entanto, mesmo com a reciclagem, a pegada ecológica e os custos de produção são elevados. Apesar dos processos serem semelhantes aos da produção por minérios virgens, a reciclagem oferece a oportunidade de recuperação com foco nos elementos mais valorizados, evitando, assim, que todos os elementos sejam extraídos. (GOLEV *et al.*, 2014).

Outro benefício da reciclagem é a ausência de elementos radioativos, os quais possuem uma série de exigências para manuseio devido à sua periculosidade. (BINNEMANS *et al.*, 2013; WEBER e REISMAN, 2012).

2.6 IMPACTOS AMBIENTAIS DA MINERAÇÃO DAS TERRAS RARAS

Para entender os impactos na produção de terras raras é necessário conhecer os tipos de depósitos existentes e os processos utilizados, ou seja, de qual minério as terras raras são extraídas e qual rota escolhida. Os ETR produzidos atualmente são, em sua maioria, provindos de depósitos associados a carbonatitos. Como citado anteriormente, existe uma variedade de mais de 200 tipos de minérios que contém ETR.

Na China, mais precisamente em Bayan Obo, Inner Mongólia, o mineral bruto lá encontrado possui uma concentração média de 0,04% em massa de tório enquanto o rejeito apresenta 5%. O resíduo da produção é depositado em uma barragem de rejeitos. Nesse tipo de disposição as concentrações de sólidos totais dissolvidos, Cl, SO₄, F, NH₄, B, Mn_{total}, Fe_{total} se tornam extremamente elevados. A situação se agrava pela forte evaporação, deixando os resíduos extremamente perigosos. A

barragem fica a aproximadamente 35 m acima do, já degradado, Rio Amarelo. A lagoa de rejeitos apresenta riscos tóxicos para os corpos hídricos, solo e ar, que afetam diretamente as comunidades do entorno através de vazamentos, poeira e chuva ácida (HUANG, 2016)

Um vilarejo situado perto dessa barragem, chamado Dalahai, mais conhecido pela população local como "vilarejo da morte", recebeu esse nome porque 61 pessoas morreram em decorrência de câncer de pulmão ou cerebral no período de 1999 a 2006 (LIU, 2013). Além disso, os moradores e animais no entorno sofrem com doenças respiratórias, doenças cardiovasculares, leucemia, osteoporose, câncer de pulmão e de fígado.

Embora a prática de lixiviação *in situ* dos recursos de TR não produza rejeitos substanciais, ainda causa sérios impactos ambientais, como contaminação de águas subterrâneas, desmoronamentos de minas e deslizamentos de terra.

No distrito de mineração de TR de adsorção iônica, na cidade de Ganzhou, altas concentrações de sulfato e amônia foram detectadas nas águas subterrâneas do local, onde eram realizadas lixiviação *in situ*. Além disso, mais de 100 deslizamentos de terra foram relatados, sendo a maioria atribuída a essa prática (HURST, 2010; HUANG, 2011).

As etapas de mineração, beneficiamento e separação geram impactos ambientais, além de utilizarem grandes quantidades de água, energia e produtos químicos (WEBER e REISMAN, 2012). Vale lembrar que muitos depósitos estão associados à altas concentrações de elementos radioativos. Esses devem ser tratados e destinados a locais específicos de acordo com a legislação vigente.

Diversos são os exemplos de catástrofes ambientais relacionadas à produção de ETR. Um dos mais lembrados é o caso de contaminação por radioatividade da *Asian Rare Earth*, que processava TR de monazita. A China também teve corpos hídricos e solos contaminados por metais pesados, produtos químicos tóxicos e elementos radioativos devido à falta de legislação e fiscalização (HURST, 2010).

A concentração de tório e urânio varia significativamente de acordo com o minério explorado. A empresa australiana *Lynas Corp*, que possui sua planta de separação na Malásia, anunciou a reutilização do fosfogesso contaminado por elementos radioativos na construção de estradas, mas ainda não foi executada, pois existem preocupações

acerca da saúde humana. Nos EUA, essa prática de reutilização do fosfogesso é proibida pela *U.S. Environmental Agency* (USEPA), pois pode causar exposições à radiação (WEBER e REISMAN, 2012). Isso criou pilhas de resíduos maciços de fosfogesso nos EUA sem nenhuma solução atual ou futura.

Provavelmente o aspecto radioatividade seja negligenciado por muitas propostas de projetos de TR, tanto do ponto de vista da saúde humana, quanto dos custos relacionados ao correto tratamento para tais materiais.

3 MERCADO DAS TERRAS RARAS

Antes de iniciar o Capítulo 3, vale ressaltar algumas questões envolvendo o mercado de TR, que é cercado por muitas dúvidas. Os ETR são considerados por muitos países, inclusive pelo Brasil, como materiais com risco de suprimento elevado. O Serviço Geológico Britânico colocou as TR no topo de sua *Risk List*. EUA, Japão e União Europeia também consideram alguns ETR críticos.

Em ZEPF (2013), é possível verificar um estudo minucioso acerca das fontes de dados de produção e demanda dos ETR. O autor analisou relatórios, estudos e artigos de instituições públicas e privadas, de cunho acadêmico e mercadológico, incluindo os Serviços Geológicos americano (USGS) e britânico (BGS) e da Instituição Federal de Geociências e Recursos Naturais da Alemanha (*German Federal Institute for Geosciences na Natural Resources* – BGR).

De acordo com ZEPF (2013), existem inúmeras pesquisas sobre TR e a maioria delas trata o assunto de forma superficial, deixando escapar os detalhes, que poderiam mudar a perspectiva de análise. Segundo o autor, alguns relatórios de consultorias, que podem ser adquiridos nos sites das empresas, não trazem muita informação sobre as fontes dos dados. Além disso, os artigos e relatórios das agências USGS, BGR e BGS, são similares e apresentam praticamente os mesmos dados de mercado.

ZEPF (2013) realizou uma análise completa dos dados de oferta de TR de 2009 presentes nos relatórios das agências citadas, que revelou o *China Rare Earth Information* (CREI) como principal referência, além de consultas não especificadas a stakeholders. A conclusão do autor foi que mesmo utilizando dados de fontes diversas, a origem dos dados seria o CREI.

Ainda existe outro ponto sobre algumas análises do mercado dos ETR. Muitas vezes, faz-se uma avaliação dos elementos como um todo, ignorando as diferentes aplicabilidades de cada um deles. Ou seja, cada elemento é utilizado com diferentes finalidades, então cada um possui seu próprio mercado. As análises deveriam ser realizadas individualmente, ou por grupo de mesma finalidade. Provavelmente, isso acontece porque, além de serem encontrados na natureza acompanhado de outros elementos do grupo, o mercado de produção de óxidos ou mesmo de metais isolados é pequeno tanto em valor quanto em volume quando comparado a outros metais.

3.1 RESERVAS E OFERTA DAS TERRAS RARAS

Os dados de reservas minerais são dinâmicos. Eles dependem do aumento ou da diminuição da viabilidade econômica e estão suscetíveis a novas descobertas, ou seja, variam de acordo com as questões tecnológicas ou de mercado. Em 1970, por exemplo, estimaram 1,6 bilhão de toneladas de recursos identificados de cobre no mundo, com reservas de 280 milhões de toneladas. Desde então, mais de 450 milhões de toneladas de cobre já foram produzidos e em 2014, as reservas de cobre foram estimadas em 700 milhões de toneladas. Apesar de todo o volume extraído, o novo dado é maior que o dobro do estimado em 1970 (USGS, 2016).

A oferta futura de minerais, provavelmente virá de reservas e outros recursos identificados, depósitos ainda não identificados que serão descobertos no futuro, material que será reciclado de estoques de rejeitos e outras explorações ou minerações em locais de disposição de resíduos.

O Brasil ainda não possui uma Norma de Classificação de Recursos e Reservas Minerais, exceto para o petróleo e gás natural definida pela Resolução ANP nº 47/2014, (ANP, 2014). Em 2002, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), através da PORTARIA Nº 229, criou um Grupo de Trabalho para examinar, elaborar e propor instruções e normas para a classificação. Publicou uma Minuta em que apresentava definições, mas não foi adiante. Existe, então, a necessidade da criação de normas e critérios para a classificação de recursos e reservas minerais, em que sejam definidas conceituações técnico-econômicas comuns a outros países produtores. Essas definições devem ser de tal forma que os parâmetros de exploração e aproveitamento de depósitos minerais brasileiros, bem como sua avaliação econômica, possam ser comparados e reconhecidos internacionalmente (DNPM, 2002). Como ainda não existe essa norma, o DNPM utiliza o termo reserva lavrável (reservas prováveis e provadas) para quantificar as reservas minerais no Sumário Mineral.

Em contato com o geólogo Romualdo Homobono Paes de Andrade⁴, da área de desenvolvimento da mineração do DNPM, que atualmente passa por um processo para se tornar uma agência reguladora, Agência Nacional de Mineração (ANM), foi

⁴ Responsável pela elaboração da seção sobre TR do Sumário Mineral

questionado sobre quais eram as definições de recurso e reservas utilizadas no Brasil. De acordo com o geólogo, o Brasil, enquanto não lança sua própria versão normativa, utiliza-se do *JORC Code*, normas da Australásia para relatórios de Recursos Minerais e Reservas de Minério (JORC, 1999). A Figura 8 apresenta o esquema de classificação das normas JORC.

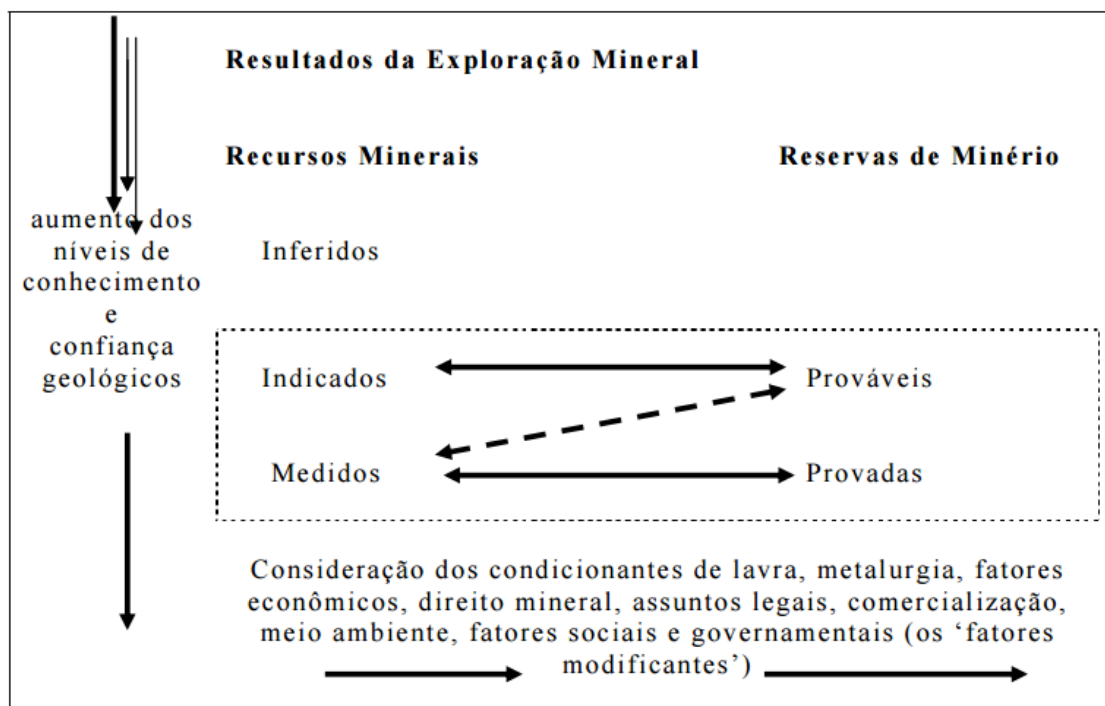


Figura 8 - Relações entre Resultados de Exploração Mineral, Recursos Minerais e Reservas de Minério

Fonte: JORC (1999)

As normas JORC foram utilizadas como base pelo *Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards* (CRIRSCO) para a criação de uma norma internacional de definições com a finalidade de padronizar relatórios de Recursos e Reservas Minerais (JORC, 2012). No entanto, a China utiliza sua própria norma, assim como o USGS.

De acordo com a JORC, Recurso Mineral é uma concentração ou ocorrência de material de interesse econômico na crosta terrestre, dando-se de forma e quantidade que justifiquem razoáveis perspectivas para uma eventual extração econômica. Pode

ser classificado como inferido, indicado e medido, em que a primeira terminologia aponta menor nível de conhecimento e confiança geológicos, ou seja, baixo grau de confiabilidade. Já Recurso Mineral Indicado é a parte do recurso em que a forma do corpo, sua tonelagem, densidades, características físicas, teor e conteúdo mineral podem ser estimados com razoável grau de precisão. E o Recurso Mineral Medido, possui elevado grau de precisão (JORC, 2012).

Reserva Mineral é a parte economicamente lavrável de um Recurso Mineral Medido ou Indicado. Ela ainda pode ser dividida em provável e provada, em que a primeira é a parte economicamente lavrável de um Recurso Mineral Indicado e, em algumas circunstâncias, de um Recurso Mineral Medido. Já a Reserva Mineral Provada é a parte economicamente lavrável de um Recurso Mineral Medido (JORC, 2012).

As reservas de TR foram contabilizadas em 120.000.000t de OTR pelo *USGS Mineral Commodity Summaries 2017*. Caso a produção anual atual (aproximadamente 130.000t) fosse mantida, as reservas poderiam satisfazer as necessidades dos próximos 920 anos. Porém, esse número não é um indicador verossímil, uma vez que cada elemento tem seu próprio mercado (USGS, 2017).

Analisando a Tabela 7, nota-se que as reservas estão espalhas por todo o globo terrestre.

Tabela 7 - Reservas mundiais de TR em 10³ t

Países	Reservas (10 ³ t)						
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Brasil	31 ¹	40 ¹	22000 ¹	22000 ¹	22000 ¹	22000	22000
China	55000	55000	55000	55000	55000	55000	44000
Índia	3100	3100	3100	3100	3100	3100	6900
Canadá	-	-	-	-	-	-	830
Malawi	-	-	-	-	-	-	136
África do Sul	-	-	-	-	-	-	860
Tailândia	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Vietnã	-	-	IOP	IOP	IOP	IOP	22000
Rússia	-	-	IOP	IOP	IOP	IOP	18000
Groelândia	-	-	-	-	-	-	1500
Austrália	1600	1600	1600	2100	3200	3200	3400
EUA	13000	13000	13000	13000	1800	1800	1400
Malásia	30	30	30	30	30	30	30
CEI	19000	19000	IOP	IOP	IOP	IOP	IOP
Outros países	22000	22000	41000	41000	41000	41000	-
Total*	110000	110000	110000	140000	130000	130000	120000

CEI - Comunidades dos Estados Independentes (Rússia) e outras repúblicas da ex-União Soviética

*aproximado

¹Dados do DNPN – Sumário Mineral (2011, 2012, 2013, 2014, 2015)

ND= Não disponível

IOP= Incluído em “Outros países”

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do USGS Mineral Commodity Summaries (2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017) e DNPN – Sumário Mineral (2011, 2012, 2013, 2014, 2015).

Na Tabela 7, os dados apresentados para 2010, 2011 e 2012, a China possuía uma participação de 50% do total da reserva mundial. Porém, no final de 2012, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) aprovou novas reservas lavráveis - duas áreas em Araxá das empresas CBMM e CODEMIG, com 14,2Mt e 7,7Mt de OTR contidos e teores de 3,0 e 2,3%, respectivamente e uma área em Itapirapuã Paulista de titularidade da Vale Fertilizante S/A com 97,96 mil t de OTR e teor de 4,89%. Com isso, o Brasil alcançou a segunda maior reserva do mundo.

De acordo com o USGS, *Mineral Commodity Summaries, January 2015*, as reservas americanas foram revistas, como apontado na Tabela 7. Assim, em 2014, as reservas diminuíram de 13.000.000t para 1.800.000t. O mesmo relatório ainda sinalizou que as reservas reportadas dos outros países passariam por revisões seguindo normas mais rigorosas, na medida em que a informação disponível se torne mais clara.

Em 2016, os dados de reservas de ETR apresentados pelo USGS para Canadá, China, Índia, Malawi, Rússia, África do Sul, Vietnã e EUA foram adicionados ou revisados.

Destaca-se o Vietnã, que em 2016, igualou sua reserva com a do Brasil, passando a dividir a segunda posição na lista dos países detentores das maiores reservas de ETR do mundo. Ainda vale citar a China, que possuía metade da reserva mundial até 2011, agora possui cerca de 36% do total, como é mostrado na Figura 9.

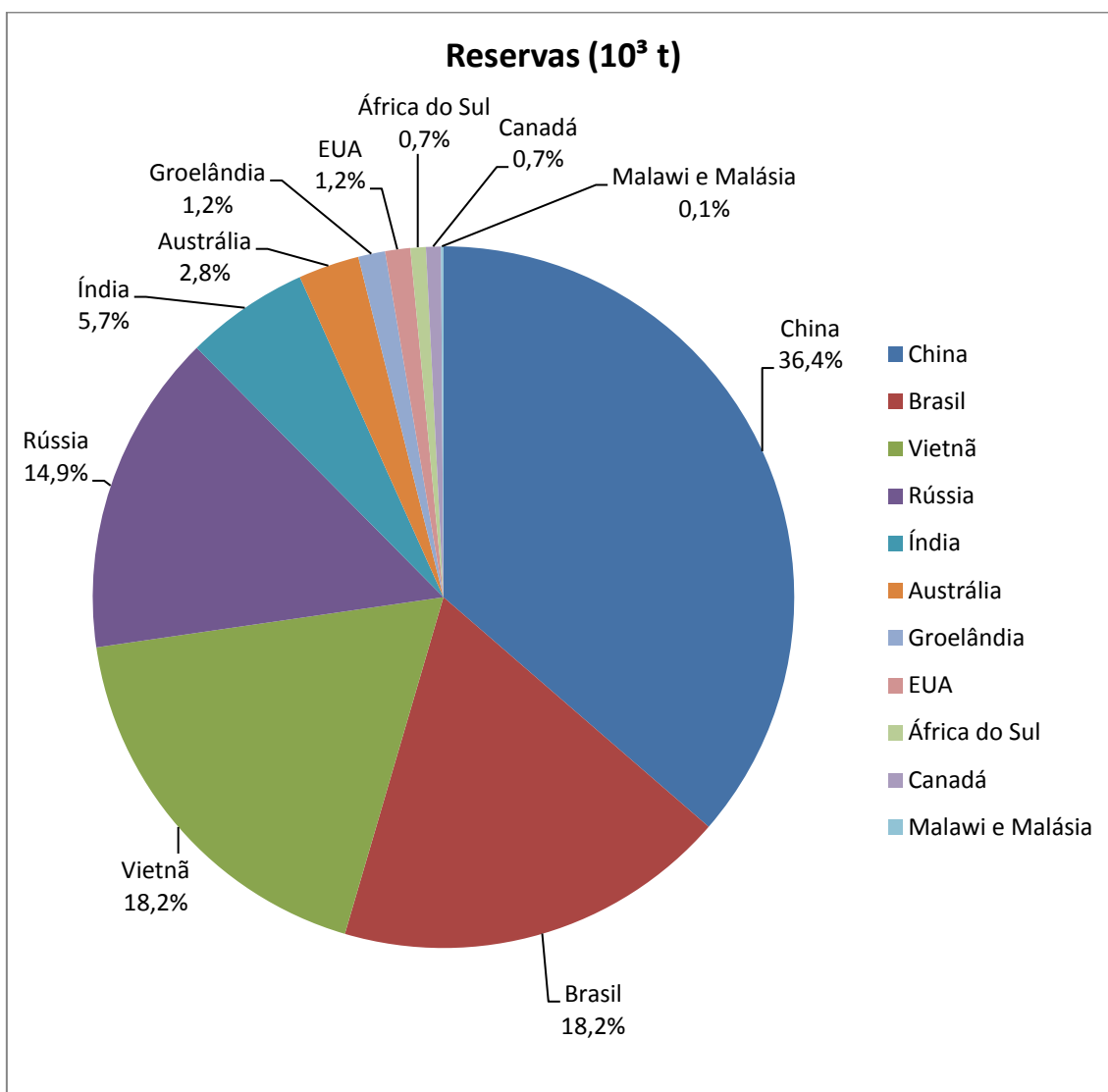


Figura 9 – Gráfico das reservas mundiais de TR por países referente a 2016

Fonte: Elaboração própria a partir de *USGS Mineral Commodity Summaries 2017*

Produção de OTR

O histórico de produção mundial de OTR, a partir de 1900, é apresentado pelo *USGS Data Series 140*, que em sua última atualização foi incluído o dado referente a 2014. A Figura 10 apresenta a evolução da produção. Nota-se que a partir de 1966 o mercado de TR começou a deslançar, principalmente em decorrência do crescimento industrial.

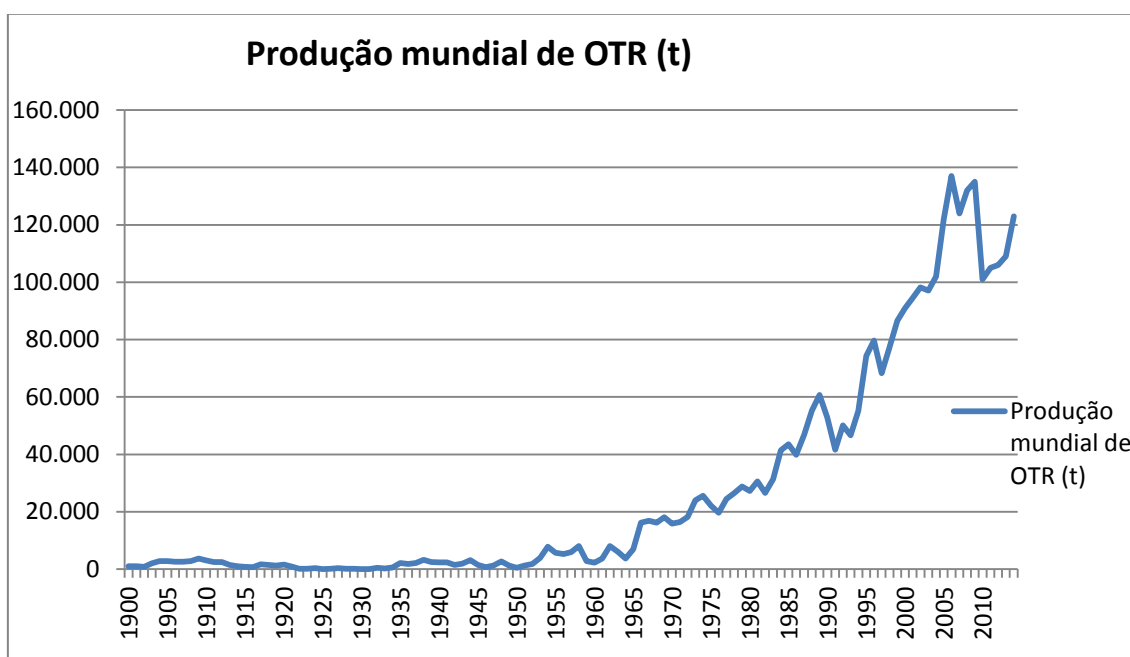


Figura 10 - Produção mundial de OTR de 1900 a 2014

Fonte: USGS DATA SERIES 140 (2016).

Analisando os dados da Figura 10, percebeu-se um crescimento médio de 7,4% ao ano de 1994 a 2009, quando houve uma queda significativa da produção.

Para elaboração da Tabela 8, que apresenta a produção mundial de OTR por país, optou-se por usar os dados do *USGS Mineral Commodity Summaries*, pois todos os anos são reportados com revisão do ano anterior. Os dados de produção referente à 2015, por exemplo, são lançados no *Mineral Commodity Summaries 2016* e revisados no relatório de 2017. Portanto, as informações apresentados na Tabela 8 são as mais recentes para o ano em questão. Apenas os dados de 2016 ainda não foram revisados, pois só serão lançados em 2018. Para o Brasil, a escolha foi pelos dados do DNPM, que estão disponíveis até 2014.

Tabela 8 - Produção mundial de OTR (2007-2016)

Produção de óxidos de terra rara (t)										
Países	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Brasil	390 ¹	834 ¹	303 ¹	249 ¹	290 ¹	206 ¹	600 ¹	- ¹	ND ¹	ND ¹
China	120000	120000	129000	130000	105000	100000	95000	105000	105000	105000
Índia	2700	2700	2700	2800	2800	2900	2900	ND	1700	1700
Austrália	-	-	-	-	2200	3200	2000	8000	12000	14000
EUA	-	-	-	-	-	800	5500	5400	5900	-
Rússia	-	-	-	-	-	2400	2500	2500	2800	3000
Malásia	380	380	350	30	280	100	180	240	500	300
Tailândia	-	-	-	-	-	-	800	2100	760	800
Vietnã	-	-	-	-	-	220	220	-	250	300
Total*	124000	124000	133000	133000	111000	110000	110000	123000	130000	126000

*Total aproximado

¹Dados do DNPN – Sumário Mineral (2011, 2012, 2013, 2014, 2015)

Fonte: Elaboração própria com dados do *USGS – Mineral Commodity Summaries* (2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017) e DNPN – Sumário Mineral (2011, 2012, 2013, 2014, 2015).

Os dados do USGS tiveram a metodologia modificada a partir de 2014, anteriormente eram estimados a partir de dados das companhias líderes em TR da China, agora são baseados nas cotas de produção do *Ministry of Land and Resources* chinês (CWR, 2016). Esse é o motivo pelo qual a produção chinesa permanece estática na Tabela 8.

Quanto aos dados de produção do Brasil, o USGS apresenta números discrepantes aos do DNPN. A Figura 11 apresenta um gráfico comparando os dados americanos com os brasileiros. Vale destacar os anos de 2015 e 2016, em que o USGS apresentou produção de OTR no Brasil de 880 e 1.100t, respectivamente. Como a fonte de dados do USGS não é especificada, não foi possível rastreá-los. O DNPN ainda não apresentou as informações para esses anos, mas de acordo com o geólogo Romualdo Homobono Paes de Andrade do DNPM, não houve produção de TR. Os dados em questão, publicado pelo USGS, são referentes às exportações de monazita sem nenhum tipo de tratamento para a China.

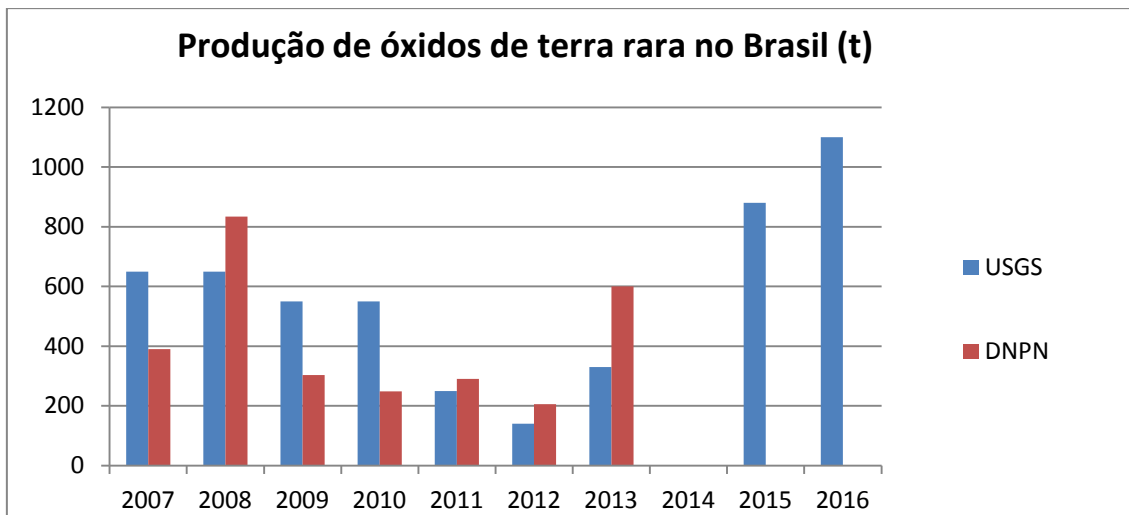


Figura 11 - Produção de óxidos de terra rara no Brasil

Fonte: Elaboração própria com dados do USGS – Mineral Commodity Summaries (2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017) e DNPN – Sumário Mineral (2011, 2012, 2013, 2014, 2015).

A produção mundial de OTR nos últimos 10 anos (2007-2016) variou entre 110.000 a 133.000t por ano, como mostrado na Tabela 8.

De acordo com a USGS, foram produzidos cerca de 125.000t de OTR em 2016, sendo a China responsável por aproximadamente 85% de toda a produção, embora possua cerca de 36% das reservas mundiais, como já mencionado. A Figura 12 apresenta a participação produção mundial de OTR por país.

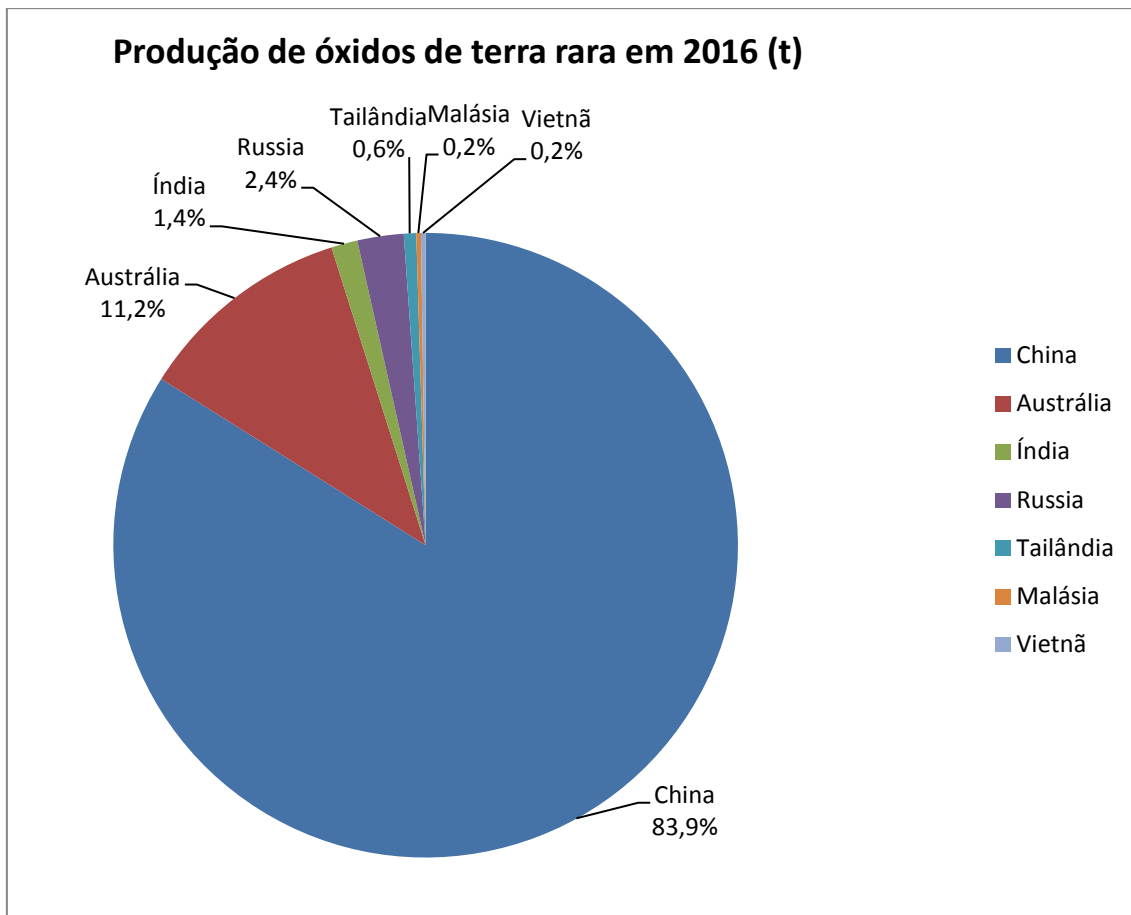


Figura 12 - Gráfico da participação da produção mundial de OTR de 2016

Fonte: USGS (2016).

A Figura 13, elaborada a partir da Tabela 8, apresenta a participação de produção da China no cenário mundial. Nota-se uma queda a partir de 2011, após a aplicação do programa de cotas de exportação, que abriu espaço para produtores não chineses.

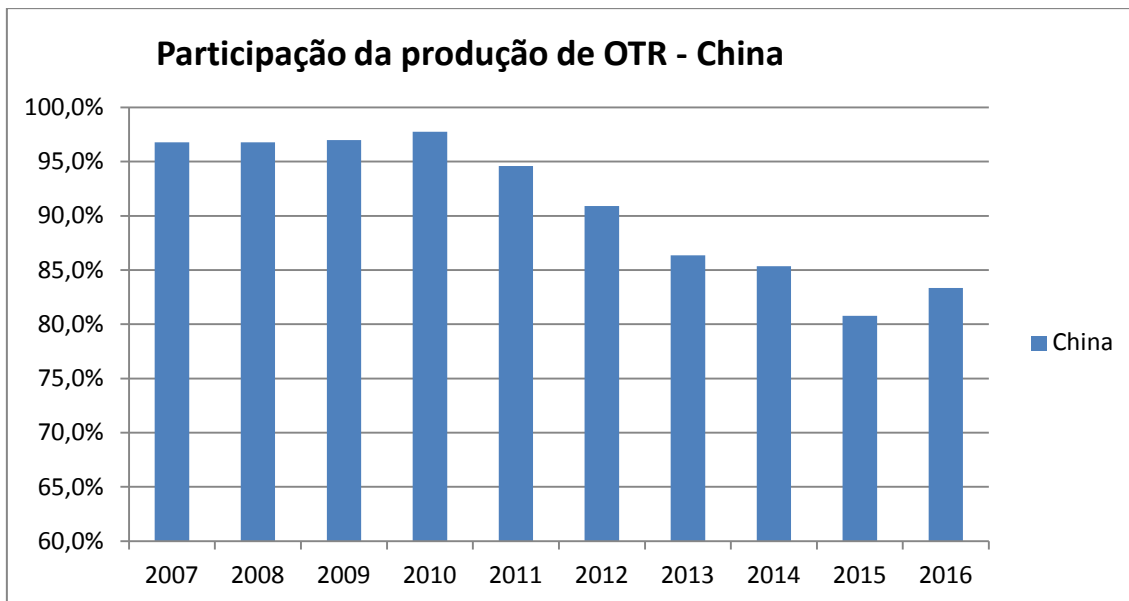


Figura 13 - Participação da China na produção mundial de OTR

Fonte: Elaboração própria a partir de dados do USGS Mineral Commodity Summaries (2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017).

A Figura 14 apresenta a participação da produção de OTR por elementos, realizada pela ARGUS (2016), que considera a produção ilegal por parte da China. A produção de cada elemento depende diretamente do minério explorado, que apresenta mais de um ETR em diferentes teores. Além disso, cada mina possui características diferentes. Uma maneira de comparação utilizada nos estudos de viabilidade econômica da mina é o preço da cesta de TR. Caso contenha um teor muito elevado dos ETR mais baratos, a viabilidade econômica pode ser comprometida (HURST, 2010).

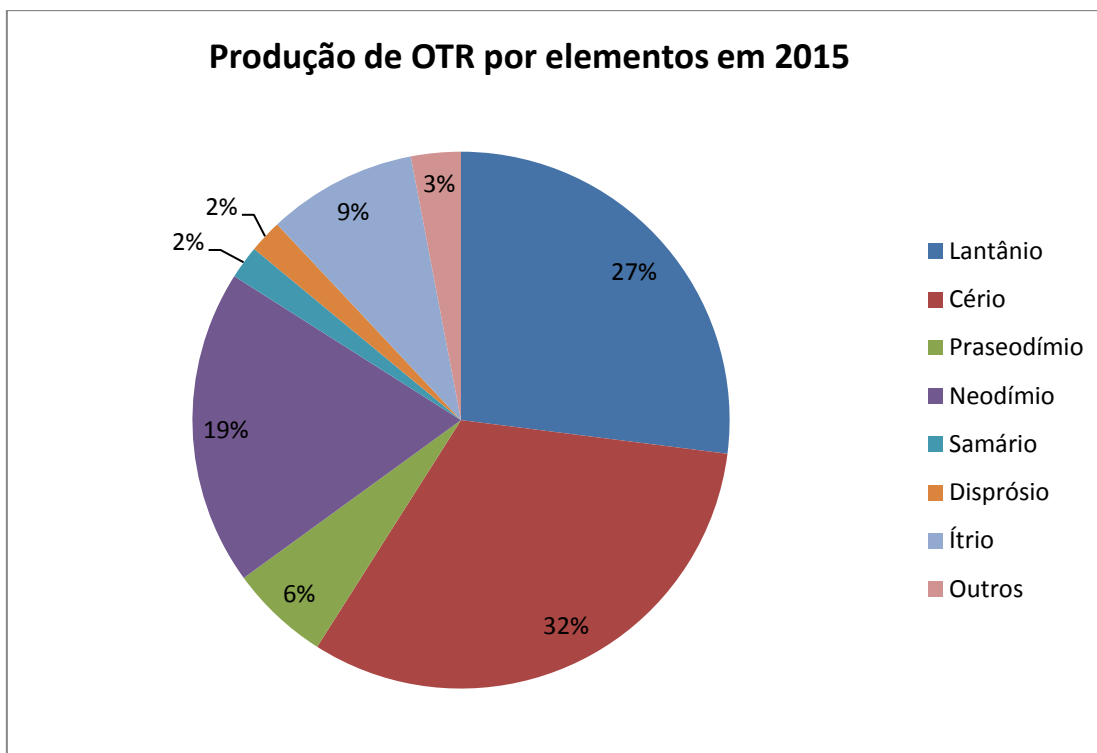


Figura 14- Participação da produção de OTR por elementos em 2015

Fonte: ARGUS (2016)

KENNEDY (2016) explica que os depósitos de bastnaesita em Mountain Pass e Mount Weld explorados pela *Molycorp* e *Lynas*, respectivamente, introduziram 8046 t de OTR entre julho de 2013 e junho de 2014. Dessa quantidade, 6218 t eram referentes à La e Ce. Dessa forma, o resultado foi uma queda nos preços desses dois elementos devido a um excedente no mercado.

Caso *Lynas* e *Molycorp* operassem em sua capacidade máxima, 42000 t/ano, introduziriam 32300 t de Ce e La no mercado, o que corresponde a mais de 40% da demanda por esses ETR.⁵

⁵ *Lynas* projeta uma capacidade 22.000t. Em meados de 2015, operava com 75% dessa capacidade. Sua planta de separação, *Lynas Advanced Material Plant* (LAMP), localizada em Kuantan, Malásia, produz óxido de didímio (NdPr), carbonato de cério, óxido de cério, carbonato e óxido de LaCe e óxido de SEG (Sm+Eu+Gd). Disponível em <https://www.lynascorp.com/Pages/Kuantan-Lynas-Advanced-Materials-Plant.aspx>

Enquanto isso, a China continua dominando a produção de ETRP. Na verdade, a questão é muito mais complexa. A academia, grupos empresariais, lobistas e empresas de mineração de TR concentram a atenção dos formuladores de políticas públicas na questão da oferta, ignorando as questões econômicas e de segurança nacional decorrente desse domínio.

A China controla o mercado de materiais de valor agregado de TR. Empresas como *Lockheed*, *Boing* e GE, que utilizam TR, não conseguem converter OTR em metais, ligas e ímãs de TR. Assim, são forçadas a firmarem contrato de fornecimento com empresas de dentro da China, pois nos últimos 20 anos os fabricantes de metal, ligas e ímãs não chineses encerraram suas atividades ou se transferiram para a China.

A cadeia de valor das TR na China é composta por duas cidades praticamente dedicadas às TR, Baotou (a Capital das Terras Raras) e Ganzhou (O Reino das Terras Raras), e por centenas de empresas de TR, que contam com o apoio do governo e são muito especializadas (CRW, 2016, KENNEDY, 2016).

A China conseguiu criar uma cadeia bastante sólida e complexa. Os decisores políticos devem se atentar a esse fato, pois não será fácil se inserir nessa cadeia de valor.

3.2 DEMANDA DE TERRAS RARAS NO MUNDO

A demanda pelos ETR vem de vários setores industriais como apresentado na seção 2.4 Aplicações tecnológicas das terras raras, mas o maior peso vem do setor energético, principalmente com a implantação de geradores de energia eólica e eletrificação da frota de veículos.

De acordo com ARGUS (2016), a China, o Japão e os EUA são os países que mais consomem TR no mundo. A Figura 15 mostra que em 2014, os três países juntos consumiram quase 80% de toda a produção mundial, considerando um total de 149.000t de OTR.

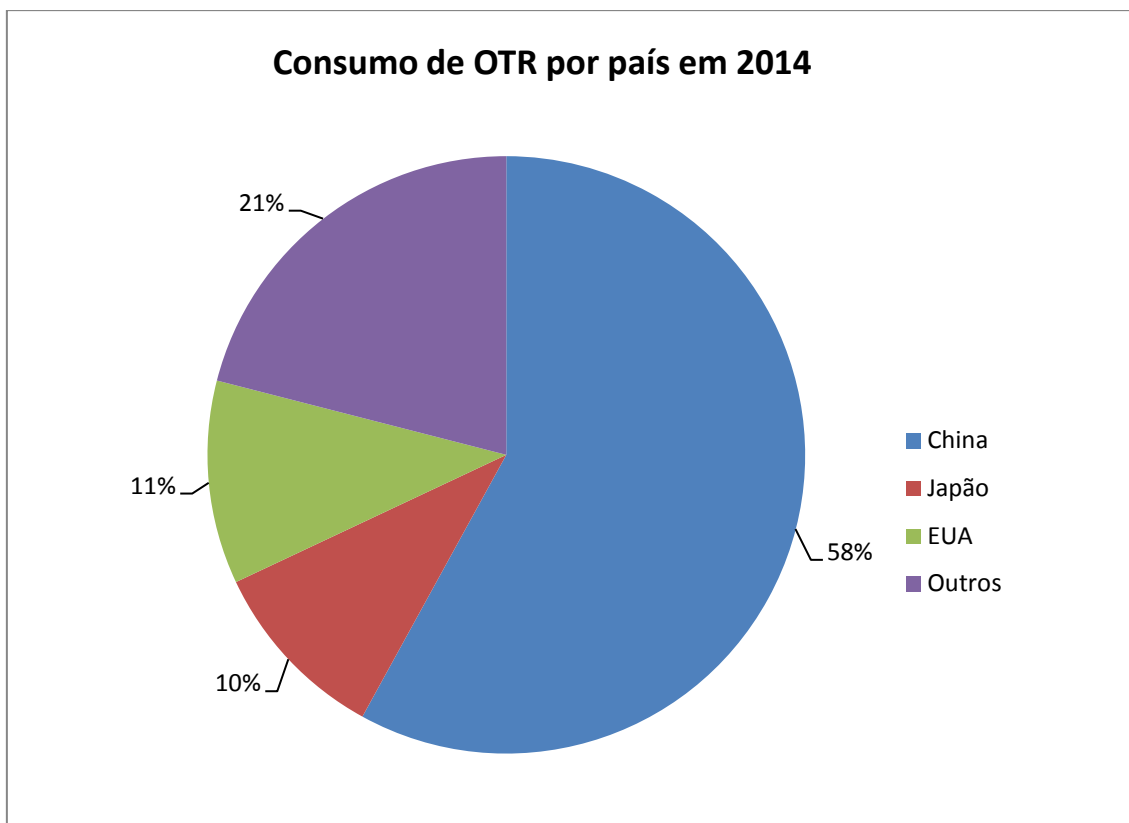


Figura 15 - Consumo de OTR por país em 2014

Fonte: ARGUS (2016)

Em 2014, o USGS apresentou dados publicados pela *Roskill Information Services Ltd* sobre consumo das TR para cada setor. Nesse caso, a fonte considerou um consumo total de 119.000t em 2014, em que 23% foram utilizados para catálises, 22% para magnetos, 16% para metalurgia, 13% para polimento e 26% para outras finalidades que incluem cerâmicas, vidros, fósforos, pigmentos e outros usos. (USGS-MYB, 2014).

Diante das informações referentes a 2014, é possível notar a diferença entre o total consumido em cada uma das análises. Isso ocorre, pois a ARGUS (2016) apresentou dados considerando a produção ilegal na China.

Para 2015, KINGSNORTH (2015) apresentou dados de demanda por países e por setores. Na Tabela 9, é possível verificar que os três países ainda são os maiores consumidores de TR.

Tabela 9 - Demanda mundial em 2015**Demanda Global Estimada em 2015 (t OTR +-20%)**

	China	Japão	EUA	Outros	Total	Participação no mercado
Catálise	10000	7000	9000	2000	28000	19%
Vidrararia	6000	1000	750	750	8500	6%
Polimento	14500	2500	2000	1000	20000	14%
Ligas metálicas*	19500	3500	1500	1000	25500	17%
Ímãs	35500	7000	1500	1000	45000	31%
Fósforos	4500	500	250	250	5500	4%
Cerâmicas	3000	500	1500	500	5500	4%
Outros	4000	1000	2500	500	8000	5%
Total	97000	23000	19000	7000	146000	100%
Participação no mercado	66%	16%	13%	5%	100%	

* Incluindo ligas para baterias

Fonte: elaboração própria com base em KINGSNORTH (2015)

O rápido aumento da procura por ETR se deve ao fato da demanda por novos materiais, que incluem ímãs, fósforos⁶, catalisadores e baterias. Hoje esses produtos correspondem a mais de 60% da demanda global (KINGSNORTH, 2015). Essa demanda vai continuar aumentando por conta de investimentos em energia limpa. Muitas destas aplicações são altamente específicas e materiais que possam substituir os ETR são inferiores ou desconhecidos.

De acordo com KINGSNORTH (2009), o setor de ímãs era responsável por 20% do volume produzido e 40% do valor de mercado das TR. Segundo o mesmo autor, em 2015, o setor de ímãs permanentes foi o que mais participou no total consumido, pouco mais de 30%, como apresentado na Tabela 9. Por outro lado, ARGUS (2016) relatou que, em 2015, 22% do total consumido foram destinados aos ímãs, e que este representou 62% do valor total para aquele ano, conforme apresentado nas Figuras 16 e 17.

⁶ Os fósforos, luminóforos ou também denominados materiais luminescentes são capazes de converter certos tipos de energia em emissão de luz (PARKER, 2000).

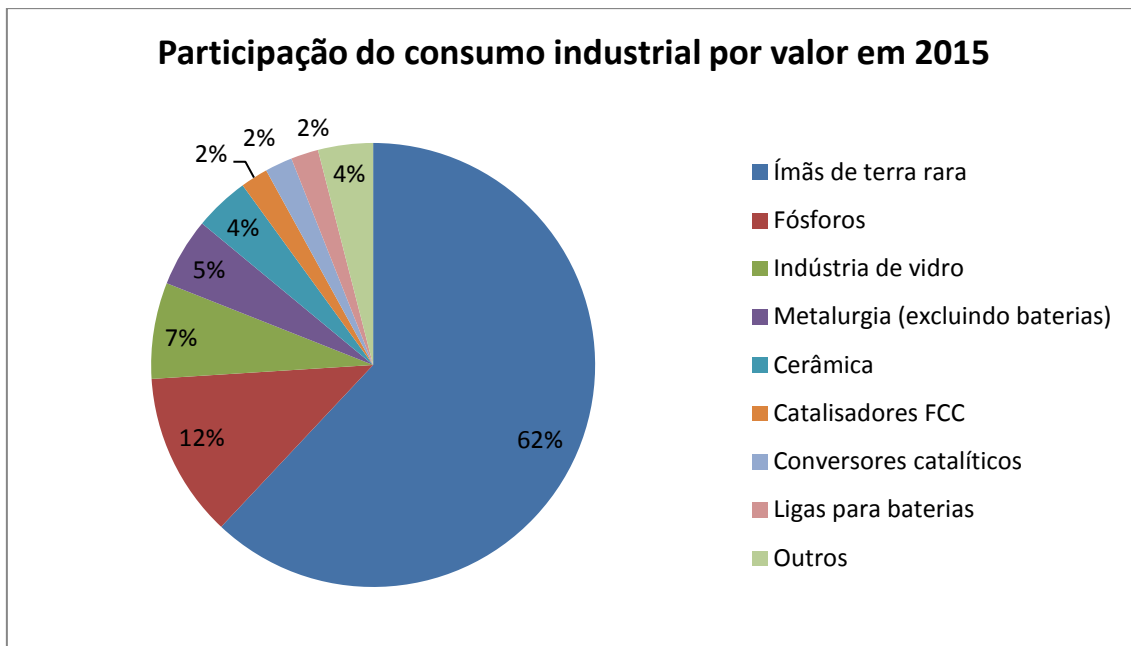


Figura 16 - Participação do consumo industrial por valor em 2015

Fonte: ARGUS (2016)

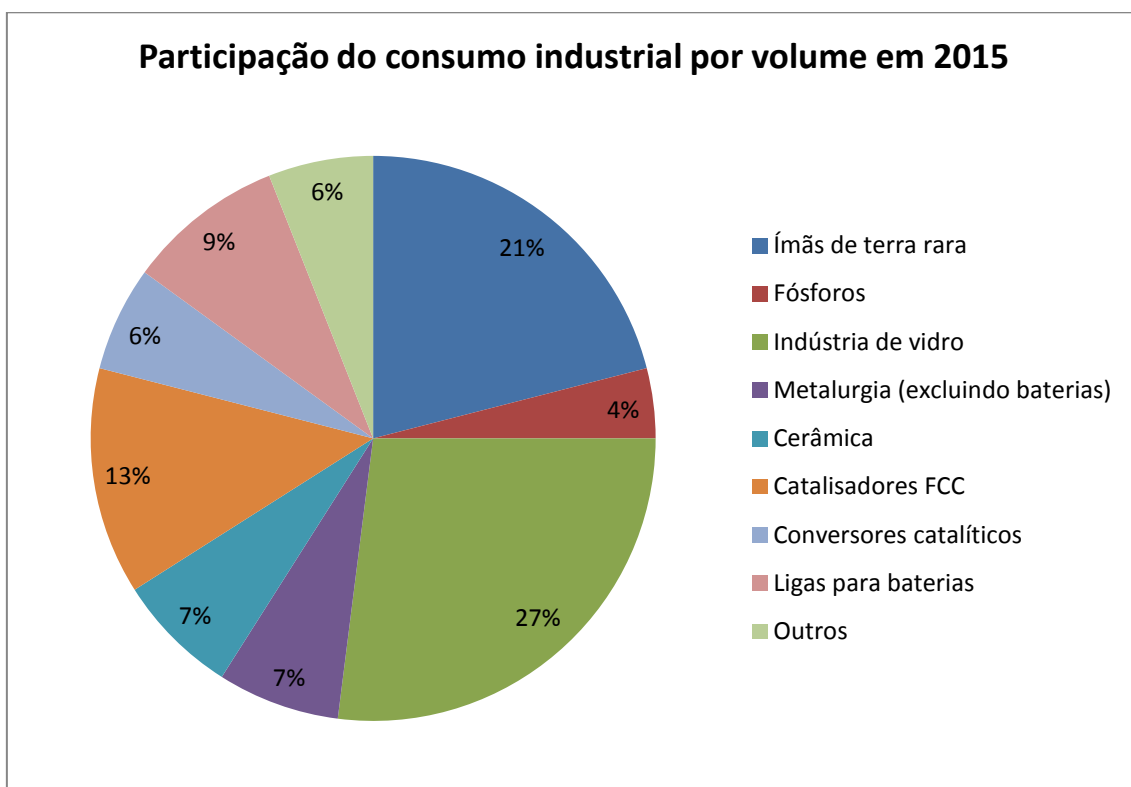


Figura 17 - Participação do consumo industrial por volume em 2015

Fonte: ARGUS (2016)

Diante das informações apresentadas, fica evidente a imprecisão dos dados publicados por diferentes fontes. Reforçando, assim, a falta de informação sobre o mercado de TR, como mencionado por ZEPF (2013).

3.3 PREÇOS

As TR chamaram a atenção do público entre 2010 e 2011, quando os preços subiram mais de dez vezes em menos de um ano. Após o pico, em meados de 2011, os preços começaram a cair, alcançando, em 2013, os níveis observados em 2010 para a maioria dos óxidos. Mesmo com o preço reduzido, os ETR causam preocupação, aparecendo nas listas de risco de suprimento de países importadores e exportadores de produtos de TR.

Como apresentado na Figura 18, o lantânio e o cério geralmente são mais baratos e fornecidos ao mercado com valores abaixo dos custos médios de produção. Os preços mais altos para outros elementos compensam essa diferença, mantendo um retorno global positivo para os produtores de TR. Do ponto de vista da produção, no entanto, a maioria dos ETR tem custos de processamento similares, pois todos são extraídos juntos. Assim, a variação dos preços de cada elemento ocorre principalmente pelas condições do mercado, ou seja, pelo equilíbrio entre a oferta e a demanda dos elementos separados, seus benefícios para aplicações específicas e despesas associadas à substituição por materiais alternativos. Isso tem uma aplicação direta para a atratividade da reciclagem para alguns dos ETR. Há pouco ou nenhum interesse em recuperar elementos relativamente baratos que não são susceptíveis de cobrir os custos de processamento, enquanto a reciclagem dos de alto valor pode se tornar atraente devido à lucratividade.

Os contratos de fornecimento de ETR são negociados para um longo prazo através de acordos entre grandes consumidores e fornecedores. Potenciais compradores e vendedores também fazem negócio por meio de sites especializados. Os detalhes das negociações geralmente não estão disponíveis publicamente e um preço de mercado no sentido convencional não existe. As cotações de preços disponíveis representam estimativas de contratos em negociações (JRC, 2013).

Os valores diários apresentados são compilados através de entrevistas com comerciantes individuais, tornando o mercado mais opaco e menor do que os

negociados na bolsa de valores. Com base nos preços e produção de 2010, o valor da total é estimado em aproximadamente US\$ 5 bilhões (JRC, 2013).

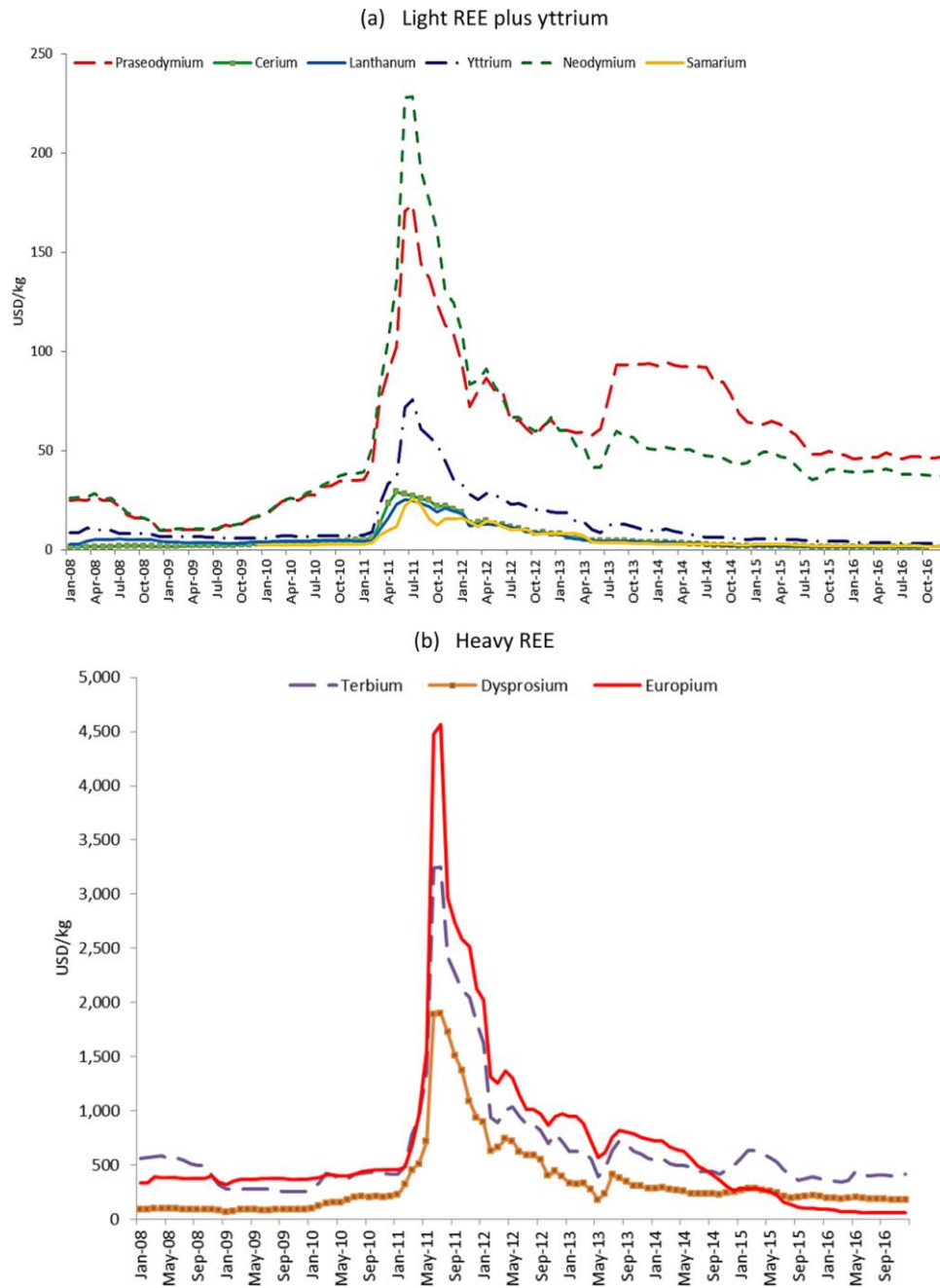


Figura 18 - Evolução dos preços dos Óxidos de Terras Raras

Fonte: FERNANDEZ (2017)

3.4 A CHINA E A CONQUISTA DO MONOPÓLIO

Em 1986, a China, comandada por Deng Xiaopong, considerado o autor da célebre frase: “O Oriente Médio possui petróleo, a China, terras raras”, implementou o Programa 863 à pedido de cientistas renomados. Esse Programa enfatizava a pesquisa e desenvolvimento de TR com a finalidade de ganhar espaço no cenário mundial e dar um salto de desenvolvimento em alta tecnologia nos campos em que o país gozava de vantagens (MOST, 1986).

Já em 1997, o Programa 973 foi apresentado como Programa Nacional de Pesquisa Básica, que englobava projetos dos campos da agricultura, saúde, informação, energia, meio ambiente, recursos, população e materiais. A pesquisa sobre a natureza e aplicações de TR também estavam incluídas no Programa (MOST, 1997).

O reflexo da dedicação ao setor de TR foi claro. Em 1986, a China produzia cerca de 12.000t de OTR, já em 1999, alcançou a produção de 65.000 t. Desde então, o país não só permaneceu como o maior produtor de TR, mas também o maior consumidor para alimentar a indústria interna (HURST, 2010). Assim, desde 1990, o consumo de TR está em alta na China, com uma taxa de crescimento de 13% ao ano, atingindo mais de 90.000t em 2015 (KINGSNORTH, 2015).

Até a década de 1990, os EUA dominavam a produção de TR, enquanto a China possuía uma produção irrelevante. Mas os investimentos chineses no setor foram combinados ao baixo custo de mão de obra e leis ambientais mais flexíveis. Além disso, diferentemente de Mountain Pass, EUA, onde os ETR eram explorados como produto principal, na maior mina da China, Bayon Obo, eles são coprodutos da exploração de Fe, diluindo os custos de operação. Em 2002, Mountain Pass, a principal mina americana, encerrou as atividades por questões ambientais. Assim, a China tornou-se a maior produtora de TR.

Com a concentração do fornecimento de ETR na China, nos anos 2000, vários países se preocuparam com a vulnerabilidade da oferta. Em 2009, o governo australiano rejeitou o investimento de chineses em dois projetos de mineração. Um desses investimentos seria a compra de 51,6% da *Lynas Corporation*, que possui a maior exploração de TR da Austrália (BRADSHER, 2009). No caso, o *Foreign Investment Review Board* australiano não permitiu a venda de mais de 49% da *Lynas Corporation*.

Em 2010, a China criou dificuldades na exportação de ETR para outros países. À época, era responsável por 97% da produção de OTR e uma larga parcela da produção de metais de TR, ligas e produtos com valor agregado como os ímãs de Nd. O sistema de cotas de exportação foi atualizado, limitando-a em pouco mais de 30 mil toneladas para esse ano. No ano anterior, essa cota era de cerca de 50 mil toneladas (MANCHERI e MARUKAWA, 2016). A demanda por esses materiais era crescente e a China queria mostrar a influência sobre os países que dependiam da importação desses elementos, como Japão, EUA e alguns países europeus. Assim, os governos começaram a considerar medidas extraordinárias para se proteger do poder chinês.

Os preços começaram a subir e tiveram seu pico em 2011, porém passada a crise, os projetos que haviam começado a ser executados a todo vapor com a valorização das TR foram desacelerando na medida em que os preços caíam. Os preços pós-pico atrasaram os planos dos produtores não chineses de criar uma oferta paralela. O mercado estava se ajustando e a baixa oferta de TR forçou as empresas a encontrarem soluções com menor dependência desses materiais.

Em 2012, os EUA, UE e o Japão travaram uma disputa na Organização Mundial do Comércio (OMC) contra as medidas restritivas de exportação praticadas pela China, alegando violação da legislação da organização (MANCHERI, 2012). Apenas em 2014, a OMC solicitou a remoção das tarifas e cotas de exportação dentro de um prazo razoável. A partir de 2015, o país extinguiu as cotas de exportação.

Tentando manter e expandir seu monopólio, a China continuou a buscar TR além de suas fronteiras. No Brasil, por exemplo, um grupo de companhias chinesas comprou 15% do capital da CBMM em 2011. No mesmo ano, a CBMM já havia vendido outros 15% para um consórcio formado por companhias japonesas e sul-coreanas (VALOR, 2011). Eles também compraram a mina Baluba, na Zâmbia (GEOLOGY, 2017).

Em 2016, a *Shenghe Resources Holding*, líder em TR e com experiência em todas as áreas da cadeia produtiva - mineração, beneficiamento, separação, metalurgia e marketing - adquiriu 12,5% da participação da *Greenland Mineral and Energy*, que desenvolve um projeto no sul da Groelândia de exploração de ETR (GGG, 2017).

Na China, existem também as cotas de produção. Criada em 2006, com o intuito de diminuir o excedente para aumentar o valor de mercado, o MLR criou limites para a produção. Em 2008, a cota de produção era de 89.200t. Já em 2014, a cota era de 105.000t. Essas cotas estão divididas entre ETRL e ETRP, além de serem distribuídas

entre as províncias. Para exemplificar, em 2015, a cota de produção foi de 105.000t, sendo 83% para ETRL. Do total de ETRL, a província de Inner Mongolia teve a cota de 68,3% (CWR, 2016).

A China anunciou, em 18 de outubro de 2016, que limitará sua produção anual de TR em 140.000t até 2020 com o intuito de reformar o setor e assegurar seu desenvolvimento sólido. O governo continuará investigando e apreendendo qualquer pessoa envolvida com mineração ilegal, processamento ou comércio de ETR. Essa medida foi tomada para gerenciar o acesso ao mercado da melhor forma possível, de acordo com um plano de desenvolvimento de TR para o período 2016-2020, divulgado pelo Ministério da Indústria e Tecnologia da Informação chinês (MIIT).

Para favorecer a indústria, o MIIT planeja melhorar a eficiência em toda a gestão de recursos e inovação tecnológica até 2020. Durante o 12º Plano Quinquenal (2011-2015), 14 minas ilegais de TR e 28 empresas foram fechadas. Mais de 36.000t de produtos ilegais de TR foram apreendidas e 230 milhões de *yuans* (US\$34,53 milhões) em multas foram impostas, de acordo com estatísticas do MIIT (CHINA, 2016).

A China sofria com contrabando e mineração ilegal, anualmente 20.000 a 30.000t, ou de 15 a 30% da produção oficial eram contrabandeadas (MANCHERI e MARUKAWA, 2016). Além do contrabando, uma maneira de burlar a restrição era exportar ligas metálicas minimamente processadas, que combinavam metais de TR com pequenas quantidades de outros metais, pois essas limitações não afetavam os produtos de valor agregado. Com isso, a China forçava a criação de setores mais avançados da cadeia de TR. Inclusive, a *General Motors* começou a comprar motores produzidos na China, pois não havia insumos para a produção em solo americano. O governo também chinês anunciou um plano para consolidação de pequenos produtores em companhias maiores com o intuito de aumentar o controle, mas como o mercado de TR é pequeno em comparação a outros, o setor não obteve atenção suficiente.

Os ajustes de mercado foram feitos no sentido de realocar os usos de ETR. O refino de gasolina, por exemplo, funciona sem a adição de ETR, perdendo apenas pouca eficiência. A crise também estimulou o uso eficiente de ETR, que eram usados muitas vezes por conveniência devido ao preço baixo. A *Hitachi*, outro exemplo, começou a produzir ímãs com quantidades menores de ETR que conseguiam manter o desempenho anterior.

A luta do governo chinês contra o mercado negro foi relatada no *White Paper 2012*, apresentando as medidas para alcançar as metas traçadas. O relatório expõe dados de anos anteriores, mostrando que 600 casos de mineração e prospecção ilegal foram investigados e retificados, mais de 100 casos foram arquivados para ações futuras, e 13 minas e 76 empresas de fundição e separação tiveram suas atividades encerradas até cumprirem as exigências impostas (STATE COUNCIL, 2014).

Segundo a *Rare Earth Industry Association*, 40.000 t de TR foram extraídas ilegalmente em 2014. O MIIT anunciou, em agosto de 2015, que não pouparia esforços para combater a mineração ilegal, que causa uma queda no preço devido ao excesso de oferta (CHINADAILY, 2015).

Autoridades chinesas se pronunciaram quanto à queda das exportações de ETR. O motivo seria a reorganização de toda a cadeia industrial das TR para combater a produção e exportação ilegal e, assim, preservar o meio ambiente. O governo chinês adotou uma série de normas e regulamentações para proteger os recursos e desenvolver um caminho sustentável de exploração. Mas, de acordo com SCHULER *et al.* (2011), entre 10 e 15% da produção chinesa ainda é ilegal.

O aumento da produção ilegal resulta em uma queda no preço do produto, uma vez que causa um excedente de oferta. A fim de controlar o contrabando e a exploração ilegal, que possui baixa eficiência na utilização do recurso e causam sérios impactos ambientais, a China vem tomando uma série de medidas. Mesmo com preços baixos o mercado negro ainda é uma atividade lucrativa.

No final de 2012, a China reduziu os direitos de mineração, de 113 para 67, concentrando-os em apenas três empresas, que juntas somam mais de 90% das reservas permitidas para exploração. Ainda assim, foram criados seis grupos de empresas para uma consolidação da indústria de TR direcionada à mineração, beneficiamento e utilização consciente do recurso (RAO, 2016).

A utilização consciente será levada para o plano de controle da produção. As empresas de beneficiamento e separação de TR, hoje 130, serão reduzidas a 20 ou menos em breve. A capacidade de produção dessas 130 empresas é de mais de 400.000t /ano. A ponto de comparação, em 2008, a capacidade era de 130.000t/ano (RAO, 2016).

Após a criação dos seis grupos, a China pretende reduzir a capacidade instalada de beneficiamento e separação e monitorar com mais rigor as questões ambientais. Assim, há tendência de aumento da produção nos outros países, apesar da dificuldade de produzir fora da China. A produção chinesa se expandiu sem custos ambientais e regulatórios, com isso barateou o produto e impediu a competição com empresas fora da China (RAO, 2016).

Em 2013 a cota de produção foi de 93.800t, mas estima-se que foram produzidos 160.000t naquele ano (RAO, 2016). De acordo com a Associação da Indústria de Terra Rara da China (ACREI), em 2014, 40.000t de ETR foram minerados ilegalmente, enquanto a produção legal foi de 110.000t (XINHUA, 2015). Os dados do mercado negro não são apresentados na Tabela 8, portanto a produção mundial está subestimada.

Com a instabilidade do mercado e a dependência do metal chinês, diversos países vão em busca de ofertas não chinesas, investindo em novas minas de ETR e até mesmo reabrindo minas desativadas, como em Mountain Pass, na Califórnia e *Lynas Corporation*, na Austrália (MCLELLAN *et al.*, 2014)

A China deveria elevar os preços para uma oferta lucrativa e sustentável. A produção ambientalmente sustentável requer altos custos para gerenciar os resíduos gerados. Com uma legislação ambiental mais rígida, fiscalização adequada e implantação de taxas, poucas empresas terão uma operação economicamente viável. Essa racionalização do setor será semelhante à adotada anteriormente em metais básicos, aço e outros *commodities* (RAO, 2016).

As exportações chinesas aumentaram em 2016, 46.749t, mais de 34% comparado ao ano anterior. E o preço médio das TR chinesas caiu mais de 30% no mesmo período, o que mostra uma alta volatilidade. Mesmo a China tentando controlar o mercado, ele possui sua própria dinâmica.

O insaciável e contínuo crescimento da demanda por ETR combinado com o seu pequeno e opaco mercado resultou em um boom na exploração global. O medo instaurado pela crise nos países importadores e dependentes de ETR da China aumentou, levando a descoberta de mais de 400 potenciais projetos de exploração de ETR. Com a alta dos preços, especuladores compraram ações de pequenas mineradoras, que foram alimentadas por investidores inexperientes com a promessa de desenvolver novas fontes de TR.

Apesar disso, o mercado mudou muito pouco. Inclusive a *Molycorp*, que tinha planos de crescimento para sua produção, entrou em processo de falência em 2015, três anos após sua reabertura em 2012. E esses novos projetos dificilmente terão chances de sobreviver, exceto algumas minas que produzirão ETR críticos e ETRP. Isso se dá porque a viabilidade da produção fora da China ainda é uma questão mal resolvida.

4 RISCO DE SUPRIMENTO E CRITICIDADE

Embora o volume e a distribuição das reservas demonstrem o potencial de produção de TR, os ETR são considerados críticos pelos países importadores, principalmente em decorrência da concentração da produção na China. Para confirmar esse fato, o Departamento de Energia Americano (US DoE) apresentou os ETR (Dy, Nd, Tb, Eu e Y) como os mais críticos para a indústria de energia limpa nos EUA de 2015 a 2025.

De acordo com o Serviço Geológico Britânico (BGS), os ETR aparecem no topo da lista dos materiais mais críticos da *Risk List 2015*, que é elaborada utilizando os seguintes critérios:

1. Concentração da produção;
2. Distribuição da reserva;
3. Taxa de reciclagem;
4. Substituibilidade;
5. Governança do maior produtor;
6. Governança do detentor da maior reserva;
7. Porcentagem do elemento que é produzido como coproduto (BGS, 2015).

Vale notar que os parâmetros utilizados pelo BGS para a elaboração da lista não se relacionam com a demanda dos elementos, focando nos riscos de suprimento, com a exceção do parâmetro “Substituibilidade”. Para essa versão de 2015, o parâmetro “Porcentagem do elemento que é produzido como coproduto”, foi incluído na análise, substituindo o antigo parâmetro que se baseava na abundância na crosta terrestre.

A classificação de criticidade, de acordo com o US DOE (2011), é baseada na importância das aplicações, grau de substituição e monopolização da oferta. O conceito de criticidade é frequentemente utilizado nos estudos de viabilidade de uma exploração. Quanto mais elementos críticos presentes no minério a ser explorado, maiores as chances de viabilidade devido à baixa oscilação no mercado desses elementos.

De acordo com BRUMME (2014), existem quatro particularidades a se considerar no mercado das TR: os ETR ocorrem em conjunto, portanto a extração de um determinado elemento não depende apenas do seu próprio mercado; eles geralmente são coprodutos de outros minerais, ou seja, são coprodutos deles mesmos e de um

elemento um nível acima; a China possui um poder de mercado significativo; e, por último, a extração e o processamento de ETR causam efeitos externos, como os ambientais. Todas essas características devem ser consideradas em uma análise desse mercado.

Como falado, o potencial risco de oferta dos ETR preocupou os países consumidores desses materiais após a crise de 2010. O risco decorre não apenas por uma ineficiência do mercado, devido à concentração da produção, mas também devido às políticas protecionistas por parte da China (BARTEKOVA', 2016).

Os riscos de fornecimento de combustíveis fósseis e seus impactos sobre a economia vêm sendo estudados ao longo de décadas, mas somente nos últimos anos surgiram, de fato, estudos de avaliação da criticidade de minerais não combustíveis (ERDMANN e GRAEDEL, 2011).

Na década de 1970, foi emitido um memorando pela Casa Branca com o assunto *Critical imported commodities*, um estudo mais aprofundado da potencial ameaça representada pela manipulação da oferta ou do preço de *commodities* não combustíveis, que eram críticas por outros países (WHITE HOUSE, 1974). Esse pode ser considerado o primeiro estudo estritamente relacionado com materiais críticos (JIN *et al.*, 2016).

Em 1983, o “*Congressional Budget Office*” avaliou a vulnerabilidade das interrupções do suprimento para oito minerais dependentes de importação no estudo intitulado “*Strategic and Critical Nonfuel Minerals: Problems and Policy Alternatives*” (CBO, 1983). Os riscos apresentados envolviam fatores de oferta e demanda. Do lado da demanda foram incluídos fatores como monopólio, instabilidade política, dificuldades logísticas, fontes alternativas de fornecimento e produção secundária. Na demanda, fatores que consideravam o quão sério uma interrupção poderia ser para a economia, como: o quão crítico eram os usos do mineral, em qual setor da economia seus usos se concentravam e o potencial para substitutos nesses usos (CONGRESSIONAL BUDGET OFFICE, 1983).

Um quarto de século depois, veio o estudo do *National Research Council* (NRC, 2008), *Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy*, que criou uma matriz para representar o grau de criticidade de alguns minerais não combustíveis para a economia norte-americana.

De acordo com o NRC (2008), um mineral pode ser considerado crítico caso exerça uma função essencial e não exista substitutos satisfatórios para tal. Portanto, a criticidade está relacionada com a demanda por determinado mineral que atenda especificações exigidas em certas aplicações-chave. A criticidade também relaciona-se a possíveis consequências econômicas e sociais, caso suas aplicações essenciais não possam ser cumpridas. Além disso, um mineral pode ser considerado crítico somente se a avaliação indicar uma alta probabilidade de restrições no fornecimento, condicionadas à indisponibilidade física ou preços muito elevados. Por sua vez, a probabilidade de restrição de oferta de um mineral crítico é mais alta se a demanda exigida para as aplicações-chave representar uma proporção elevada da oferta disponível.

A Figura 19 apresenta a Matriz de Criticidade desenvolvida pela NRC para ser utilizada na avaliação da criticidade de minerais. As duas dimensões da criticidade são: importância no uso e disponibilidade. A primeira incorpora a ideia de que alguns materiais ou minerais são mais importantes em uso que outros. Aqui, substituição é um conceito-chave. Caso um material tenha um substituto que cumpra seu papel sem grandes perdas técnicas, ou seja, relativamente barato, pode-se dizer que sua importância é baixa. Por outro lado, se a substituição é cara ou tecnicamente difícil, a importância é alta (NRC, 2008).

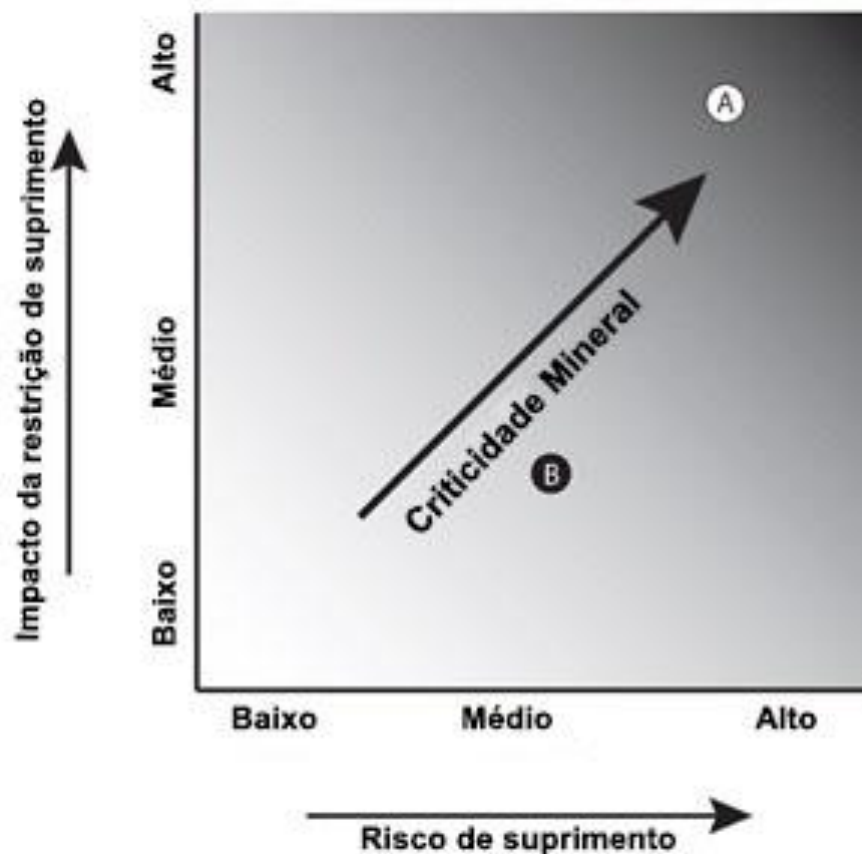


Figura 19 - Matriz de criticidade desenvolvida pelo NRC (2008)

Fonte: elaboração própria adaptada de NRC (2008)

Já a segunda dimensão, disponibilidade, reflete considerações de médio a longo prazo, como abundância do mineral, capacidade técnica de extração, questões sociais, ambientais, políticas e econômicas. Ainda é importante considerar a confiança ou risco de suprimento em um curto prazo. Nas duas dimensões da matriz, o tempo é um fator importante (NRC, 2008).

O eixo vertical da matriz (Figura 19) engloba a ideia da importância no uso e representa o impacto da restrição da oferta. Enquanto o eixo horizontal incorpora o conceito de disponibilidade e representa o risco de suprimento. O grau de criticidade aumenta na medida em que se afasta da origem. Na Figura 19, por exemplo, o mineral “A” é mais crítico que o “B”.

Antes disso, sem utilizar o termo *criticality*, ALONSO *et al.* (2007) lançaram um documento que examina a questão da vulnerabilidade de materiais juntamente com a disponibilidade a partir da perspectiva de um tomador de decisão da cadeia de

suprimentos. Esse estudo sinaliza dois mecanismos principais por trás do risco da disponibilidade de materiais: limitação ou restrição física e eficiência estrutural ou institucional.

A ineficiência institucional abrange falhas de mercados, empresas e governos, que podem resultar em um conjunto de circunstâncias que interferem imediatamente na disponibilidade de recursos. Já as limitações físicas são determinadas pela quantidade e qualidade de um recurso (ALONSO *et al.* 2007).

O horizonte temporal influencia a forma de determinar a criticidade, pois muitas questões não estão claramente atribuídas à vulnerabilidade ou ao risco da oferta. O estudo da NRC, por exemplo, considera a demanda de materiais para suprir tecnologias emergentes como um critério de vulnerabilidade, enquanto o US DoE, a considera como critério no risco de suprimento (ERDMANN e GRAEDEL, 2011).

As metodologias utilizadas nos estudos geralmente aplicam três diferentes abordagens para avaliação da criticidade: matriz de criticidade, que é o modelo mais utilizado; tabela de criticidade; ou análise quantitativa em cenários de oferta e demanda. A maior parte dos estudos avalia o risco de oferta e de vulnerabilidade do sistema para uma interrupção da oferta. Porém, a escolha dos indicadores é bastante variada, e os métodos de agregação impactam diretamente no resultado (ERDMANN e GRAEDEL, 2011).

GRAEDEL *et al.* (2012) desenvolveu uma metodologia para avaliar a criticidade de metais baseada na NRC (2008), acrescentando um novo eixo, implicações ambientais, como é apresentado na Figura 20. Esse eixo foi incluído para criar um espaço de criticidade. Na verdade, é apresentado como um indicativo da potencial consequência ambiental da utilização de determinado metal. Essa metodologia foi desenvolvida para aplicação em três níveis organizacionais: corporativo, nacional e global.

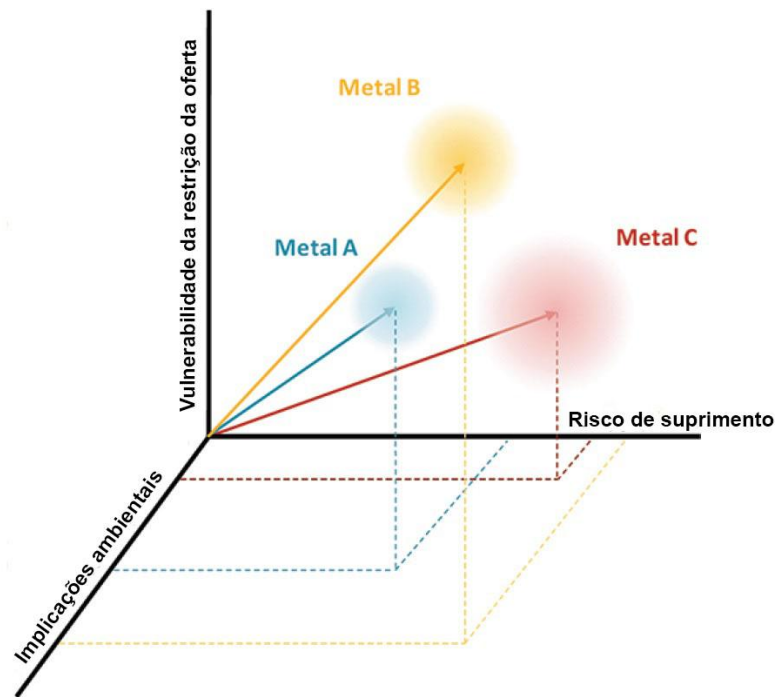


Figura 20 - Matriz espacial de criticidade

Fonte: elaboração própria adaptada de GRAEDEL *et al.* (2012)

De acordo com JIN *et al.* (2016), não existe uma definição acordada para criticidade ou metodologias de avaliação. Estudos de disponibilidade, escassez e riscos de suprimento estão relacionados à criticidade. As pesquisas dessa área são bastante recentes e atraem, principalmente, olhares de órgão governamentais. Os estudos de criticidade têm como objetivo final encontrar soluções para evitar ou mitigar os problemas no futuro, ou seja, um mecanismo de apoio ao tomador de decisão.

Por outro lado, existem limitações para esse tipo de estudo. As métricas utilizadas são geralmente estáticas. Mesmo que alguns estudos incluam aspectos dinâmicos, não são suficientes o bastante para refletir as complexidades e as interações do mercado. Além disso, as ferramentas de avaliação requerem grandes quantidades de dados e conhecimento profissional, aumentando, assim, o grau de incerteza. A subjetividade das opiniões de profissionais ou dos decisores também contribuem na incerteza.

Alguns obstáculos também foram listados por JIN *et al.* (2016), principalmente referentes ao conhecimento da cadeia de suprimento e a complexidade da concepção do produto. Segundo os autores, a situação se agrava quando existe um domínio quase completo da cadeia, como o caso das TR na China. Outro obstáculo é a

necessidade de recursos financeiros e humanos, sendo esses os motivos dos estudos serem frequentemente realizados por instituições suportadas pelo governo. Ainda existem as dificuldades relativas à qualidade dos dados, recursos, reservas, produção e consumo, que podem aumentar a incerteza.

Mesmo com limitações, os estudos de criticidade não perdem sua importância, pois podem ser utilizadas para evitar que países ou indústrias sofram com problemas de suprimento.

4.1 CRITICIDADE DAS TERRAS RARAS

A criticidade das TR foi avaliada por diversos estudos, como NRC (2008), EC (2010), US DOE (2011), JRC (2011), JRC (2013), EC (2014), principalmente depois da crise de 2010.

Nesse cenário, alguns ETR foram considerados como minerais críticos. O estudo do NRC (2008), por exemplo, apresentou os resultados da avaliação pela matriz mostrada na Figura 21. Percebe-se que as aplicações em controle de emissões (catalisadores), ímãs e eletrônicos apresentam o maior grau de criticidade. Enquanto no refino do petróleo, o impacto na restrição da oferta é menor, diminuindo o grau de criticidade para essa aplicação. A criticidade média, em azul na Figura 21, representa uma média ponderada simples, em que o peso corresponde ao percentual de demanda de cada aplicação.

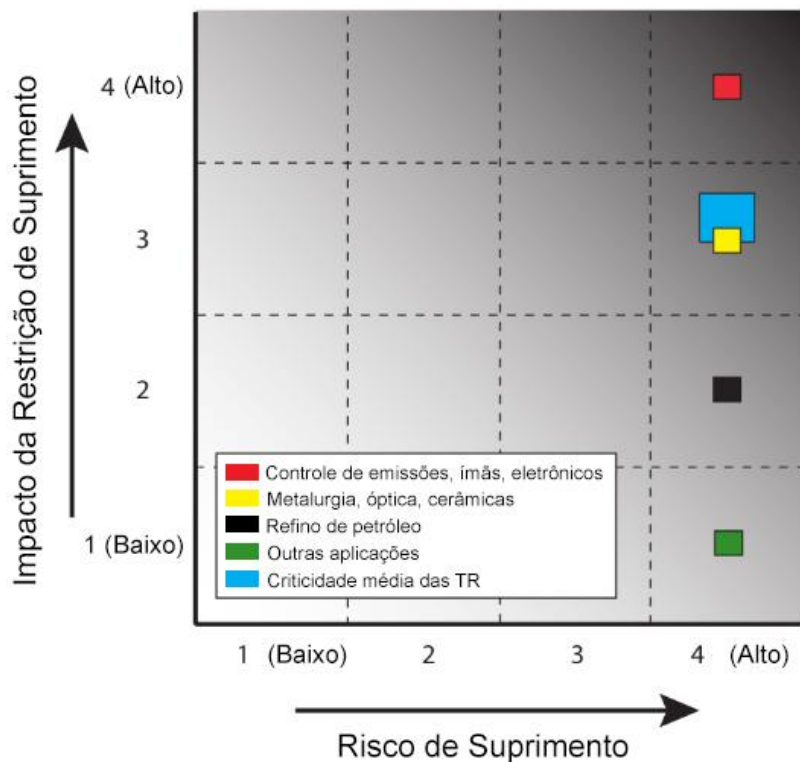


Figura 21 - Matriz de criticidade das TR

Fonte: elaboração própria adaptada de NRC (2008)

Em 2010, a Comissão Europeia lançou o relatório *Critical raw material for the EU*, que identificou uma lista de materiais críticos para a União Europeia. As TR foram classificadas com um risco de suprimento elevado e importância econômica média, como pode ser visto na Figura 22 (EC, 2010). Em 2013, a avaliação da criticidade foi atualizada e expandida de 41 para 54 materiais. Os ETR foram analisados separadamente em dois grupos, leves e pesados (EC, 2014). O resultado é mostrado na Figura 23, onde o grupo dos ETRL possui um risco de suprimento menor que os ETRP.

O escopo dos trabalhos apresentados pelo NRC (2008) e EC (2010, 2014) está limitado à economia do EUA e da EU, respectivamente.

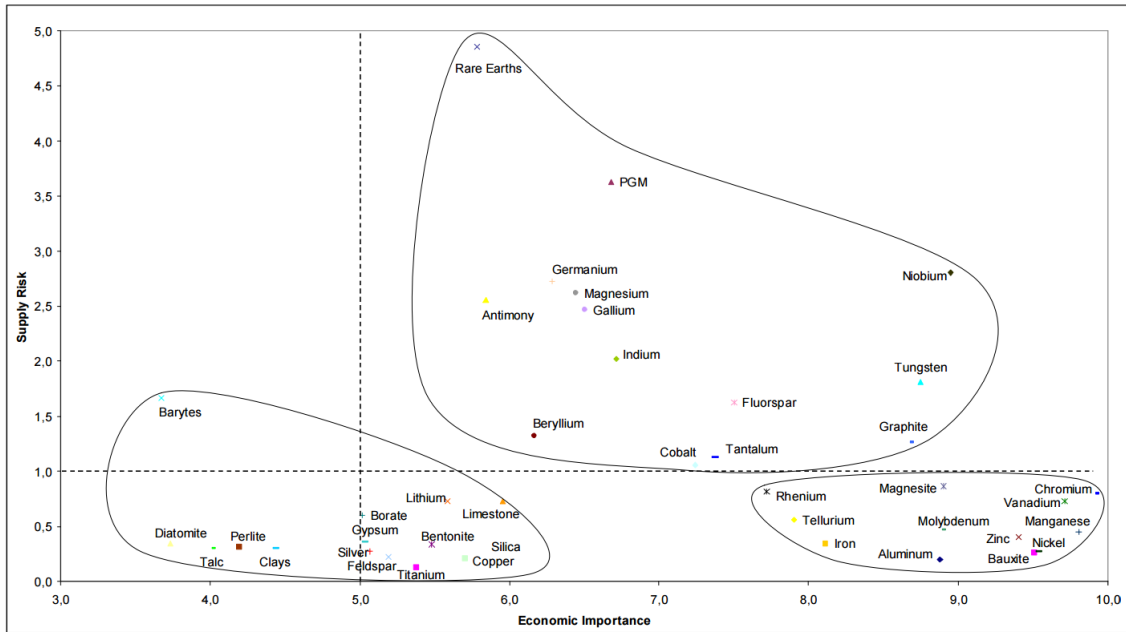


Figura 22 - Matriz de criticidade da Comissão Europeia de 2010

Fonte: EC (2010)

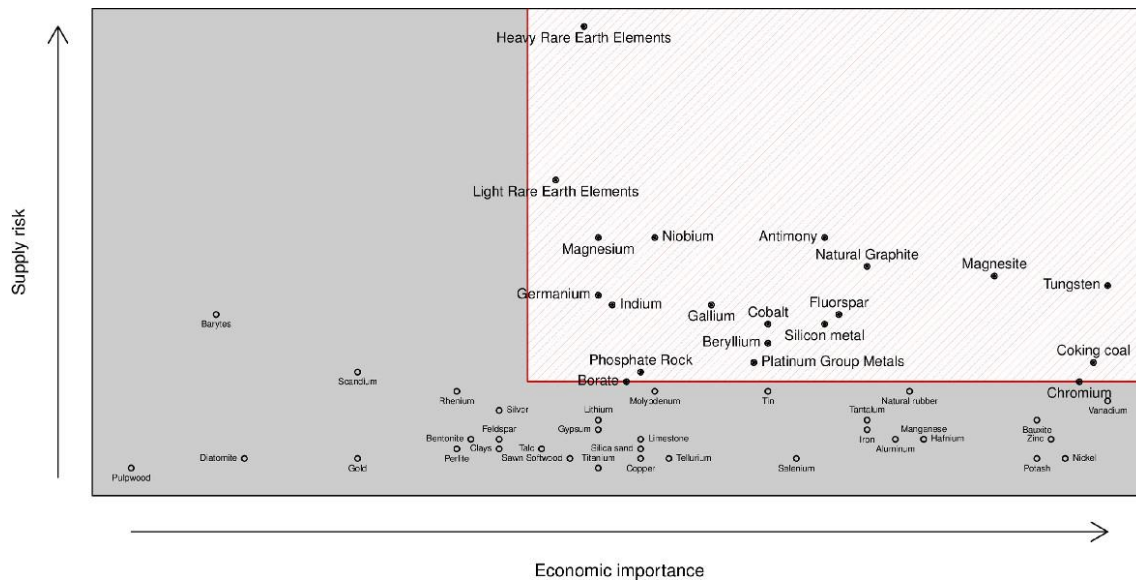


Figura 23 - Matriz de criticidade da Comissão Europeia de 2013

Fonte: EC (2013)

Partindo para um escopo mais específico, o das aplicações em energias renováveis, estudos foram apresentados pelo *US Department of Energy* (US DOE, 2010 e 2011) e pela Comissão Europeia *Joint Research Center* (JRC, 2011) *Critical Metals in Strategic Energy Technologies*.

Em 2010, o US DoE lançou o relatório *Critical Materials Strategy*, em que avaliou o papel dos ETR e outros materiais para a economia das energias limpas como turbinas eólicas, carros híbridos e elétricos, células fotovoltaicas, e sistema de iluminação eficiente. Foram apresentados cinco ETR Nd, Dy, Eu, Tb e Y como críticos, em curto (2010-2015) e longo prazo (2015-2025), sendo que a diferença encontra-se no grau de criticidade.

Em 2011, foi lançada uma nova versão do relatório com as avaliações de criticidade atualizadas e os mesmos ETR continuaram na considerada zona crítica. A Figura 24 apresenta a matriz comparando o resultado dos estudos de 2010 com o de 2011 para o curto prazo. Já a Figura 25 apresenta a comparação para o longo prazo.

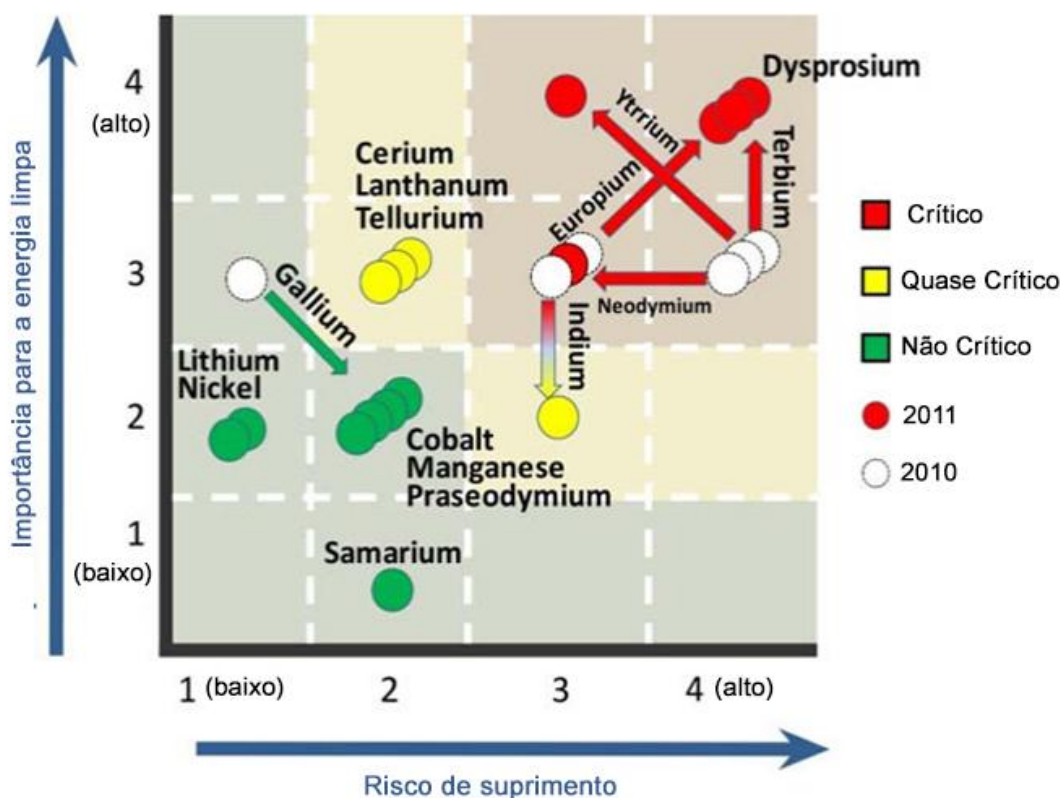


Figura 24 - Matriz de criticidade de curto prazo do US DoE (2011)

Fonte: US DoE (2011)

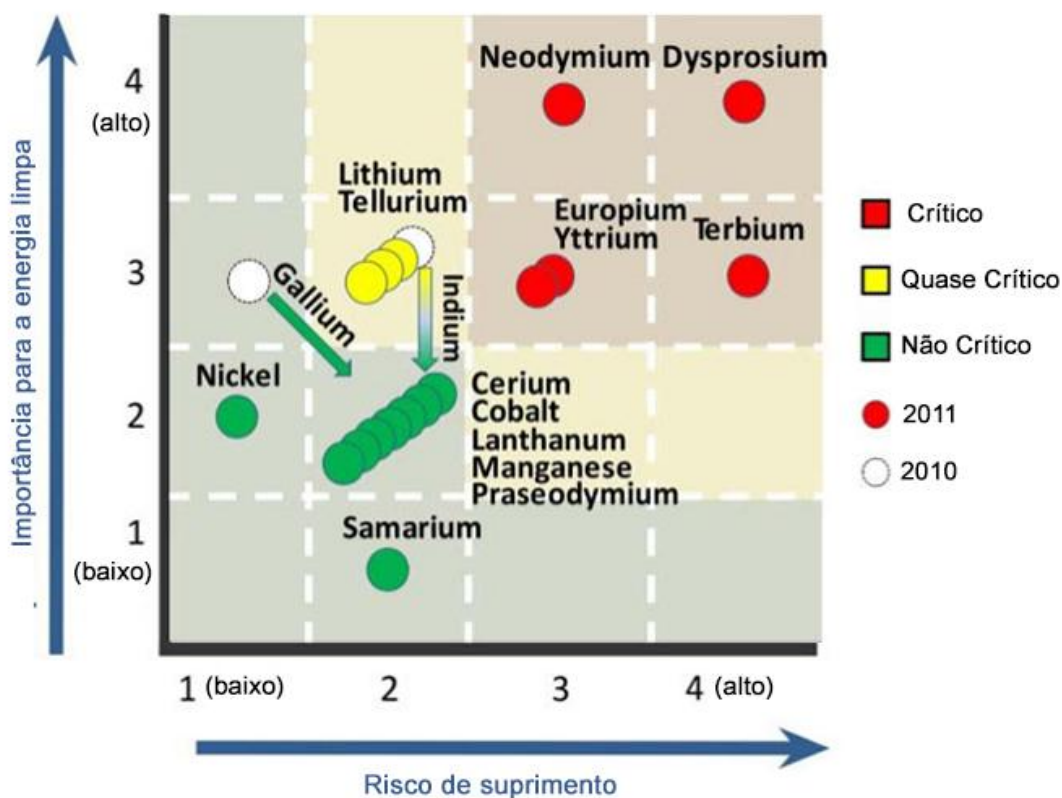


Figura 25 - Matriz de criticidade de longo prazo do US DoE (2011)

Fonte: US DOE (2011)

Já o estudo desenvolvido pelo JRC, *Critical Metals in Strategic Energy Technologies*, analisou 14 elementos cruciais que poderiam se tornar gargalos para implantação de tecnologias de energia de baixo carbono de acordo com o “SET-Plan”⁷ - energia eólica, solar (PV e CSP), fissão nuclear, CCS, bioenergia e rede elétrica. Cinco

⁷ Plano Estratégico Europeu para as Tecnologias Energéticas (SET-Plan), criado em 2007, e tem como objetivo acelerar o desenvolvimento e a implantação de tecnologias de baixo teor de carbono. Buscando aprimorar as novas tecnologias e reduzir os custos através da coordenação dos esforços nacionais de pesquisa e do financiamento de projetos (EC, 2017). https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjHtKDM8f3TAhVGQpAKHU_eAsMQFggnMAA&url=https%3A%2F%2Fec.europa.eu%2Fenergy%2Fen%2Ftopics%2Ftechnology-and-innovation%2Fstrategic-energy-technology-plan&usq=AFQjCNHX-nFsprV32LhS3YI8N5sksl9fug&sig2=4vS87PaPWcdBzBmSyIN3BA

elementos foram considerados críticos, entre eles dois ETR, Dy e Nd, que assumiram o topo da lista. Além de telúrio (Te) índio (In) e gálio (Ga) (JRC, 2011).

Em 2013, a JRC lançou um novo estudo, *Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector*. Nesse, são investigadas outras tecnologias energéticas e de baixo teor de carbono que desempenham não só um papel importante no caminho da UE para a descarbonização, mas que também podem competir pelos mesmos metais identificados nas seis tecnologias do SET-Plan. Além das tecnologias abordadas no estudo anterior, outras cinco foram incluídas: células de combustível, armazenamento de eletricidade, veículos elétricos e iluminação. Oito materiais foram classificados com alto grau de criticidade, entre eles seis ETR: Dy, Eu, Tb, Y, Pr e Nd. Além de gálio e telúrio (JCR, 2013).

Diversos estudos desenvolveram cenários de demanda de ETR apoiados em planos de expansão de soluções energéticas de baixa emissão de carbono, principalmente energia eólica e carros híbridos e elétricos. Como apresentado anteriormente, essas duas tecnologias são dependentes de ímãs permanentes de TR. A partir disso, surge a questão: a potencial escassez poderia limitar a implantação desses planos?

4.2 RISCO DE SUPRIMENTO DAS TERRAS RARAS NO SETOR DE TRANSPORTE E ENERGÉTICO PARA O BRASIL

Como apresentado anteriormente, os ETR são considerados materiais críticos em diversos estudos de criticidade já realizados. Principalmente devido à crescente demanda pelos ímãs permanente de TR (*Rare Earth Permanent Magnet – REPM*), mais especificamente, o NdFeB. Assim, esse capítulo tem o objetivo de verificar, de forma inédita, se há risco de suprimento dos ETR presentes no ímã NdFeB e identificar se poderá vir a ser um gargalo para setor de transporte e energético de acordo com os planos brasileiros. Para isso, será estimada quantidade dos ETR necessários para a ampliação das frotas de automóveis híbridos e elétricos e das turbinas eólicas.

A metodologia para compor o presente estudo foi baseada em MOSS *et al.* (2013) que lançaram o estudo *Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector* (JRC, 2013).

Para quantificar o uso dos ímãs NdFeB nos setores avaliados foi utilizada uma metodologia *bottom-up*, onde pode ser identificado o uso nas diferentes tecnologias. Esse levantamento foi realizado, sempre que possível, levando em consideração a realidade brasileira.

Foram consideradas informações detalhadas e atualizadas das tecnologias e das tendências para os dois setores. Os materiais utilizados como base estão entre artigos científicos pesquisados no Periódicos Capes, relatórios de departamentos e centros de pesquisa ligados ao governo do Brasil, União Europeia e EUA, além de dados de especialistas da área.

Foi identificada a utilização de REPM nos motores de veículos elétricos e híbridos e em turbinas eólicas para a geração de energia elétrica (US DOE, 2011; JRC, 2013). Na literatura, ainda é possível encontrar outras aplicações no setor de energia como em sistemas de armazenamento, geradores de pequenas centrais hidrelétricas, plantas de energia de marés e de ondas, geradores de pequeno porte à combustão e em outras. No setor de transporte, além de serem aplicados nos motores de tração de veículos elétricos e híbridos, podem ser utilizados em bicicletas, *scooters* e trens de levitação magnética (SCHULZE e BUCHERT, 2016).

O presente estudo se concentra nos veículos híbridos e elétricos e nas turbinas eólicas, uma vez que as outras aplicações nos setores de transporte e energético não apresentaram relevância no cenário nacional.

Dessa forma, este estudo considera o Cenário do Plano Governamental (CPG), apresentado pelo Projeto IES-Brasil 2050⁸, como base para o cálculo da tendência de expansão dessas tecnologias. O CPG assume, sempre que possível, os planos oficiais do governo, como o Plano Nacional de Energia (PNE), os Planos Decenais de Energia (PDE) e o Balanço Energético Nacional (BEN), todos publicados ou em vias de publicação pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

Sendo assim, O CPG já considera atividades de mitigação, conforme definido pela Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC, instituído pela Lei Nº 12.187/09, regulamentado pelo Decreto Nº 7.390/10 e anunciado no contexto da 15ª Conferência

⁸ Emissão de Gases de Efeito Estufa – 2050: Implicações Econômicas e Sociais do Cenário de Plano Governamental desenvolvido pelo CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ

das Partes (COP-15) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima. Também considera a iNDC (*Intended Nationally Determined Contribution*, ou Contribuição Pretendida Nacionalmente Determinada), que foram os compromissos assumidos pelo Brasil na COP-21, em 2015.

Entre as medidas apresentadas como iNDC para cumprimento da meta de manter o aumento da média global abaixo de 2° C em relação aos níveis pré-industriais, são consideradas para setor de energia:

- aumentar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030, expandindo o consumo de biocombustíveis, aumentando a oferta de etanol, inclusive por meio do aumento da parcela de biocombustíveis avançados (segunda geração), e aumentando a parcela de biodiesel na mistura do diesel;
- alcançar uma participação estimada de 45% de energias renováveis na composição da matriz energética em 2030, incluindo:
 - expandir o uso de fontes renováveis, além da energia hídrica, na matriz total de energia para uma participação de 28% a 33% até 2030;
 - expandir o uso doméstico de fontes de energia não fóssil, aumentando a parcela de energias renováveis (além da energia hídrica) no fornecimento de energia elétrica para ao menos 23% até 2030, inclusive pelo aumento da participação de eólica, biomassa e solar (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2015).
- alcançar 10% de ganhos de eficiência no setor elétrico até 2030.

Já, para o setor de transportes, as metas são vagas e não possuem metas:

- promover medidas de eficiência, melhorias na infraestrutura de transportes e no transporte público em áreas urbanas (REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2015).

4.2.1 SETOR DE TRANSPORTE

No Brasil, de acordo com o BEN (2016), 32,2% de toda a energia consumida no país foi para o setor de transporte em 2015. Desse total consumido pelo setor, apenas 21% da energia foi originada de fontes renováveis. Veículos híbridos (*hybrid electric vehicle* - HEV) e elétricos (EV) são comercializados, mas representam uma parcela muito pequena nas vendas. De acordo com dados da Associação dos Fabricantes de

Veículos Automóveis (ANFAVEA), 1901 unidades de automóveis e comerciais leves híbridos e elétricos foram licenciados em 2016, representando cerca de 0,05% do total (ANFAVEA, 2017).

No estudo de demanda de energia para o PNE 2050, é ressaltado que a expansão da frota de veículos leves no Brasil nas próximas décadas trará um desafio no que se refere ao impacto ambiental, ao aumento de emissões de GEE, além das questões relacionadas à mobilidade urbana. Tais desafios repercutem em dois pontos centrais: penetração tecnológica na indústria automotiva e distribuição modal (EPE, 2016).

A eletrificação da frota é fundamental para a redução de GEE, pois, no cenário nacional, o setor de transporte é um dos maiores emissores. Além disso, esse processo aumentaria a segurança energética (IEA, 2016). Vale ressaltar que o Brasil ainda tem a vantagem de possuir uma matriz elétrica com grande participação da fonte hídrica.

Os veículos híbridos e elétricos ainda possuem um valor muito elevado, limitando a expansão dessas tecnologias. A disseminação desses veículos e a implementação da estrutura necessária só serão possíveis com a redução de custos, que permitirá uma penetração mais rápida.

No Brasil, as políticas urbanas e ambientais adotadas, com foco na diminuição do consumo de combustíveis líquidos e, conseqüentemente, redução das emissões de GEE visam essencialmente dois objetivos: incentivar investimentos em transportes de massa e definir o ritmo de incorporação de tecnologias mais avançadas nos veículos leves e pesados (EPE, 2016).

De acordo com a Agência Internacional da Energia (IEA), para cumprir o objetivo estabelecido pelo Acordo de Paris, limitando o aumento da temperatura global a menos de 2°C, pelo menos 20% de todos os veículos de transporte rodoviário a nível mundial terão de ser eletricamente conduzidos até 2030, incluindo o transporte ferroviário (UNFCCC, 2015).

Para atingir esse objetivo, o modelo da IEA indica que todos os veículos com motor elétrico, incluindo veículos elétricos de passageiros, motocicletas, triciclos, vans, comerciais leves, caminhões, etc., devem representar 35% das vendas globais em 2030 (UNFCCC, 2015). Nesse contexto, o objetivo de aumento global para a frota de veículos elétricos (EV) é fixado em 20 milhões até 2020, aumentando para 100

milhões ou até mesmo 150 milhões, em um cenário mais ambicioso até 2030 (IEA, 2016). No final de 2015, a frota mundial de EV global era de 1,26 milhão (IEA, 2016).

4.2.1.1 Aspectos tecnológicos dos veículos híbridos e elétricos

De acordo com o *Global EV Outlook 2016*, os veículos elétricos (EV) incluem veículos elétricos a bateria (BEV), veículo elétrico híbrido *plug-in* (PHEV) e veículos elétricos com células a combustível (FCEV) (IEA, 2016). Atualmente, HEV, BEV e PHEV são os tipos mais comuns de veículos híbridos e elétricos comercializados. Estes três tipos de veículos são caracterizadas como:

- HEV: combina um motor de combustão interna (ICE) e um ou mais motores elétricos. O veículo híbrido elétrico completo pode ser movido exclusivamente pelo motor elétrico sob certas condições de funcionamento;
- BEV: a propulsão ocorre exclusivamente por meio de um ou mais motores elétricos, e são alimentados por uma bateria recarregável. Essa bateria é recarregada por uma fonte de energia elétrica externa;
- PHEV: inclui baterias que podem ser recarregadas por uma fonte de energia elétrica externa, e também possuem motor de combustão interna (ICE) (JRC, 2016).

Existem diversos tipos de motores elétricos que podem ser utilizados para propulsão de veículos híbridos e elétricos. Os mais utilizados são os de indução em gaiola de esquilo (*squirrel cage induction motors* - SCIM) e os síncronos de ímãs permanentes (*permanent magnet synchronous motor* – PMSM) (RIBA *et al.*, 2016).

De acordo com BURWELL *et al.* (2013), a participação dos síncronos é de 83% do fornecimento dos motores de tração para veículos híbridos e elétricos. Vale lembrar que nem todo motor síncrono utilizado para propulsão desses veículos contém ímãs permanentes. Existe ainda o motor síncrono de rotor bobinado, utilizado em alguns modelos da Renault, (ELWERT *et al.*, 2016; RIBA *et al.*, 2016). Os SCIM são aplicados em motores dos BEV, como no Tesla S, modelo de EV mais vendido em 2015, nos EUA, (ELWERT *et al.*, 2016).

Em 2015, entre os dez modelos de EV mais vendidos na Europa, apenas dois não faziam o uso de ímãs permanentes, enquanto nos EUA, apenas um dos dez (ELWERT *et al.*, 2016). Por outro lado, mais de 45% do total de BEV vendidos não utilizaram ímãs na Europa, em 2015 (JRC, 2016). O mais importante é perceber, que mesmo

com a maior participação de PMSM para propulsão de veículos híbridos e elétricos, o número de unidades vendidas é que irá definir a quantidade de ímãs utilizados.

Os SCIM são mais utilizados em BEV do que em HEV e PHEV. Os híbridos são mais complexos e possuem número grande de componente, assim requerem motores mais compactos (RIBA *et al.*, 2016). Esse é um dos motivos da maior presença de PMSM em veículos híbridos. SCHULZE e BUCHERT (2016) consideraram uma aplicação de ímã NdFeB em 25% dos EV em um cenário de baixa demanda por essa tecnologia, e 75% num cenário de alta demanda. Já o US DoE (2011) considerou que 100% de HEV faz uso de ímãs de TR e de 90-100% dos EV também utiliza o ímã. Enquanto RADEMAKER *et al.* (2013) consideraram a utilização dos ímãs NdFeB em 100% dos motores dos veículos híbridos e elétricos.

Para a realidade brasileira, foi considerado 100% dos HEV e PHEV utilizando ímãs NdFeB, enquanto 50% dos BEV possuiriam ímãs em seus motores de propulsão.

A quantidade de ímã presente em cada motor depende de vários fatores e varia de acordo com o tamanho, potência e suas condições de funcionamento. Na literatura, é possível encontrar motores de carros que utilizam 1 kg de ímã e até os que utilizam 2,4 Kg (SCHULZE e BUCHERT, 2016). A Tabela 10 apresenta a quantidade de ímã considerada por alguns autores.

Tabela 10 - Massa de ímã no motor por veículo

	kg de NdFeB no motor por veículo		
	HEV	BEV	PHEV
ZEPF (2013)	1,3	-	-
(RADEMAKER <i>et al.</i> , 2013)	1,02	1,05	1,02
(ELWERT <i>et al.</i> , 2016)	1,4	2,1	-
JRC (2016)	0,63	1,5	1,5

Fonte: elaboração própria de acordo com os autores citados

Esses ímãs, por operarem em temperaturas elevadas (cerca de 200°C nos híbridos), geralmente são dopados com disprósio (Dy), e até térbio (Tb) em algumas ocasiões. O Tb pode fazer uma função similar ao Dy, mas raramente é usado devido ao seu alto preço. O praseodímio (Pr) também pode substituir diretamente o neodímio (Nd) até certo ponto sem um impacto severo nas propriedades magnéticas, (ELWERT *et al.*,

2016). Esses dois últimos elementos juntos são comumente chamados de didímio (Nd-Pr).

A Tabela 11 apresenta os valores médios da proporção em massa de cada ETR presente no ímã NdFeB quando aplicado em um motor de propulsão. O térbio não foi incluído, pois raramente aparece na literatura. Foram considerados os dados fornecidos em JRC (2016).

Tabela 11 - Proporção em massa dos ETR nos ímãs

	% massa NdFeB			
	JRC (2013)	Rademaker (2013)	Zepf (2013)	JRC (2016)
Nd	27	29	22	22,65
Pr	-	-	-	7,55
Dy	4	9	10	7,5

Fonte: elaboração própria de acordo com os autores citados

4.2.1.2 Projeção da quantidade de elementos de terra rara nos veículos híbridos e elétricos para 2050

Dessa forma, para cumprir o objetivo principal desse trabalho, serão realizadas projeções de venda de veículos híbridos e elétricos, considerando a participação das diferentes tecnologias até 2050 com o intuito de quantificar os ETR necessários ao atendimento dessa demanda. No entanto, esse estudo se limita a quantificar apenas os veículos leves (automóveis e comerciais). Os veículos comerciais leves elétricos também não foram considerados nesse estudo. O escopo desse estudo também se limitou a BEV e PHEV, uma vez que a tecnologia FCEV ainda está em estágio de desenvolvimento (BARTEKOVÁ, 2016).

Para a determinação do número de veículos híbridos e elétricos a serem vendidos no Brasil até 2050, foram adotadas como base as considerações do cenário de emissão de GEE para o setor de transporte presentes no estudo IES-50.

Para a projeção de vendas de veículos leves do tipo automóvel e comercial leve, foi adotada a taxa de crescimento média de 3,43% a.a, de 2018 a 2050, do IES-50. Para 2015 e 2016, foram utilizados dados do ANFAVEA (2017). Diante da crise econômica de 2016, houve queda de 19,3% no número de licenciamento desses veículos. Por

outro lado, o setor prevê um crescimento de 2,4% (FENABRAVE⁹) a 4% (ANFAVEA) para esse segmento em 2017, assim foi considerada a mesma taxa crescimento de 3,43% a.a. para esse ano (EXAME, 2017).

Para automóveis híbridos, o IES-50 adotou uma participação de 0,05% de vendas em 2015. Em seguida, foi adotado um crescimento linear até 2045, quando essa tecnologia atingirá 90% de participação nas vendas. Em 2050, a participação nas vendas será de 82%, devido a maior participação dos veículos elétricos.

Já para os automóveis elétricos, o IES-50 adotou uma participação de 0,001% das vendas em 2015. Em seguida, foi considerado um crescimento linear até 2045, quando alcançará uma participação de 10% das vendas. De 2045 a 2050, considerou-se um crescimento exponencial na participação das vendas, em que tal tecnologia atingirá 18% da participação, em 2050.

Diante desse cenário, a Figura 26 retrata o perfil de venda dos automóveis híbridos, elétricos e de outras tecnologias, como os veículos à combustão interna, que deixariam de ser fabricados em 2045.

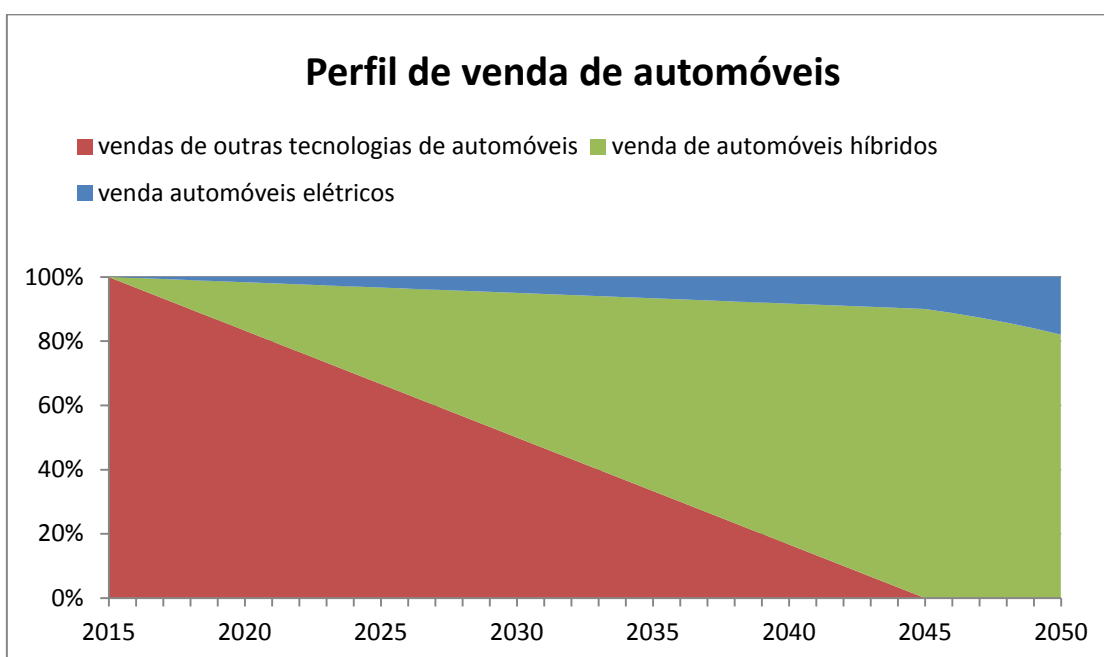


Figura 26 - Perfil de vendas de automóveis para o Brasil até 2050

Fonte: elaboração própria

⁹ Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores

De acordo com o *Global EV Outlook 2016*, os BEV participaram com 59% do mercado de EV nos países analisados em 2015 (IEA, 2016). Por outro lado, na Europa, em 2015, a participação dos PHEV de 60% do total de EV (JRC, 2016).

Diante disso, a participação de BEV e PHEV no mercado de EV, para a realidade brasileira, foi considerada 50% para cada um deles.

Para projetar os dados referentes aos comerciais leves híbridos, foi considerado o início da comercialização em 2020, com participação de 1,99% das vendas, como no IES-50. Porém, o documento indica um crescimento médio de 119% das vendas até 2045, quando tal tecnologia atingiria 100% da participação. Contudo, tal margem de crescimento se mostrou absurda quando calculado, extrapolando, em 2026, o total de comerciais leves vendidos. Sendo assim, para essa projeção foi considerado um crescimento médio de aproximadamente 21% a.a nas vendas a fim de alcançar os 100% da participação das vendas em 2045.

A Figura 27 apresenta o total de veículos comerciais leves vendidos por ano até 2050.

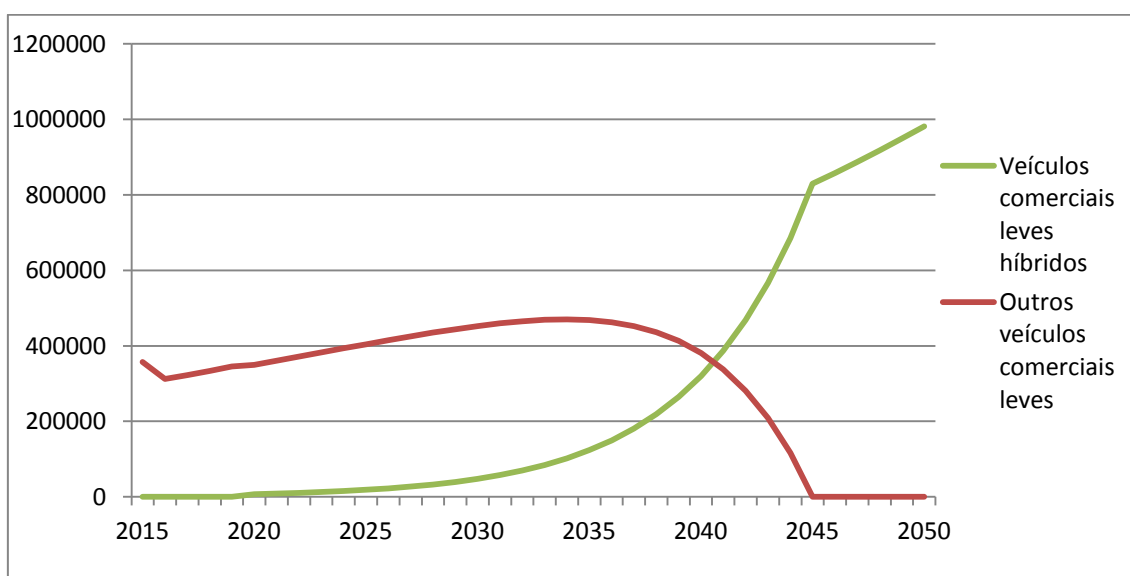


Figura 27 - Gráfico do total de vendas de comerciais leves até 2050

Fonte: elaboração própria

Com os resultados da projeção das vendas dos veículos híbridos e elétricos, apresentada no Apêndice I, foram calculadas as quantidades necessárias de ímãs de NdFeB para suprir a demanda no cenário de 2050. Foram calculadas também as demandas por cada um dos ETR do ímã. Os resultados estão apresentados na Tabela 12. A fim de comparação, foi estabelecida a proporção entre a demanda total a cada

ano e a ofertada para cada ETR em 2015 (dados detalhados no Apêndice II). Em 2040, por exemplo, a demanda por Nd para motores de veículos será de 528,8t, o que representa 2,84% da produção mundial de Nd em 2015.

De acordo com a Tabela 12, o elemento que apresentará o pior cenário em 2050, será o disprósio. Apenas para o setor de transporte do Brasil, a demanda seria de 43% de todo o Dy produzido em 2015. Claro que essa estimativa não considera o aumento da oferta dos ETR. Além disso, os esforços para a redução da dependência dos ETR nos motores vão trazer resultados positivos. Essa comparação serve para alertar os tomadores de decisão sobre uma possível escassez na oferta e, assim, buscarem alternativas, sejam elas: redução do uso desses elementos, substituição ou, até mesmo, reciclagem.

Tabela 12 - Demanda futura de ETR para aplicação em motores de veículos híbridos e elétricos do Brasil

*Comparação com a produção estimada de 2015 (considerando somente a produção legal)						
	Nd total (t)	% Nd*	Pr total (t)	% Pr*	Dy total (t)	% Dy*
2015	0,16	0,00%	0,05	0,00%	0,05	0,01%
2016	8,72	0,05%	2,91	0,05%	2,89	0,37%
2017	17,91	0,10%	5,97	0,10%	5,93	0,76%
2018	27,73	0,15%	9,24	0,16%	9,18	1,18%
2019	38,19	0,21%	12,73	0,22%	12,65	1,63%
2020	50,35	0,27%	16,78	0,29%	16,67	2,14%
2021	62,44	0,34%	20,81	0,36%	20,67	2,66%
2022	75,32	0,40%	25,11	0,44%	24,94	3,20%
2023	89,05	0,48%	29,68	0,52%	29,49	3,79%
2024	103,68	0,56%	34,56	0,60%	34,33	4,41%
2025	119,26	0,64%	39,75	0,70%	39,49	5,07%
2026	135,86	0,73%	45,29	0,79%	44,99	5,78%
2027	153,54	0,83%	51,18	0,90%	50,84	6,53%
2028	172,36	0,93%	57,45	1,01%	57,07	7,33%
2029	192,42	1,03%	64,14	1,12%	63,72	8,19%
2030	213,79	1,15%	71,26	1,25%	70,79	9,10%
2031	236,58	1,27%	78,86	1,38%	78,34	10,07%
2032	260,89	1,40%	86,96	1,52%	86,39	11,10%

2033	286,84	1,54%	95,61	1,67%	94,98	12,21%
2034	314,56	1,69%	104,85	1,84%	104,16	13,39%
2035	344,23	1,85%	114,74	2,01%	113,98	14,65%
2036	376,01	2,02%	125,34	2,19%	124,51	16,00%
2037	410,10	2,20%	136,70	2,39%	135,80	17,45%
2038	446,75	2,40%	148,92	2,61%	147,93	19,01%
2039	486,22	2,61%	162,07	2,84%	161,00	20,69%
2040	528,84	2,84%	176,28	3,09%	175,11	22,50%
2041	574,97	3,09%	191,66	3,35%	190,39	24,47%
2042	625,05	3,36%	208,35	3,65%	206,97	26,60%
2043	679,59	3,65%	226,53	3,96%	225,03	28,92%
2044	739,19	3,97%	246,40	4,31%	244,77	31,45%
2045	804,57	4,33%	268,19	4,69%	266,41	34,24%
2046	838,62	4,51%	279,54	4,89%	277,69	35,68%
2047	874,89	4,70%	291,63	5,10%	289,70	37,23%
2048	913,62	4,91%	304,54	5,33%	302,52	38,88%
2049	955,11	5,14%	318,37	5,57%	316,26	40,64%
2050	999,69	5,37%	333,23	5,83%	331,02	42,54%

Fonte: elaboração própria

4.2.2 SETOR ENERGÉTICO

A energia eólica é uma das tecnologias de energias renováveis mais avançadas e com maior grau de maturidade. Ela representa papel importante nos cenários futuros para a materialização dos Planos de Energia do governo, principalmente por ter ganhado competitividade nos últimos anos (EPE, 2015).

O aproveitamento da energia eólica para geração elétrica tem crescido nos últimos anos, como mostra a Figura 28. Em 2016, de acordo com o *Global Wind Energy Council* (GWEC), a capacidade instalada de energia eólica no mundo era de 486.790MW e com projeção de alcançar 800.000MW em 2021. O potencial dos ventos é explorado em terra (*onshore*) ou no mar (*offshore*). A maior parte dos parques eólicos são *onshore*. Até o final de 2016, apenas cerca de 3% da capacidade instalada mundial estava implantada *offshore* (GWEC, 2017).

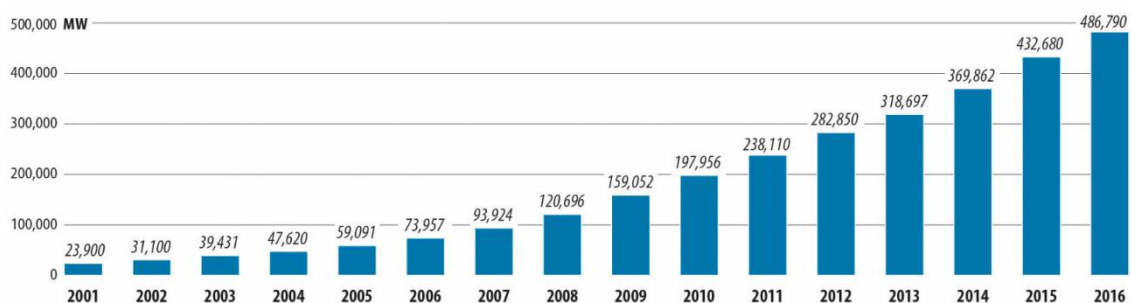


Figura 28 - Capacidade instalada mundial 2001-2016

Fonte: GWEC (2017)

O estudo *PERSPECTIVES FOR THE ENERGY TRANSITION Investment Needs for a Low-Carbon Energy System* (2017), elaborado pela *International Energy Agency* (IEA) e *International Renewable Energy Agency* (IRENA), apresentou as estimativas de crescimento para 2030 e 2050 de energias renováveis para geração de eletricidade. No *Reference Case* (cenário de referência), que é o caso mais provável, é possível notar uma expansão baixa da energia eólica *offshore*, se comparada à *onshore* em termos absolutos, como apresentado na Tabela 13.

Esse cenário foi baseado em políticas atuais e planejadas, considerando a evolução esperada do mercado para o setor energético de cada país. A IRENA recolheu dados dos países do G20 sobre os seus planos e objetivos energéticos para o período de 2015 a 2050.

Importantes implementações de energia renovável e melhorias na eficiência energética já estão incluídas no Caso de Referência, já que cada país tem o objetivo de aumentar sua atual capacidade de energia renovável e melhorar a eficiência do seu sistema energético (IEA e IRENA, 2017).

Tabela 13 - Geração de energia elétrica por fontes renováveis

	Unidade	2015	Cenário de referência 2030	Cenário de referência 2050
Energia hidrelétrica	GW	1208	1413	1391
Centrais hidrelétricas reversíveis	GW	155	300	300
Eólica	GW	417	1312	2331

Onshore	GW	405	1286	2243
Offshore	GW	12	27	88
Energia solar fotovoltaica	GP	219	1220	2703
Energia solar concentrada	GW	5	47	150
Biomassa	GW	103	166	269
Geotérmica	GW	12	36	63
Marítima	GW	0.5	6	12
Armazenamento de bateria	GWh	0.5	1096	3095
Veículos elétricos	GWh	0.4	596	1995
Veículos de duas ou três rodas	GWh	0.1	500	1100

Fonte: elaboração própria adaptada de IEA e IRENA (2017).

O Brasil tem se mostrado um importante ator no cenário mundial de geração eólica. Nos últimos anos, tem apresentado números relevantes e a energia eólica tornou-se indispensável. Em 2015, de acordo com Balanço Energético Nacional 2016 (BEN), a energia eólica participou com 3,5% na oferta de energia elétrica e 5,4% na capacidade instalada de geração elétrica (BEN, 2016).

Em 2016, a energia eólica expandiu ainda mais. Com 430 usinas, o Brasil fechou o ano em nono lugar na lista dos maiores países com capacidade instalada de geração eólica, alcançando 10.740MW (pouco mais de 7% da matriz elétrica nacional). Considerando a capacidade instalada no ano, o Brasil foi o quinto do mundo que mais expandiu suas instalações, com 2.014 MW (ABEEOLICA, 2017).

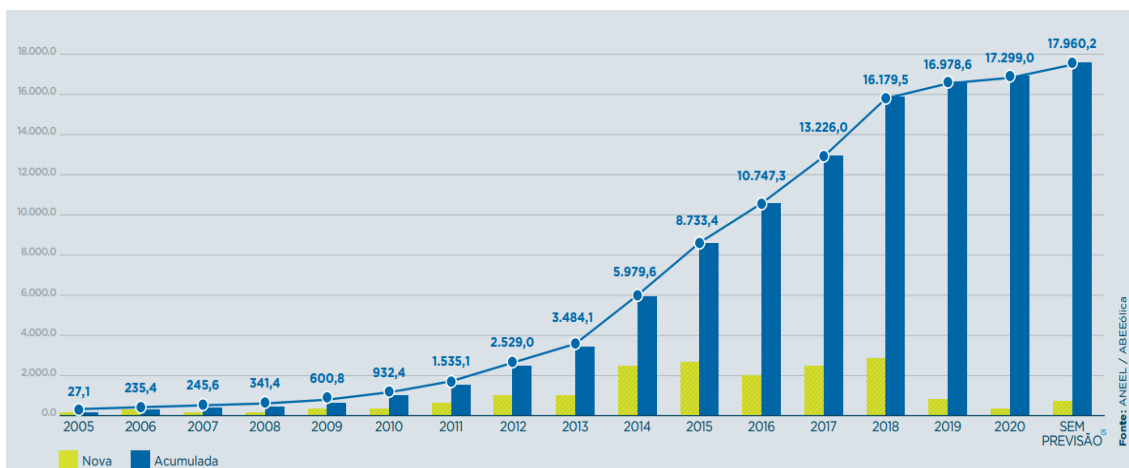


Figura 29 - Evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil

Fonte: ABEEOLICA (2017)

A Figura 29 apresenta a evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil até 2016 e previsão para os próximos anos.

De acordo com o Plano Decenal de Energia (PDE) 2024, estima-se uma capacidade instalada de 24,2GW de energia eólica. A Figura 30 apresenta as previsões de expansão eólica de cada PDE produzido pela EPE.

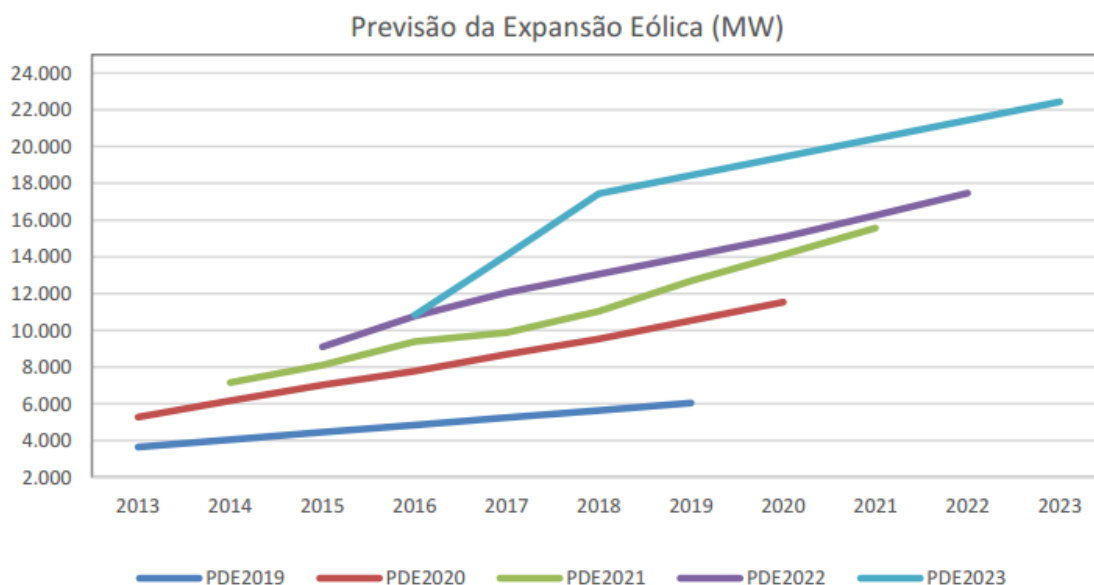


Figura 30 - Previsão de expansão eólica (MW)

Fonte: MIGUEL (2016)

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), criado em 2002 foi o ponto de partida do setor eólico nacional, ao contratar, em 2004, pouco mais de 1,4 GW de potência (54 usinas).¹⁰

Atualmente no Brasil, os empreendimentos eólicos são habilitados através de leilões controlados pelo governo. Ainda existe a possibilidade de comercialização da energia eólica no Mercado Livre, em que as condições contratuais são livremente negociadas (TOLMASQUIM, 2016).

De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (2001) o potencial *onshore* estimado foi de 143 GW para torres de 50m, porém estudos mais recentes realizados por dez estados brasileiros apresentaram dados superiores. Esses estudos consideraram torres de até 100m e, somando o potencial instalado desses estados para essa altura, foi contabilizado um total de 416 GW, bastante superior ao apresentado em 2001 (MIGUEL, 2016).

Devido à grande extensão do litoral brasileiro e às excepcionais condições do mar e do vento existentes em alguns locais, principalmente no litoral norte-nordeste, a geração *offshore* é promissora, mas apresenta dificuldades de conexão com a rede, além do custo de instalação mais elevado (IES-2050, 2016).

No Brasil, todas as usinas instaladas e em construção são *onshore*. O potencial *offshore* ainda não é explorado. MIGUEL (2016) reforça que esse recurso potencial não pode ser desprezado, especialmente devido ao domínio da tecnologia de águas profundas pela Petrobras.

De acordo com a presidente da ABEEOLICA, para o ano de 2017, três questões principais vão exigir atenção especial: demanda, transmissão e financiamento. O cancelamento do Leilão de Reserva em dezembro de 2016, a poucos dias de sua realização, causou insegurança na indústria, que precisa ser revertida. O cancelamento ocorreu devido à crise econômica, que acarretou baixa demanda. Por outro lado, considera-se acertada a decisão do governo de realizar um Leilão de Descontratação em 2017, (ABEEOLICA, 2017).

¹⁰ 53 das 54 usinas contratadas pelo PROINFA tiveram suas obras concluídas. A usina de Quintanilha Machado, de 135 MW rescindiu o contrato, FERREIRA *et al.* (2014).

A ABEEÓLICA reforça que a contratação de pelo menos 2 GW de energia eólica por ano é fundamental para dar um sinal de investimento e segurança para toda a cadeia produtiva, além de ser essencial para alcançar os objetivos que o Brasil, acordados na COP21, em Paris. Outro problema é a falta de linhas de transmissão suficientes, principalmente nos estados do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul e Bahia. Esse é um gargalo que deve ser levado em conta na expansão do setor eólico no Brasil.

4.2.2.1 Aspectos tecnológicos de turbinas eólicas *onshore*

Os aerogeradores possuem três grupos principais: o rotor, a nacelle e a torre, além de vários elementos secundários que variam de acordo com o tipo e projeto do aerogerador, como mostra a Figura 31. O rotor é composto pelo conjunto das pás, cubo e sistemas de passo. A nacelle comporta os subsistemas e componentes encapsulados no topo da turbina, como a caixa multiplicadora (quando existente) e o gerador elétrico. Enquanto a torre é responsável por suportar o rotor e a nacelle na altura projetada (ROMIO, 2016).



Figura 31 - Divisão básica da turbina eólica

Fonte: ROMIO (2016)

O diâmetro do rotor aumentou nos últimos anos em turbinas instaladas em todo o mundo. Em 2005, a média do diâmetro era de 67,4m, passando para 95,9m em 2014. Do ponto de vista da captura de energia, a área dobrou (SERRANO-GONZÁLEZ e LACAL-ARÁNTGUI, 2016).

A potência nominal média das turbinas eólicas instaladas no mundo aumentou de 1,38 MW em 2005 para 2,20 MW em 2014 (SERRANO-GONZÁLEZ e LACAL-ARÁNTGUI, 2016).

No Brasil, os parques atuais são montados com turbinas de 3 MW, sobre torres de 100 m de altura ou mais. Há 10 anos, as turbinas eram de 1,5 MW, montadas em torres de 50 m. Já se estuda a criação de um aerogerador 100% nacional, com 3,3 MW (MME, 2016).

SERRANO-GONZÁLEZ e LACAL-ARÁNTGUI (2016) propuseram uma classificação e descreveram as possíveis configurações do trem de acionamento (*drive train*), que estão ilustradas na Figura 32. Essa classificação é utilizada pelo *Joint Research Centre* (JRC) da Comissão Europeia. O presente estudo também utiliza essa classificação:

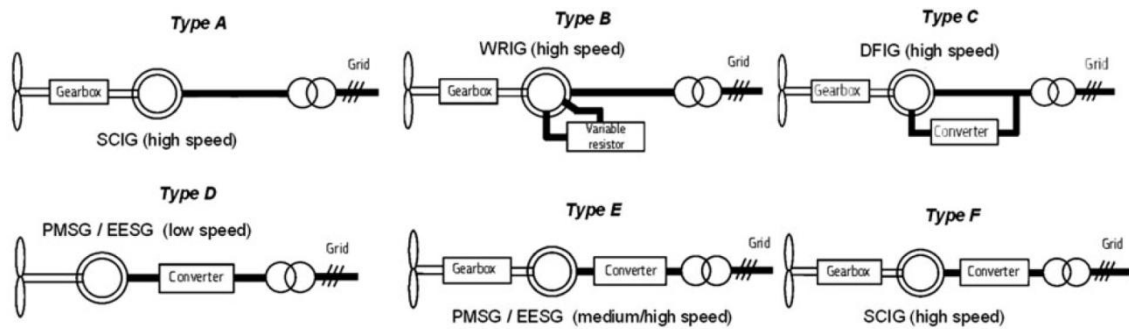


Figura 32 - Tipos de configurações

Fonte: SERRANO-GONZÁLEZ e LACAL-ARÁNTGUI (2016)

- **Tipo A.** Gerador de velocidade fixa. O gerador de indução elétrica (assíncrono) com rotor em gaiola de esquilo (*Squirrel Cage Induction Generator - SCIG*) normalmente é empregado nesta configuração por causa de sua simplicidade construtiva e robustez. É restringido pela velocidade de rotação das pás com resposta de alcance muito limitado às variações na velocidade do vento. Não é aplicado conversor de potência, nem outras técnicas de regulação da velocidade nesta configuração.

- **Tipo B.** A velocidade do gerador assíncrono é controlada por uma resistência variável que permite modificar a corrente no rotor. Como consequência, são utilizados nesta configuração geradores de indução com rotor bobinado (*wound rotor induction generator – WRIG*).

Esta solução proporciona maior flexibilidade de controle do que o tipo A. No entanto, as perdas elétricas são relativamente altas e o retorno aos requisitos da rede é muito limitado.

- **Tipo C.** Essa configuração é conhecida como gerador de indução duplamente excitado (*Doubly Fed Induction Generator - DFIG*). A potência ativa é controlada por um conversor paralelo ao rotor. Assim, as perdas elétricas são menores, e a resposta aos requisitos da rede é aumentada. Uma vez que o conversor está ligado apenas ao

rotor do gerador, cobrindo apenas cerca de 30% da energia gerada pela turbina eólica.

- **Tipo D.** Um conversor pleno permite desacoplar o gerador da frequência da rede, de modo que a frequência (e, conseqüentemente, a velocidade de rotação) do gerador possa ser totalmente controlada e o uso de uma caixa de engrenagens possa ser evitado. Há dois tipos de geradores eólicos sem caixa de engrenagem, os eletricamente excitados (*electrically excited synchronous generator* - EESG) e os excitados por ímãs permanentes (*permanent magnet synchronous generator* – PMSG, também conhecida pela sigla DD-PSGM).

- **Tipo E.** Turbina eólica equipada com caixa de engrenagens, com conversor pleno e gerador síncrono de média/alta velocidade (EESG ou PMSG). Na prática (com exceção do antigo modelo Made AE-52), todas as turbinas eólicas do tipo E utilizam ímãs permanentes.

- **Tipo F.** Turbina eólica equipada com caixa de engrenagens, com um conversor pleno e gerador assíncrono de alta velocidade. Graças ao uso do conversor pleno, um gerador mais simples (SCIG) pode ser utilizado, que é o caso das turbinas mais populares com essa configuração.

Quanto às configurações utilizadas no Brasil, a Figura 33 apresenta a participação de cada tipo de configuração. BONA *et al.* (2016) analisou dados de 314 parques eólicos (em operação ou construção), que juntos somavam 4154 turbinas eólicas até outubro de 2015. Para tal, foram utilizadas informações das turbinas eólicas instaladas no país por meio do banco de dados do Governo Federal SIGEL EOL (Sistema de Informação Geográfica de Usinas Eólicas) (BONA *et al.*, 2016).

Velocidade de Rotação	Regulagem de Potência	Trem de Acionamento	Gerador	Total
Velocidade Variável	Controle de Passo	Com Caixa Multiplicadora	DFIG	73,8 %
			PMSG	0,2 %
		WRIG	2,4 %	
		-	3,4 %	
	Sem Caixa Multiplicadora	EESG	16,8 %	
		PMSG	0,6 %	
Estol Ativo	Com Caixa Multiplicadora	-	2,9 %	

Figura 33 - Configurações de turbinas eólicas encontradas no Brasil até out/2015

Fonte: BONA *et al.* (2016)

De acordo com o apresentado na Figura 33, o tipo C é o mais difundido no Brasil, presente em quase 74% de todas as unidades de turbinas analisadas. A presença de turbinas eólicas que utilizam ímãs permanentes no Brasil ainda é pequena, com 0,8% das turbinas instaladas de acordo com a Figura 33. Vale ressaltar que essa análise apresentada por BONA *et al.* (2016) levou em consideração a quantidade de unidades de turbinas, enquanto a maior parte dos estudos considera a capacidade instalada. Isso pode mascarar os dados porque as turbinas que utilizam ímãs de TR possuem uma potência maior que as turbinas já instaladas. Assim, provavelmente, o percentual de MW instalado que utiliza ímãs de TR seria maior que 0,8%.

O JCR *Wind Energy Report* de 2016 apresentou o panorama do mercado e o desenvolvimento tecnológico da energia eólica *onshore* e *offshore*. A Figura 34 apresenta a capacidade instalada por ano em quatro zonas geográficas por tipo de configuração. Nota-se a presença de turbinas que utilizam ímãs permanentes principalmente na Europa, a partir de 2010. O aumento está relacionado à redução do peso do gerador e, conseqüentemente, da menor quantidade de TR (JRC, 2017).

Na Ásia, por exemplo, onde os ímãs permanentes eram aplicados predominantemente em turbinas do tipo D – PMSG, agora apresentam crescimento em turbinas do tipo E – PMSG. Turbinas na faixa 1-2MW com ímãs permanentes estão se tornando cada vez mais populares e essa tendência pode ser justificada, porque o mercado asiático é predominantemente de ventos de baixa velocidade, favorecendo o desenvolvimento do tipo D; o uso de ímãs permanentes não é um problema para os fabricantes asiáticos, devido à disponibilidade de terras raras na China; e os principais fabricantes

mundiais de turbinas com geradores de ímã permanente são chineses (*Goldwind* e *XEMC*) (SERRANO-GONZÁLEZ E LACAL-ARÁNTEGUI, 2016)

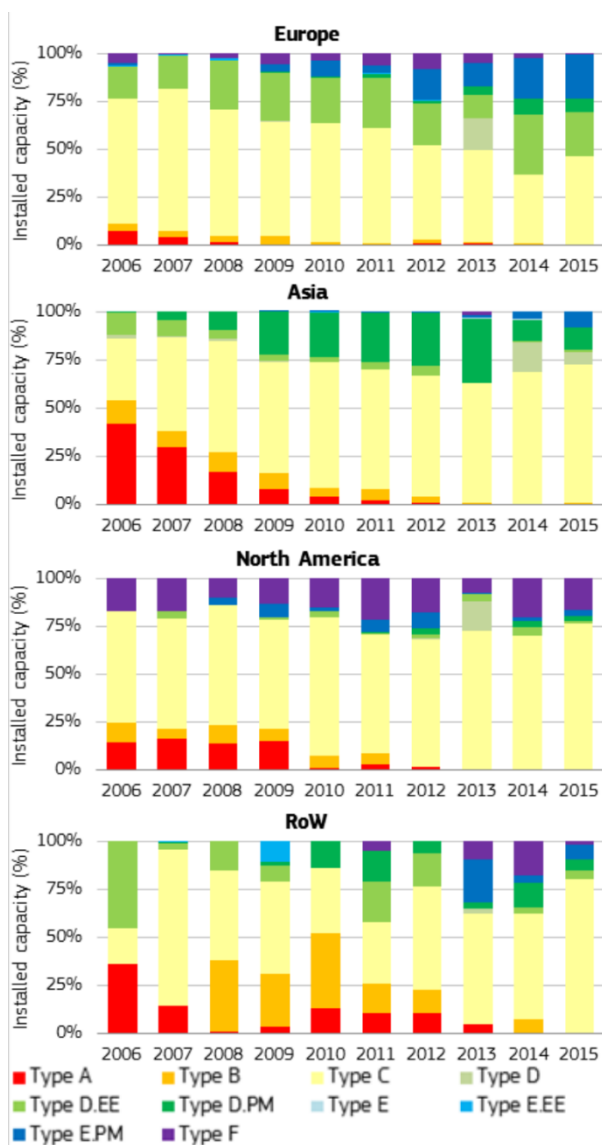


Figura 34 - Participação dos tipos de turbina nas capacidades instaladas

Fonte: JRC (2017)

Na Europa, em 2014, 10% da capacidade instalada total *onshore* foi por turbinas eólicas DD-PMSG. Enquanto a participação das turbinas de média/alta velocidade foi de 18%.

Dados de mercado apresentados por GONZÁLEZ e LACAL-ARÁNTEGUI (2016) referente a uma análise dos avanços tecnológicos de turbinas eólicas *onshore*, deixam

claro o crescimento da participação de turbinas PMSG nos últimos anos, principalmente na Ásia. O estudo dividiu o mundo em 4 grupos: Europa, América do Norte, Ásia e RoW (rest of world). O Brasil está incluído no último grupo. Pelo gráfico apresentado é também possível notar um crescimento do uso de ímãs permanentes em geradores eólicos. Na análise da capacidade instalada por ano, em 2013, houve uma participação de mais de 20% da tecnologia sem caixa multiplicadora-PMSG (tipo D-PMSG). Já em 2014, cerca de 15% das novas instalações utilizaram essa tecnologia. Porém, nota-se ainda, o domínio da tecnologia DFIG.

Caso o a instalação dos grandes geradores (acima de 5MW) continuem aumentando, a tecnologia DFIG provavelmente deixará de ser utilizada, dando preferência para os PMSG (PAVEL *et al.*, 2016).

Em 2015, a participação, em capacidade instalada, no mercado global de turbinas DD-PMSG foi de 19%, e 4% das de média/alta velocidade (tipo E-PMSG) (JRC, 2016). Na China, cerca de 25% dos 33.000 MW de capacidade instalada em 2015, utilizou ímãs de neodímio, (DONG *et al.*, 2017).

Para cada tipo, diferentes quantidades de ímã são necessárias por MW. Cerca de 650Kg de ímã/MW são utilizados nas turbinas DD-PMSG. Já nas de velocidade média, 160 kg/MW, e 80 kg/MW são necessários nas de alta velocidade (JRC, 2016). O presente estudo considerou 650kg de ímã/MW para as turbinas DD-PMSG e 120kg/MW para as E-PMSG.

Tabela 14 - Previsão de participação das turbinas eólicas até 2030 no cenário mundial

	2014	2015	2020	2030
D-PMSG	10%	19%	29%	44%
Tipo E-PMSG	18%	4%	12%	28%
Fontes	JRC (2016)	JRC (2017)	LACAL-ARÁNTGUI e SERRANO-GONZÁLEZ (2015)	LACAL-ARÁNTGUI e SERRANO-GONZÁLEZ (2015)

Fonte: elaborado pelo próprio autor baseado em JRC (2016; 2017) e LACAL-ARÁNTGUI e SERRANO-GONZÁLEZ (2015)

Para o Brasil, foi utilizado dados da JRC (2017) referente ao RoW (resto do mundo) da Figura 34 para 2015. Para 2020 e 2030, foi considerada a tendência mundial da Tabela 14. Já para 2040 e 2050, foi uma escolha do autor. Os valores da previsão de participação dos tipos de turbina que utilizam ímãs NdFeB para o Brasil são apresentados na Tabela 15. Nos anos entre os apresentados na Tabela 15 foi considerado um crescimento linear para o percentual de participação.

Tabela 15 - Previsão de participação das turbinas eólicas no Brasil até 2050

	2015	2020	2030	2040	2050
D-PMSG	6%	25%	44%	50%	50%
E-PMSG	8,5%	12%	28%	30%	30%

Fonte: elaboração própria

Como o Brasil não possui usinas eólicas *offshore*, foi considerado, que até 2050, todas as novas turbinas eólicas instaladas serão *onshore*.

4.2.2.2 Projeção da quantidade de elementos de terra rara nas turbinas eólicas para 2050

Para compor o cenário de análise da expansão eólica no Brasil, foram adotadas considerações do cenário de referência do Projeto IES-Brasil 2050 para o setor de oferta de energia.

De acordo com a Tabela 16, a participação da energia eólica pode chegar a 11% da capacidade total instalada em 2050, tornando-se a segunda principal fonte de geração de eletricidade.

Tabela 16 - Participação por fonte na geração de energia elétrica

Participação (%)	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Hidrelétricas	63,0%	65,8%	67,3%	63,2%	61,7%	56,0%	51,3%	49,2%
Nuclear	2,3%	3,4%	3,0%	3,1%	2,7%	2,6%	3,0%	2,7%
Gás natural	14,2%	5,5%	4,8%	4,8%	5,0%	5,4%	5,5%	3,6%
Carvão nacional	1,2%	1,3%	1,1%	1,3%	0,7%	1,6%	2,0%	1,7%
Carvão importado	1,0%	0,9%	0,8%	1,1%	1,0%	1,9%	1,9%	1,6%
Óleo combustível	0,0%	0,0%	0,1%	0,5%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo Diesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Outros não renováveis	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%
PCH	3,6%	4,3%	3,7%	3,4%	3,6%	3,9%	4,1%	4,5%
Bagaço	7,9%	8,5%	7,4%	7,6%	6,8%	5,8%	5,6%	5,3%
Biomassa	1,3%	1,2%	1,3%	2,6%	2,8%	3,1%	3,4%	4,0%
Eólica	5,5%	8,0%	8,1%	8,9%	9,6%	9,6%	10,0%	11,1%
Solar FV (distribuída)	0,0%	0,1%	0,8%	1,5%	2,0%	2,2%	2,4%	2,7%
Solar FV (centralizada)	0,0%	0,9%	1,0%	1,0%	1,0%	2,8%	4,2%	4,7%
Solar heliotérmica	0,0%	0,0%	0,6%	1,2%	3,0%	5,1%	6,7%	8,7%
TOTAL	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Fonte: IES-2050 (2016)

Diante das medidas do INCD, foram apresentadas as previsões de evolução da capacidade instalada por fonte energética na Tabela 15.

Tabela 17 - Capacidade instalada por fonte no CPG (MW)

MW	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Hidrelétricas	97044	115260	115260	115260	125643	129654	135136	139665
Nuclear	1990	3340	3340	3340	3340	3698	4695	4695
Gás natural	10938	13286	13286	13286	14290	14388	14388	14388
Carvão nacional	1644	1984	1984	1984	1065	2765	3625	3625
Carvão importado	1445	1445	1445	1445	1445	3325	3325	3325
Óleo combustível	3051	3051	2745	2405	332	0	0	0
Óleo Diesel	1124	1124	108	0	0	0	0	0
Outros não renováveis	703	703	703	703	776	789	810	810
PCH	5000	6600	6650	6650	8000	10000	12000	14000
Bagaço	10500	12717	12717	14397	14397	14397	15852	15852
Biomassa	1547	2102	2302	3721	4719	5716	6714	8709
Eólica	8700	14300	16694	19953	23943	27933	33919	39904
Solar FV (distribuída)	20	300	4200	8320	12120	15920	19720	23520
Solar FV (centralizada)	0	2653	3451	3950	4449	14449	24448	29448
Solar heliotérmica	0	0	998	2095	6085	12070	18055	25038
TOTAL	143.706	178.865	185.883	197.509	220.604	255.104	292.687	322.979

Fonte: IES-2050 (2016)

A partir da Tabela 17, para uma melhor análise, foram gerados dados ano a ano através da taxa média de crescimento calculada a cada cinco anos. A previsão é que a energia eólica cresça com uma média de aproximadamente 10% a.a nos primeiros cinco anos. Entre 2020 e 2050 essa taxa não alcança 4% a.a. Os dados gerados estão apresentados na Tabela 18.

Como o estudo utiliza a diferença entre a capacidade instalada do ano corrente e a capacidade instalada do ano anterior (= capacidade acrescida naquele ano), entre 2025 e 2035, por exemplo, a maior capacidade instalada acontecerá no último ano das séries de 5 anos, ou seja, nos anos que terminam com “0” ou “5”. Assim, a maior expansão da capacidade fica para o ano de análise. Essa foi uma escolha para tornar a previsão mais próxima da realidade. Caso fosse adotado um crescimento linear, nos 5 anos de cada intervalo a expansão seria a mesma em cada um deles.

Tabela 18 - Capacidade instalada ano a ano

Ano	Capacidade de energia eólica instalada (MW)	Taxa média de crescimento a cada 5 anos	Capacidade acrescida
2015	8700		-
2016	9609		909
2017	10613		1004
2018	11722		1109
2019	12947		1225
2020	14300	10,45%	1353
2021	14750		450
2022	15213		464
2023	15692		478
2024	16185		493
2025	16694	3,14%	509
2026	17300		606
2027	17928		628
2028	18579		651
2029	19254		675
2030	19953	3,63%	699
2031	20694		741
2032	21462		768
2033	22259		797
2034	23086		827
2035	23943	3,71%	857
2036	24693		750
2037	25466		773
2038	26263		797
2039	27085		822
2040	27933	3,13%	848
2041	29039		1106
2042	30189		1150
2043	31384		1195
2044	32627		1243
2045	33919	3,96%	1292
2046	35039		1120
2047	36197		1157
2048	37393		1196
2049	38628		1235
2050	39904	3,30%	1276

Fonte: elaboração própria

A partir da Tabela 18, foi gerado o gráfico da evolução da capacidade instalada da energia eólica no Brasil, apresentado na Figura 35.

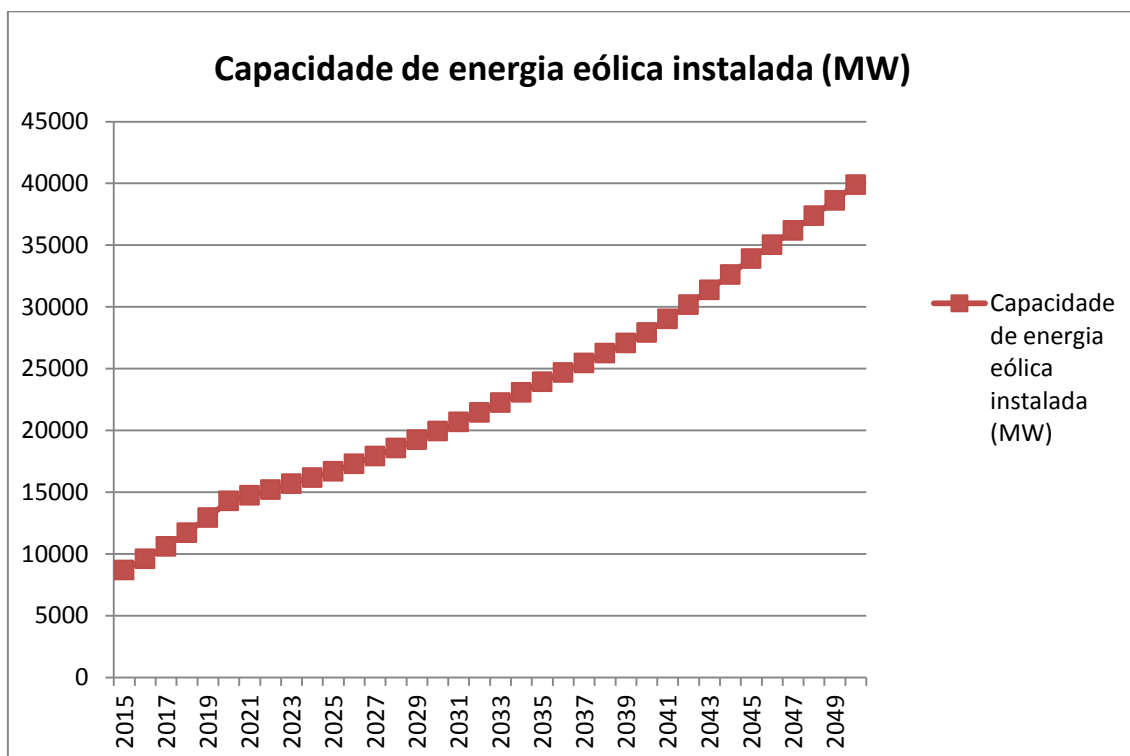


Figura 35 - Projeção de crescimento da capacidade instalada de energia eólica até 2050

Para o cálculo da quantidade total de ímã NdFeB demandada, foram utilizados os dados da Tabela 19.

Tabela 19 - Massa de ímã NdFeB por MW (t/MW)

	t de NdFeB/MW		
	DD-PMG	MS-PMG	HS-PMG
ZEPF (2013)	0,675	0,12	0,12
PAVEL <i>et al.</i> (2016)	0,65	0,16	0,08
Considerado no estudo	0,65		0,12

Os ímãs utilizados nas turbinas eólicas possuem composição diferente dos utilizados nos motores de veículos elétricos, uma vez que as condições das aplicações não são as mesmas. A Tabela 20 apresenta os dados da literatura e os considerados no presente estudo.

Tabela 20 - Composição dos ímãs NdFeB utilizados nas turbinas eólicas

% massa de ETR no NdFeB das turbinas			
ETR	ZEPF (2013)	LACAL-ARÁNTGUI (2015)	Considerado no estudo
Nd	22,5	20,3-22,4	22
Pr	7,5	8,7-9,32	8
Dy	4,5	3,0-6,0	4,5

A demanda de ETR total, assim como na análise dos veículos híbridos e elétricos foi comparado com a produção mundial de ETR de 2015. Nota-se que, mesmo utilizando uma quantidade relativamente alta de ímã NdFeB, sua aplicação em energia eólica para os planos do Brasil não traz grandes preocupações. Na Tabela 21, é possível notar que essa demanda não alcança nem 3% da produção mundial de 2015 para nenhum dos anos analisados.

Tabela 21 - Demanda futura de ETR para aplicação em turbinas eólicas no Brasil

*Comparação com a produção estimada de 2015 (considerando somente a produção legal)

	Nd total (t)	% Nd*	Pr total (t)	% Pr*	Dy total (t)	% Dy*
2015	9,74	0,05%	3,54	0,06%	1,99	0,26%
2016	14,95	0,08%	5,44	0,10%	3,06	0,39%
2017	22,15	0,12%	8,06	0,14%	4,53	0,58%
2018	30,70	0,17%	11,16	0,20%	6,28	0,81%
2019	40,79	0,22%	14,83	0,26%	8,34	1,07%
2020	52,65	0,28%	19,15	0,34%	10,77	1,38%
2021	18,91	0,10%	6,88	0,12%	3,87	0,50%
2022	20,96	0,11%	7,62	0,13%	4,29	0,55%
2023	23,12	0,12%	8,41	0,15%	4,73	0,61%
2024	25,40	0,14%	9,24	0,16%	5,19	0,67%
2025	27,79	0,15%	10,11	0,18%	5,68	0,73%
2026	35,01	0,19%	12,73	0,22%	7,16	0,92%
2027	38,25	0,21%	13,91	0,24%	7,82	1,01%
2028	41,68	0,22%	15,16	0,27%	8,53	1,10%
2029	45,32	0,24%	16,48	0,29%	9,27	1,19%
2030	49,16	0,26%	17,87	0,31%	10,05	1,29%
2031	52,77	0,28%	19,19	0,34%	10,79	1,39%
2032	55,43	0,30%	20,16	0,35%	11,34	1,46%
2033	58,21	0,31%	21,17	0,37%	11,91	1,53%
2034	61,13	0,33%	22,23	0,39%	12,50	1,61%
2035	64,18	0,35%	23,34	0,41%	13,13	1,69%
2036	56,80	0,31%	20,65	0,36%	11,62	1,49%
2037	59,28	0,32%	21,56	0,38%	12,13	1,56%
2038	61,86	0,33%	22,50	0,39%	12,65	1,63%

2039	64,55	0,35%	23,47	0,41%	13,20	1,70%
2040	67,34	0,36%	24,49	0,43%	13,77	1,77%
2041	87,84	0,47%	31,94	0,56%	17,97	2,31%
2042	91,32	0,49%	33,21	0,58%	18,68	2,40%
2043	94,94	0,51%	34,52	0,60%	19,42	2,50%
2044	98,70	0,53%	35,89	0,63%	20,19	2,59%
2045	102,61	0,55%	37,31	0,65%	20,99	2,70%
2046	88,99	0,48%	32,36	0,57%	18,20	2,34%
2047	91,93	0,49%	33,43	0,59%	18,80	2,42%
2048	94,97	0,51%	34,53	0,60%	19,42	2,50%
2049	98,10	0,53%	35,67	0,62%	20,07	2,58%
2050	101,34	0,54%	36,85	0,64%	20,73	2,66%

Fonte: elaboração própria

5 CONCLUSÃO

Como pode ser analisado ao longo da pesquisa, os ETR são cada vez mais utilizados em diversas aplicações. Esses elementos são conhecidos como “vitaminas da indústria moderna” por suas propriedades únicas e pelo fato de que pequenas quantidades são suficientes para aumentar o desempenho dos produtos. Com o avanço da tecnologia, a demanda por ETR aumentou, já que podem ser aplicados na indústria metalúrgica, magnética, cerâmica, eletrônica, óptica, nuclear, entre outras.

Apesar do nome “terra rara”, os ETR estão espalhados por todo o globo terrestre. A China possui a maior reserva e lidera o mercado. A mão de obra barata e uma exploração que negligenciava as questões ambientais contribuíram para o domínio chinês. Diante dessa concentração, pesquisas apresentaram esses elementos com elevado risco de suprimento, principalmente a partir de 2010. Nesse ano, a China criou restrições de exportação, acarretando alta nos preços e aumentando a incerteza dos países que necessitam dos ETR nas suas economias. Sobretudo dos ETRP, que mesmo com a entrada de novos fornecedores no mercado, ainda dependerão do país por certo tempo.

A falta de transparência da cadeia de suprimentos das TR somada ao desconhecimento da dinâmica do seu mercado aumenta o risco de oferta. A preocupação é maior para as tecnologias que visam a descarbonização das economias, já que essas necessitam de alguns desses elementos, como acontece com os veículos híbridos e elétricos e com as turbinas eólicas, que utilizam ímãs NdFeB. A penetração dessas duas aplicações demanda grande quantidade de ETR.

Para verificar a importância desses elementos na expansão da frota dos veículos e da energia eólica no Brasil, foi montado um cenário para analisar a quantidade demandada. Com o resultado das projeções da frota dos veículos, ficou claro que, em 2050, o Dy é o mais crítico. Nesse ano, aproximadamente 43% da produção mundial do elemento em 2015 seria necessária para suprir apenas as necessidades nacionais nessa aplicação.

Quanto à expansão da energia eólica, os resultados foram mais positivos. Apesar das turbinas necessitarem de uma grande quantidade de ETR por unidade, para os planos nacionais essa demanda não representa uma parcela significativa da produção mundial. A instabilidade na oferta dos ETR não está associada apenas à

disponibilidade física, mas principalmente às questões do posicionamento político praticadas pela China.

Claro que os resultados são referentes a um cenário possível, indicando uma tendência, mas pode ser que não ocorra dessa forma, mesmo que tenha sido realizado um estudo minucioso sobre a quantidade de ETR utilizada e as disposições dessas duas tecnologias. Esse tipo de análise tem o objetivo de prever possíveis futuros e buscar alternativas para minimizar os riscos de fornecimento.

De uma maneira geral, essas alternativas podem incluir substituição desses materiais, redução do uso e busca por novos fornecedores, seja por meio de novas explorações ou por reciclagem. Enquanto cada país traça sua própria estratégia de mitigação para os considerados elementos críticos em sua economia, as empresas que utilizam esses materiais também buscam soluções.

A China, por exemplo, tem investido em pesquisa e desenvolvimento na área de TR desde antes dos anos 1960. Com medidas protecionistas e pouca preocupação com o meio ambiente, conseguiu o controle sobre o mercado. O baixo custo de produção chinesa levou outros países a cessarem suas explorações. Após o domínio, as barreiras para a exportação e o risco de interrupção no fornecimento incentivaram as empresas que utilizam ETR a se instalarem em solo chinês, trazendo mais propriedade intelectual para dentro do país. A instalação das plantas de produção dessas empresas estrangeiras associados a contratos de fornecimento mais longos foram umas das alternativas encontradas. No entanto, essas soluções não diminuem o domínio da China.

A longo prazo, o desenvolvimento de tecnologias menos dependentes de elementos críticos ou que não façam o uso deles também vem sendo implementado nas empresas. Porém essa substituição deve ser feita sem que haja perdas na eficiência e no desempenho dos produtos finais e, assim, não perder competitividade frente às empresas chinesas, que possuem acesso mais fácil a esses materiais.

A reciclagem pode ser uma alternativa para garantir a oferta dos ETR e diminuir a dependência dos produtos chineses. Porém as dificuldades tecnológicas nos processos, que muitas vezes são ineficientes, e a falta de incentivo são os principais problemas. Além disso, a quantidade requerida para esses tipos de aplicação são altas, sendo assim, o resíduo a ser reciclado deve conter grande volume de ETR para

se tornar viável. Na verdade, a reciclagem só é uma alternativa se o custo da matéria já reciclada for menor ou equivalente ao da matéria virgem.

A busca por novas minas é outra alternativa em que o Brasil surge com potencial elevado, já que possui a segunda maior reserva e já foi produtor de ETR. Por parte do governo nacional, existe a intenção de criar cadeias produtivas de aplicação das TR. A ideia não é apenas explorar o minério e vender para outros países na forma de concentrado ou de óxidos. O objetivo é criar uma cadeia para produzir produtos de valor agregado, como o ímã de NdFeB e até mesmo motores elétricos e turbinas eólicas.

O incentivo a extração dos minérios de TR não é uma questão simples. As técnicas de processamento são desafiadoras. Depósitos que parecem ser produtivos, a princípio, podem não ser recuperados tão facilmente como imaginados. A falta de mão de obra qualificada e a necessidade de altos investimentos financeiros também limitam novas explorações. Países que passaram a explorar minérios de TR estão exportando o material para serem processados e separados na China.

Segundo GUIMARÃES (2011), O Brasil dominava as tecnologias de mineração e processamento, inclusive, na década de 1990, havia realizado experimentos laboratoriais a ponto de ter criado uma empresa para produzir superímãs, que encerrou as atividades por conta do *dumping* chinês em 1994. Para se tornar um grande produtor de ETR, o país deve possuir um plano sólido de longo prazo, que resista às variações do mercado e às estratégias de outros países.

O Brasil, que em seu Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM2030), elegeu os ETR, o lítio e os agrominerais como estratégicos e propôs investimentos efetivos de longo prazo. Assim, o governo juntamente com a iniciativa privada vem realizando estudos para o desenvolvimento da verticalização da cadeia produtiva de TR no Brasil.

O Ministério de Minas e Energia – MME e o antigo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, hoje Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC, instituíram em conjunto o Grupo de Trabalho Interministerial nº 614 de 30 de junho de 2010 (GTI-ME MME/MCTI) com a finalidade de elaborar propostas de integração, coordenação e aprimoramento das políticas, diretrizes e ações voltadas aos minerais estratégicos.

Em 2013, o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) lançou o “Estudo de Usos e Aplicações de Terras Raras” a pedido do MCTI. O Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral (DTM) da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGM) do MME vem realizando reuniões com empresas que estão desenvolvendo projetos envolvendo TR desde 2012.

Ainda existem as comissões criadas para estudos de TR pelo Senado e pela Câmara Federal. O Centro de Estudos e Debates Estratégicos (Cedes) publicou o estudo “Minerais Estratégicos e Terras Raras”, em 2014, com o objetivo de analisar a exploração, o aproveitamento econômico e a cadeia produtiva de minerais e materiais estratégicos para o Brasil (CÂMARA, 2014).

Em 2015, a CPRM – Serviço Geológico do Brasil - lançou o Informe de Recursos Minerais da Série Minerais Estratégicos nº 2 – Avaliação do Potencial de Terras Raras no Brasil, que realizou um levantamento geológico de potenciais áreas para minerais estratégicos carentes e portadores do futuro. Esse documento traz o levantamento dos depósitos e ocorrências com potencial econômico para a exploração de terras raras no Brasil e assim, prosseguir nas diretrizes do Plano Nacional de Mineração 2030.

Além dessas iniciativas, o Senado Federal realizou Audiências Públicas na Comissão de Ciência, Tecnologia, Comunicações e Informática no Senado (CCT). Em audiências da Subcomissão Temporária para a Elaboração do Marco Regulatório de Mineração em Terras Raras (CCTTSTTR) debates foram realizados envolvendo diversos setores da cadeia produtiva. O resultado, “Terras Raras Estratégia para o Futuro” foi publicado na Revista de Audiências Públicas do Senado Federal. (EM DISCUSSÃO, 2013).

Nota-se assim, o esforço dos poderes executivo e legislativo para buscar soluções de viabilizar a extração e o desenvolvimento de toda a cadeia produtiva de ETR no Brasil, que vai ao encontro das estratégias de inserir o Brasil na rota da inovação tecnológica.

O primeiro passo para alcançar o objetivo de desenvolvimento da cadeia produtiva de ETR, apresentado pelo GTI-ME MME/MCTI é a “Implementação e/ou fortalecimento do programa de levantamento geológico detalhado, conjugado com o apoio à exploração mineral pelo setor privado”. Ou seja, uma avaliação de depósitos e ocorrências existentes e identificação de novas áreas para exploração de ETR.

No final de 2014, o Senado, através da aprovação da PLS 529/2013, instituiu o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico dos Minerais de Elementos de

Terras-Raras e à Criação de Cadeia Produtiva (PADETR), que dispõe que o programa objetiva assegurar o domínio científico e tecnológico de todas as fases de produção no intuito de criar redes de trabalho que fomentarão projetos piloto e pesquisa aplicada, inclusive, o desenvolvimento de novas aplicações para esses materiais (SENADO, 2017). Desde então, foi aprovada pela Comissão de Ciência e Tecnologia, Comunicação e Informação (CCTCI) e pela Comissão de Minas e Energia (CME) como PL 8325/2014 e aguarda parecer da Comissão de Finanças e Tributação (CFT) para dar sequência ao PL desde 16/08/2016 (CAMARA, 2017).

A principal desvantagem do depósito de Araxá é a baixa concentração em ETRP. Por outro lado, os depósitos de Pitinga e Serra Verde são ricos em ETRP. Pitinga tem a vantagem de as TR serem subprodutos do processamento de Sn, Ta e Nb, diluindo o custo de mineração. Enquanto o Projeto Serra Verde, tem a vantagem de sua mineralização está associada à zona saprolítica, o que facilita a extração. Mesmo assim, esses dois últimos projetos devem superar as dificuldades tecnológicas de extração dos ETR (TAKEHARA *et al.*, 2016).

As principais barreiras enfrentadas pelos projetos de TR estão nos processos de beneficiamento e metalúrgico, uma vez que cada tipologia mineral exige procedimentos específicos.

A CBMM, responsável pelo projeto Araxá, já possui uma produção experimental de 100 toneladas/mês de hidróxidos e sulfatos duplos de TR como subprodutos de nióbio (Nb) e de rejeitos de fosfato (Revista de Audiências Públicas do Senado Federal, 2013).

A parceria firmada entre a CBMM e o Instituto de Pesquisas Tecnológica (IPT), para produzir metais de neodímio (Nd) colhe bons frutos. Em 2016, de acordo com o IPT (2016), produziu pela primeira vez, em escala laboratorial, o didímio (Nd-Pr) metálico. A redução do óxido de didímio em metal era o elo que faltava para dar andamento à produção dos ímãs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Boletim anual de geração, 2016. Disponível em: http://www.abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2017/05/424_Boletim_Anual_de_Geracao_Eolica_2016_Alta.pdf Acesso em: mai 2017.

AL-AREQI, W. M.; MAJID, A. A.; SARMANI, S.; NOR, C. Thorium: Issues and Prospects in Malaysia. American Institute of Physics. v. 40005, 2015.

ALONSO, E., FIELD, F., GREGORY, J., KIRCHAIN, R., 2007. Materials Availability and the Supply Chain: Risks, Effects, and Responses. Massachusetts Institute of Technology. Disponível em: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es070159c>

ANFAVEA. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira, p. 62, 2017. Disponível em: <http://www.virapagina.com.br/anfavea2017/#62/z> Acesso em mai. de 2017.

ANP. Resolução nº 47, 2014. Disponível em: <http://dados.gov.br/dataset/reservas-nacionais-de-petroleo-e-gas-natural> acesso em mai. 2017.

ARGUS, 2016 - Analysing the Changing Global Rare Earths Supply and Demand Outlook Argus Metal Pages Forum, Tokyo - Mark Seddon, Argus Media Ltd 4 August 2016.

BARTEKOVÁ, Eva; KEMP, René. National strategies for securing a stable supply of rare earths in different world regions. **Resources Policy**, [s.l.], v. 49, p.153-164, set. 2016

BEN. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL 2016: Ano base 2015 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2016

BENECKI, W. The International Forum on Magnetic Applications, Technologies & Materials, Orlando - Florida. More Than You Ever Wanted to Know About the Permanent Magnet Industry, 2017. Disponível em: http://www.magneticmagazine.com/conferences/wp-content/uploads/2017/01/Benecki_Benecki.pdf acesso em fev. 2017

BGS. Risk list 2015. Disponível em: <https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/riskList.html> Acesso em mar. de 2017.

BINNEMANS, Koen et al. Recycling of rare earths: a critical review. Journal of Cleaner Production, [s.l.], v. 51, p.1-22, jul. 2013.

BINNEMANS, K.; JONES, P. T. Rare Earths and the Balance Problem. Journal of Sustainable Metallurgy, v. 1, n. 1, p. 29–38, 2015.

BONA, Jéssica Ceolin de; ROMIO, Pedro Correia; DIAS, Acires. Characterization of the technology used in wind turbines in the brazilian market, International Journal of Latest Research in Science and Technology, v 5, n 2, 2016.

BRADSHER, K. China's Plans For Mines Are Blocked. New York Times 2009. Disponível em: <http://query.nytimes.com/gst/fullpage.html?res=9B04E3D71E38F936A1575AC0A96F9C8B63>

BRASIL. Ministério de Minas e Energia: Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria n° 229, de 29 de abril de 2002. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/acesso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-229-em-29-04-2002-do-diretor-geral-do-dnpm> Acesso em mar. de 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia: Norma brasileira para classificação de recursos e reservas minerais. Brasília, set. 2002. Disponível em: ftp://ftp.ige.unicamp.br/pub/ge_902/Classificacao/NormaDNPM.pdf Acesso em fev. de 2017.

BRUMME, Anja. Market analysis of rare earth elements. In: Wind Energy Deployment and the Relevance of Rare Earths. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. p. 17-48.

BUCHERT, M., 2010. Life cycle assessment (LCA) of nickel metal hydride batteries for HEV application. Öko-Institut In: Presentation at IARC, Basel (Switzerland), 4th March 2010. <http://www.rechargebatteries.org/life-cycle-assessment-lca-of-nickel-metal-hydride-batteries-for-hev-application/>

BURWELL, M., GOSS, J., POPESCU, M., 2013. Performance/Cost Comparison of Induction-motor & Permanent magnet - motor in a Hybrid Electric Car. International Copper Association. Tóquio. Disponível em: <http://www.coppermotor.com/wp-content/uploads/2013/08/Techno-Frontier-2013-MBurwell-ICA-EV-Traction-Motor-Comparison-v1.8-Eng1.pdf>

CAMARA, 2017 - Projeto de Lei 8325/2014 <http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=860919>

CASTOR, S B, and HEDRICK, J B. 2006. Rare Earth Elements. In: KOGEL, J E, TRIVEDI, N C, BARKER, J M, and KRUKOWSKI S T. Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets, and Uses, 7th edition. SME. p1568

CAVALCANTI Neto, M. T. O. e ROCHA, A. M. R. Noções de Prospecção e Pesquisa Mineral para Técnicos de Geologia e Mineração. Editora do IFRN-RN, 2010. 267 p. ISBN 978-85-89571-52-4.

CHEN, Z. (2011). Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. J. Rare Earths 29, 1–6.

CGEE. Usos e aplicações de Terra Rara no Brasil: 2012 – 2030. II Seminário Brasileiro de Terras Raras. CETEM, 2013.

CHINA. China.org.cn. China sets limit on annual rare earth mining volume by 2020. Xinhua, out, 2016. Disponível em: http://china.org.cn/china/Off_the_Wire/2016-10/18/content_39515617.htm . Acesso em jan., 2017

CHINA WATER RISK (CWR), 2016. Rare Earths: Shades of Grey - Can China Continue To Fuel Our Global Clean & Smart Future. Disponível em: <http://chinawaterrisk.org/notices/cwr-rare-earths-shades-of-grey/> . Acesso em dez. 2016.

CHINADAILY. China vows continued crackdown on illegal rare earth mining. Ago, 2015. Disponível em: http://www.chinadaily.com.cn/china/2015-08/08/content_21538605.htm . Acesso em fev. 2017

CHRISTIE, T., BRATHWAITE, B., TULLOCH, A., 1998. Mineral commodities report 17 – rare earths and related elements. New Zealand Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited, 13 pp.

CLAY, A. N., ACKROYD, B., 2013, A preliminary economic assessment in the form of an independent technical report on MbAc fertilizer corp. Araxá Project, Venmyn Rand (Pty) Ltd., p. 113. <http://www.sedar.com/GetFile.do?lang=EN&docClass=24&issuerNo=00012959&issuerType=03&projectNo=01960621&docId=3262275> . Acesso em fevereiro de 2017.

CLENFIELD, J., YASU, M., BIGGS, S., 2010. Hitachi Leads Rare Earth Recycling Efforts as China Cuts Access to Supply. Bloomberg, 8 December 2010.

CONGRESSIONAL BUDGET OFFICE. Strategic and Critical Nonfuel Minerals: Problems and Policy Alternatives, 1983. Disponível em: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uc1.31210024858084;view=1up;seq=3> Acesso em mar. de 2017.

DNPM. Norma brasileira para classificação de recursos e reservas minerais. Brasília, 2002. Disponível em: ftp://ftp.ige.unicamp.br/pub/ge_902/Classificacao/NormaDNPM.pdf acesso em mai. 2017.

DNPM. Portaria nº229, 2002. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/aceso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-229-em-29-04-2002-do-diretor-geral-do-dnpm> acesso em mai. 2017.

DNPM – Sumário Mineral, Edição 2011. Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - Departamento Nacional De Produção Mineral. Fevereiro de 2013

DNPM – Sumário Mineral, Edição 2012. Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - Departamento Nacional De Produção Mineral.

DNPM – Sumário Mineral, Edição 2013. Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - Departamento Nacional De Produção Mineral. Fevereiro de 2013

DNPM – Sumário Mineral, Edição 2014. Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - Departamento Nacional De Produção Mineral. Março de 2015

DNPM – Sumário Mineral, Edição 2015. Ministério de Minas e Energia - Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral - Departamento Nacional De Produção Mineral. Março de 2016

DONG, Shengzhi, et al. The status of Chinese permanent magnet industry and R&D activities. *AIP Advances*, 2017, 7.5: 056237.

EC. EUROPEAN COMMISSION. Critical raw materials for the EU: Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2010. Disponível em: <http://www.euromines.org/files/what-we-do/sustainable-development-issues/2010-report-critical-raw-materials-eu.pdf> Acesso em jan. de 2017.

EC. EUROPEAN COMMISSION. 2014. Report on critical raw materials for the EU Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials. European Commission.

EM DISCUSSÃO. Revista de audiências públicas do Senado Federal Ano 4 – Nº 17 – setembro de 2013. Terras-raras Estratégias para o Futuro. Disponível em: http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/Upload/201304%20-%20setembro/pdf/em%20discuss%C3%A3o!_setembro_2013_internet.pdf Acesso em dez 2015.

EPE Empresa de Pesquisa Energética. Série Estudos da Demanda de Energia. NOTA TÉCNICA DEA XX/15. Demanda de Energia 2050. Setembro de 2015. Disponível em: http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PNE2050_Premissas%20econômicas%20de%20longo%20prazo.pdf

EPE Empresa de Pesquisa Energética. Série Estudos da Demanda de Energia. NOTA TÉCNICA DEA 13/15. Demanda de Energia 2050. Janeiro de 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>

EGGERT, R.; WADIA, C.; ANDERSON, C.; et al. Rare Earths: Market Disruption , Innovation , and Global Supply Chains. , 2016.

ELWERT, T.; GOLDMANN, D.; ROEMER, F.; SCHWARZ, S. Recycling of NdFeB Magnets from Electric Drive Motors of (Hybrid) Electric Vehicles. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2016.

ERDMANN, Lorenz; GRAEDEL, Thomas E. Criticality of non-fuel minerals: a review of major approaches and analyses. *Environmental science & technology*, 2011, 45.18: 7620-7630.

EXAME, Revista. Alfavea prevê crescimento de 4% na venda de veículos em 2017. Exame.com, 5 de jan. de 2017. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/economia/anfavea-preve-crescimento-de-4-na-venda-de-veiculos-em-2017/> Acesso em mai. de 2017.

FERNANDEZ, V. Rare-earth elements market: A historical and financial perspective. *Resources Policy*, v. 53, n. March, p. 26–45, 2017.

FERREIRA, A. C., CARLOS, L., BLASQUES, M. (2014). Avaliações a Respeito Da Evolução Das Capacidades Contratada E Instalada E Dos Custos Da Energia Eólica No Brasil : Do Proinfa Aos Leilões De Energia, V, 82–91.

GWEC. Global Wind Energy Council. Global Wind Report: Annual Market Update 2016. Abril de 2017. Disponível em: <http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/>

GOLEV, Artem et al. Rare earths supply chains: Current status, constraints and opportunities. Resources Policy, [s.l.], v. 41, p.52-59, set. 2014

GOONAN, Thomas G. Rare earth elements: End use and recyclability. US Geological Survey, 2011.

GRAEDEL, T.E., BARR, R., CHANDLER, C., CHASE, T., CHOI, J., CHRISTOFFERSEN, L., FRIEDLANDER, E., HENLY, C., JUN, C., NASSAR, N.T., SCHECHNER, D., WARREN, S., YANG, M.Y., ZHU, C., 2012. Methodology of metal criticality determination. Environ. Sci. Technol. 46, 1063-1070.

GSCHNEIDNER JR., K.A., 2011. The Rare Earth Crisis—The Supply/Demand Situation for 2010–2015, 6 (2), Materials Matters, 32-37. Retrieved July 19, 2014, from <http://www.sigmaaldrich.com/>.

GUPTA, C. K.; KRISHNAMURTHY, N.. Extractive metallurgy of rare earths. International Materials Reviews, [s.l.], v. 37, n. 1, p.197-248, jan. 1992

HAXEL, G.B., HEDRICCK J.B., ORRIS, G.J. 2002. Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology. Fact sheet 087-02. Reston, VA: USGS. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/fs087-02.pdf> Acesso em mar. de 2017.

HOATSON, D. M., JAIRETH, S.; MIEZITIS, Y., 2011, The major rare earth element deposits of Australia: Geological setting, exploration, and resources: Canberra, ACT, Geoscience Australia, p. 204.

FAN, H.; YANG, K.; HU, F.; LIU, S.; WANG, K. Geoscience Frontiers The giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit , China : Controversy and ore genesis. , v. 7, 2016.

GEOLOGY. Geoscience News and Information 2017. Disponível em: <http://geology.com/articles/rare-earth-elements/>

GGG. Greenland Minerals and Energy. 2017. Disponível em: <http://www.ggg.gl/> . Acesso abr, 2017.

HUANG, Xiang et al. Protecting the environment and public health from rare earth mining. Earth's Future, [s.l.], v. 4, n. 11, p.532-535, nov. 2016.

HUMPHRIES, M. Rare Earth Elements: The Global Supply Chain. Congressional Research Service, p. 27, 2013.

HURST, C. China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn? Institute for the Analysis of Global Security, March 2010

IEA, 2016. International Energy Agency, Clean energy ministerial and Electric vehicles initiative. Global EV outlook 2016. Beyond one million electric cars; 2016. Disponível em: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Global_EV_Outlook_2016.pdf

IEA e IRENA. 2017. PERSPECTIVES FOR THE ENERGY TRANSITION Investment Needs for a Low-Carbon Energy System. Disponível em: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Perspectives_for_the_Energy_Transition_2017.pdf

INTERNATIONAL RARE EARTH SUMMIT. China, Shanghai. Nº 9, 11-12 Mai, 2017. Disponível em: http://www.asianmetal.com/Events_2017/2017RES/Index_2017RES_en.asp Acesso em jun. de 2017.

IREL. Indian Rare Earths Limited. Latest Scenario in Rare Earth and Atomic Minerals in India. Mumbai, 2014. Disponível em: http://www.mines.nic.in/writereaddata/UploadFile/IREL_PDAC_2014.pdf

ITAFOS. Integrated Producer of Phosphate Fertilizers Near Term Production and Development Upside, 2017. Disponível em: <https://itafos.com/site/assets/files/1649/2017-04-ifos-cp.pdf> Acesso em mai. 2017.

JAIRETH, Subhash; HOATSON, Dean M.; MIEZITIS, Yanis. Geological setting and resources of the major rare-earth-element deposits in Australia. Ore Geology Reviews, [s.l.], v. 62, p.72-128, out. 2014

JAMASMIE, C. Molycorp shuts down Mountain Pass rare Earth plant. Mining.com. 26 de ago. de 2015. Disponível em: <http://www.mining.com/molycorp-shuts-down-mountain-pass-rare-earth-plant/> Acesso em fev. 2017.

JIN, Yanya; KIM, Junbeum; GUILLAUME, Bertrand. Review of critical material studies. Resources, Conservation And Recycling, [s.l.], v. 113, p.77-87, out. 2016

JORC. Normas da Australásia para preparação de relatórios de recursos minerais e de reservas de minério. Set., 1999. Disponível em: http://www.jorc.org/docs/historical_documents/jorc_portuguese.pdf Acesso em jan. de 2017.

JORC. The JORC code: Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves, 2012. Disponível em: http://www.jorc.org/docs/JORC_code_2012.pdf Acesso em jan. de 2017.

JOINT RESEARCH CENTRE (JRC). 2011. Critical Metals in Strategic Energy Technologies. European Commission Joint Research Centre Scientific and Technical Reports, <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/22726>, 161 pp

JOINT RESEARCH CENTRE (JRC). 2013. Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector. Assessing Rare Metals as Supply-Chain Bottlenecks in Low-Carbon Energy Technologies

JOINT RESEARCH CENTRE (JRC). 2016. Assessment of potential bottlenecks along the materials supply chain for the future deployment of low-carbon energy and transport technologies in the EU. Wind power, photovoltaic and electric vehicles technologies, time frame: 2015-2030; EUR 28192 EN; doi:10.2790/08169. Disponível em:

https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/materials_supply_bottleneck.pdf

JOINT RESEARCH CENTRE (JRC). 2017. JRC Wind Energy Status Report 2016 Edition - Market, technology and regulatory aspects of wind energy. União Europeia, 2017. Disponível em:

https://setis.ec.europa.eu/sites/default/files/reports/wind_energy_status_report_2016.pdf

KATO Y, FUJINAGA K, NAKAMURA K, TAKAYA Y, KITAMURA K, OHTA J (2011) Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. *Nature Geoscience* 4(8):535–539. doi:10.1038/ngeo1185

KINGSNORTH, D. J. “The Global Rare Earths Industry: A Delicate Balancing Act” 2012. Curtin University, Western Australia. Disponível em:

https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiQ1O_DrqDWAhXKDPAKHYeOCu4QFggqMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.deutsche-rohstoffagentur.de%2FDERA%2FDE%2FDownloads%2FRD_kingsnorth_2012.pdf%3F__blob%3DpublicationFile&usg=AFQjCNEhfxVMs2Dz-LGL6jbIFMZq_HTLOA Acesso em ago. 2016

KINGSNORTH, D. J. Professor Kingsnorth on the ‘Real State’ of the Global Rare Earth Market, 2015. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=wpioUElckQa> acesso em jan. 2017.

KLINGER, Julie Michelle. A historical geography of rare earth elements: From discovery to the atomic age. *The Extractive Industries and Society*, 2015, 2.3: 572-580.

KOLTUN, P.; THARUMARAJAH, A. Life cycle impact of rare earth elements. *ISRN Metallurgy*, 2014, 2014.

LACAL-ARÁNTGUI, R. Materials use in electricity generators in wind turbines e state-of-the-art and future specifications. *Journal of Cleaner Production*, v. 87, n. 1, p. 275–283, 2015.

LAPIDO-LOUREIRO, F. E. O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras. CETEM / MCTI. Rio de Janeiro, 2013. 216 p. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br> . Acesso em: mar. 2016.

LIFTON, Jack. The only five rare earth elements that matter: depoiment [19 de junho, 2012]. *Streetwise reports:The Gold Report*. Entrevista concedida a Alec Gimurtu. Disponível em: <http://www.theaureport.com/pub/na/the-only-five-rare-earth-elements-that-matter-jack-lifton> Acesso em jan. de 2017.

LIU, J.K.D. Evaluation of Rare Earth Projects Using the Real Options Model. THESIS. Freiberg (2016). Disponível em: http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/22026/Liu_Final_1bx.pdf

LONG, K.R.; VAN GOSEN, B.S.; Foley, N.K. & Cordier, Daniel. 2010. The principal rare earth elements deposits of the United States – A summary of domestic deposits and a global perspective: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5220. 96 p.

LYNAS CORPORATION. Mount Weld Mineral Resource and Ore Reserve Update 2015. Disponível em: <https://www.lynascorp.com/PublishingImages/Pages/Mt-Weld-Resources-and-Reserves/ASX%20Announcement%20-%20Ore%20Reserves%20and%20Resources%20FINAL%20051015.pdf> Acesso em mar. 2017.

MACHACEK, Erika; FOLD, Niels. Alternative value chains for rare earths: The Anglo-deposit developers. *Resources Policy*, [s.l.], v. 42, p.53-64, dez. 2014

MANCHERI, N., MARUKAWA, T. Rare Earth Elements China and Japan in Industry, Trade and Value Chain. *ISS Contemporary Chinese Studies* nº.17, 2016. Disponível em: <http://web.iss.u-tokyo.ac.jp/kyoten/research/%E7%8F%BE%E4%BB%A3%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E7%A0%94%E7%A9%B6%E3%82%B7%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%82%BAN017%28new%29.pdf> Acesso em mai. de 2017.

MANCHERI, N. China faces WTO again over rare earth metals. *East Asia Forum*. 16 de mai. 2012. Disponível em: <http://www.eastasiaforum.org/2012/05/16/china-faces-wto-again-over-rare-earth-metals/> Acesso e abr. de 2017.

MANCHERI, N.; MARUKAWA, T. Rare Earth Elements China and Japan in Industry , Trade and Value Chain. *ISS Contemporary Chinese Research Series*, v. 17, p. 186, 2016.

MARAGON, M. Notas de aula: Geologia. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2009 Disponível em: <http://www.ufjf.br/nugeo/pagina-do-aluno/notas-de-aula/elementos-de-geologia/notas-de-aula-prof-marcio-marangon/> Acesso em mar. 2017.

MARIANO, Anthony N.; MARIANO, Anthony. Rare earth mining and exploration in North America. *Elements*, v. 8, n. 5, p. 369-376, 2012.

MASSARI, S.; RUBERTI, M. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*, v. 38, n. 1, p. 36–43, 2013.

MCLENNAN, S. M., 2001. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2 (4). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1029/2000GC000109> acesso em mai. 2017.

MIGUEL, F. K. Aplicação da Teoria de Portfólio de Markowitz para a Geração de Energia Elétrica Proveniente de Empreendimentos Eólicos no Brasil. São Paulo, 2016. 312 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

MINERAÇÃO SERRA VERDE. Press Release. Toronto, 11 de ago. de 2016. Disponível em: <http://mineracaooserraverde.com.br/innovation-metals-corp-announces-the-successful-separation-of-high-value-rare-earth-elements-from-mineracao-serra-verde-concentrate-using-the-rapidsx-process-2/> Acesso em mai. 2017.

MINISTRY OF LAND AND RESOURCES OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA (MLR) 2015 – Cotas de produção por província (em chinês). Disponível em: <http://www.mlr.gov.cn/zwgk/zytz/201505/P020150514345370780259.doc> . Acesso em dez. 2016.

MINISTRY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA (MOST) 1986 . 863 Program. Disponível em: <http://www.most.gov.cn/eng/programmes1/>

MINISTRY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA (MOST) 1997 . 973 Program. Disponível em: http://www.most.gov.cn/eng/programmes1/200610/t20061009_36223.htm

MME. Ministério de Minas e Energia. Energia Eólica no Brasil e no Mundo, ago. 2016. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+\(3\).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2](http://www.mme.gov.br/documents/10584/3894319/Energia+E%C3%B3lica+-+ano+ref++2015+(3).pdf/f5ca897d-bc63-400c-9389-582cd4f00ea2) Acesso em abr. de 2017.

MORRISON, Wayne M.; TANG, Rachel. China's rare earth industry and export regime: economic and trade implications for the United States. 2012.

MULLER, T., FRIEDRICH, B., 2006. Development of a recycling process for nickel-metal hydride batteries. J. Power Sources 158, 1498-1509.

NASSAR, N. T.; WILBURN, D. R.; GOONAN, T. G. Byproduct metal requirements for U . S . wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios. , v. 183, p. 1209–1226, 2016.

NEOMAG, 2017. Produção mundial de ímãs NdFeB <http://www.neomag.jp/statistics/ndfeb_production_transition.php> acessado em jan. 2017

NGUYEN, R. T.; IMHOLTE, D. D. China's Rare Earth Supply Chain : Illegal Production, and Response to new Cerium Demand. The Minerals, Metals & Materials Society (outside the U.S.), v. 68, n. 7, 2016.

ORRIS, G.J., GRAUCH, R.I., 2002. Rare Earth Element Mines, Deposits and Occurrences. US Department of the Interior, US Geological Survey

PAVEL, C. C.; LACAL-ARÁNTGUI, R.; MARMIER, A.; et al. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. Resources Policy, v. 52, n. January, p. 349–357, 2017.

RADEMAKER, J. H.; KLEIJN, R.; YANG, Y. Recycling as a strategy against rare earth element criticality: A systemic evaluation of the potential yield of NdFeB magnet recycling. Environmental Science and Technology, v. 47, n. 18, p. 10129–10136, 2013.

RAO, Zhenbin. Consolidating policies on Chinese rare earth resources. *Mineral Economics*, [s.l.], v. 29, n. 1, p.23-28, abr. 2016.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada. *Unfccc*, v. 9, 2015.

RIBA, Jordi-roger et al. Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 57, p.367-379, maio 2016

ROCIO, M.A; SILVA, M.M; CARVALHO, P.S; CARDOSO, J.G. (2012) Terras Raras: situação atual e perspectivas. *BNDES Setorial*

ROMIO, P. C. Modelo para garantia da disponibilidade de turbinas eólicas. Florianópolis, 2016. Dissertação (mestrado) 263 p. - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

ROLLAT, Alain. SEII 2012/09/28 – How to satisfy the Rare Earths demand/ 2012

RUDNICK, R.I.; GAO, S.. Composition of the Continental Crust. *Treatise On Geochemistry*, [s.l.], p.1-64, 2003.

SCHÜLER, D., BUCHERT, M., LIU, R., DITTRICH, S., MERZ, C., 2011. Study on Rare Earths and their Recycling. Öko-Institut, Germany. Disponível em: <http://www.oeko.de/oekodoc/1112/2011-003-en.pdf> . Acesso em jun. 2016

SCHULZE, R. e BUCHERT, M. Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material. *Resources, Conservation and Recycling*, 2016.

SENADO, 2017 – Projeto de Lei do Senado 529/2014 , <http://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/115774>

SERRANO-GONZÁLEZ, J., LACAL-ARÁNTEGUI, R., 2016. Technological evolution of onshore wind turbines—a market-based analysis. *Wind Energ.* 19, 2171–2187.

SEO, Yuna; MORIMOTO, Shinichirou. Comparison of dysprosium security strategies in Japan for 2010–2030. *Resources Policy*, [s.l.], v. 39, p.15-20, mar. 2014.

SOUSA-AGUIAR, Eduardo Falabella; TRIGUEIRO, Flávia Elias; ZOTIN, Fatima Maria Zanon. The role of rare earth elements in zeolites and cracking catalysts. *Catalysis Today*, [s.l.], v. 218-219, p.115-122, dez. 2013.

SOUSA, Wescley T. B. de et al . Projeto MagLev Cobra - Levitação Supercondutora para Transporte Urbano. *Rev. Bras. Ensino Fís.*, São Paulo , v. 38, n. 4, e4308, 2016 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172016000400408&lng=en&nrm=iso>. Acesso em jan. de 2017.

SOUSA FILHO, Paulo C. de; SERRA, Osvaldo A.. Terras raras no Brasil: histórico, produção e perspectivas. *Quím. Nova*, São Paulo , v. 37, n. 4, p. 753-760, 2014 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422014000400029&lng=en&nrm=iso>. acesso em set. 2016. <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20140121>.

STATE COUNCIL, Information Office of the. Situation and Policies of China's Rare Earth Industry. Beijing, 2014. Disponível em: http://english.gov.cn/archive/white_paper/2014/08/23/content_281474983043156.htm acesso em mar. 2017.

TABELA PERIÓDICA, 2016 - www.tabelaperiodica.org

TAKEHARA, Lucy. Avaliação do potencial de Terras Raras no Brasil. / Organizado por Lucy Takehara. – Brasília: CPRM, 2015. 218 p.: il. – (Informe de Recursos Minerais, Série Minerais Estratégicos, 02).

TANAKA et al., 2013 Tanaka, M. Oki, T. Koyama K. , H. Narita, Oishi, T. Recycling of rare earths from scrap J.C.G. Bunzli, V.K. Pecharsky (Eds.), Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, vol. 43, Elsevier, Amsterdam (2013), pp. 159-212

TOLMASQUIM, Mauricio T. (org.). Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf> . Acesso em: maio 2017.

UNFCCC, 2015. United Nations Framework Convention on Climate Change. Paris declaration on electro-mobility and climate change & call for action, 2015. Disponível em: <http://newsroom.unfccc.int/media/521376/paris-electro-mobility-declaration.pdf> Acesso em janeiro de 2017.

U.S DOE, 2010. Critical Materials Strategy. U.S. Department of Energy.

U.S.DOE, 2011. Critical Materials Strategy. U.S. Department of Energy.

U.S. Government Publishing Office (2014). H.R. 4883: National Rare-Earth Co-Operative Act of 2014. A bill introduced at 113 Congress, 2nd Session. Disponível em: <https://www.congress.gov/113/bills/hr4883/BILLS-113hr4883ih.pdf> . Acesso em fev. de 2017

US. Government Publishing Office (2013). H.R. 1063: National Strategic and Critical Minerals Policy Act of 2013. A bill at 113 Congress, 2nd Session. Disponível em: <https://www.congress.gov/113/bills/hr1063/BILLS-113hr1063rh.pdf> Acesso em fev. de 2017.

US. Government Publishing Office (2014). S2006: National Rare Earth Cooperative Act of 2014. A bill at 113 Congress, 2nd Session. Disponível em: <https://www.congress.gov/113/bills/s2006/BILLS-113s2006is.pdf> Acesso em fev. de 2017.

USGS (U.S. Geological Survey), 2002. Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology. USGS Fact Sheet 087-02. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/2002/fs087-02/fs087-02.pdf> consultado em 10 de janeiro de 2017

U.S. Geological Survey, 2009, Mineral commodity summaries Rare Earths. P. 130 - 131, jan. 2009: U.S. Geological Survey. Disponível em https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2009-raree.pdf

U.S. Geological Survey, 2010, Mineral commodity summaries Rare Earths. P. 128 - 129, jan. 2010: U.S. Geological Survey. Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2010-raree.pdf

U.S. Geological Survey, 2011, Mineral commodity summaries Rare Earths. P. 128 - 129, jan. 2011: U.S. Geological Survey. Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2011-raree.pdf

U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Rare Earths. P. 128 -129, jan. 2012. Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2012-raree.pdf

U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Rare Earths. P. 128 -129, jan. 2013. Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2013-raree.pdf

U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Rare Earths. P. 128 -129, jan. 2014. Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2014-raree.pdf

U.S. Geological Survey, 2014, Minerals Yearbook 2014. Rare earths [advanced release] Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/myb1-2014-raree.pdf Acesso em jan. 2017

U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Rare Earths. P. 128 -129, jan. 2015. Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2015-raree.pdf

USGS DATA SERIES 140 . Rare earth Disponível em: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/historical-statistics/ds140-raree.xlsx> . Acesso fev. 2017

U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Rare Earths. P. 134 -135, jan. 2016. Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2016-raree.pdf Acesso em mar. 2017.

U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Rare Earths. P. 134 -135, jan. 2017. Disponível em: https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2017-raree.pdf Acesso em mar. 2017.

NRC, 2008. Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. U.S. National Research Council, Washington, D.C., National Academies Press, 245 pp. Disponível em: <https://www.nap.edu/catalog/12034/minerals-critical-minerals-and-the-us-economy>

Rademaker, VALOR Econômico. CBMM confirma venda de 15% de seu capital para chineses. 2011. Disponível em: <http://www.valor.com.br/empresas/995406/cbmm-confirma-venda-de-15-de-seu-capital-para-chineses>

VILLELA, M. Serra Verde investe US\$ 170 milhões em Minaçu. Mining.com. 2 de jun. de 2017. Disponível em: <http://noticiasmineracao.mining.com/2017/06/02/serra-verde-investe-us-170-milhoes-em-minacu/> Acesso em jun. de 2017.

XINHUA, 2015 – Notícia http://news.xinhuanet.com/english/2015-08/08/c_134495154.htm Acesso em jan. de 2017

WALTERS, A.; LUSTY, P.; HILL, A. Rare earth elements - Commodity Profile. British Geological Survey, , n. November, p. 54, 2011

WEBER, Robert J.; REISMAN, David J. Rare earth elements: A review of production, processing, recycling, and associated environmental issues. US EPA Region, 2012.

WENDHAUSEN, P. A. P., Seminário Brasileiro de Terras Raras, III, 2015, Rio de Janeiro, disponível em <http://www.cetem.gov.br/images/palestras/2015/iisbtr/28-paulo-wendhausen.pdf> acesso em mar de 2016

WHITE HOUSE, USA. National Security Study Memorandum and Council on International Economic Policy Study Memorandum, 1974. Disponível em: https://www.nixonlibrary.gov/virtuallibrary/documents/nssm/nssm_197.pdf Acesso em jan. de 2017.

WÜBBEKE, Jost. Rare earth elements in China: Policies and narratives of reinventing an industry. Resources Policy, [s.l.], v. 38, n. 3, p.384-394, set. 2013.

ZEPF, V. (2013). A new approach to the Nexus of supply, demand and use: Exemplified along the use of neodymium in permanent magnets. Berlim, Alemanha: Springer-Verlag

APÊNDICE I

O Apêndice I apresenta a memória de cálculo da estimativa das vendas dos veículos híbridos e elétricos.

As Tabelas 22 e 23 foram elaboradas levando em consideração uma taxa de crescimento de 3,43% a.a. nas vendas de veículos (automóveis e comerciais leves) a partir de 2017.

Para estimar a venda de cada tipo de automóvel foi utilizado o perfil de venda exposto na Figura 26, em que a participação das vendas dos automóveis híbridos parte de 0,05% em 2015 e cresce linearmente até 2045, quando atinge 90%. Em 2050, esse percentual diminui para 82% devido a maior participação dos elétricos.

Para os automóveis elétricos, foi adotado um crescimento linear na participação das vendas, partindo de 0,001% em 2015 até atingir 10% em 2045. De 2045 até 2050, foi considerado um crescimento exponencial, em que essa tecnologia alcançará 18% na participação das vendas.

Para o cálculo da projeção de venda de veículos comerciais leves híbridos, foi considerada uma participação de 1,99% em 2020. De 2020 até 2045, foi considerado um crescimento médio de aproximadamente 21% para alcançar 100% em 2045, quando não haveria mais veículos com motores de combustão interna.

Tabela 22 - Estimativa do número de automóveis híbridos e elétricos vendidos entre 2015 e 2050 no Brasil

Ano	Licenciamento de automóveis	Automóveis híbridos	Automóveis elétricos	% venda de automóveis híbridos	% venda de automóveis elétricos	% vendas de outras tecnologias de automóveis
2015	2.123.009	1.062	21	0,05%	0,00%	99,95%
2016	1.676.722	51.112	5.605	3,05%	0,33%	96,62%
2017	1.734.234	104.863	11.578	6,05%	0,67%	93,29%
2018	1.793.718	162.242	17.953	9,05%	1,00%	89,95%
2019	1.855.242	223.433	24.753	12,04%	1,33%	86,62%
2020	1.918.877	288.631	31.997	15,04%	1,67%	83,29%
2021	1.984.695	358.039	39.710	18,04%	2,00%	79,96%
2022	2.052.770	431.869	47.914	21,04%	2,33%	76,63%
2023	2.123.180	510.342	56.634	24,04%	2,67%	73,30%
2024	2.196.005	593.690	65.896	27,04%	3,00%	69,96%
2025	2.271.328	682.155	75.726	30,03%	3,33%	66,63%
2026	2.349.234	775.991	86.153	33,03%	3,67%	63,30%
2027	2.429.813	875.462	97.207	36,03%	4,00%	59,97%
2028	2.513.155	980.843	108.918	39,03%	4,33%	56,64%
2029	2.599.357	1.092.423	121.317	42,03%	4,67%	53,31%
2030	2.688.515	1.210.504	134.439	45,03%	5,00%	49,97%
2031	2.780.731	1.335.400	148.319	48,02%	5,33%	46,64%
2032	2.876.110	1.467.439	162.992	51,02%	5,67%	43,31%
2033	2.974.760	1.606.966	178.498	54,02%	6,00%	39,98%
2034	3.076.795	1.754.337	194.875	57,02%	6,33%	36,65%
2035	3.182.329	1.909.928	212.166	60,02%	6,67%	33,32%
2036	3.291.483	2.074.128	230.414	63,02%	7,00%	29,98%
2037	3.404.380	2.247.345	249.664	66,01%	7,33%	26,65%
2038	3.521.151	2.430.005	269.963	69,01%	7,67%	23,32%
2039	3.641.926	2.622.551	291.361	72,01%	8,00%	19,99%
2040	3.766.844	2.825.447	313.910	75,01%	8,33%	16,66%
2041	3.896.047	3.039.176	337.663	78,01%	8,67%	13,33%
2042	4.029.681	3.264.243	362.675	81,01%	9,00%	9,99%
2043	4.167.899	3.501.174	389.007	84,00%	9,33%	6,66%
2044	4.310.858	3.750.519	416.718	87,00%	9,67%	3,33%
2045	4.458.721	4.012.849	445.872	90,00%	10,00%	0,00%
2046	4.611.655	4.092.961	518.694	88,75%	11,25%	0,00%
2047	4.769.835	4.166.425	603.410	87,35%	12,65%	0,00%
2048	4.933.440	4.231.478	701.962	85,77%	14,23%	0,00%
2049	5.102.657	4.286.048	816.609	84,00%	16,00%	0,00%
2050	5.277.678	4.327.696	949.982	82,00%	18,00%	0,00%

Fonte: elaboração própria

Tabela 23 - Estimativa do número de veículos comerciais leves híbridos vendidos entre 2015 e 2050 no Brasil

Ano	Licenciamento comerciais leves	Outros veículos comerciais leves	Veículos comerciais leves híbridos	% de comerciais híbridos	% de outros comerciais leves
2015	357.524	357.524	0	0	100%
2016	311.879	311.879	0	0	100%
2017	322.576	322.576	0	0	100%
2018	333.641	333.641	0	0	100%
2019	345.085	345.085	0	0	100%
2020	356.921	349.818	7.103	1,99%	98,01%
2021	369.164	360.571	8.592	2,33%	97,67%
2022	381.826	371.431	10.395	2,72%	97,28%
2023	394.922	382.348	12.575	3,18%	96,82%
2024	408.468	393.256	15.212	3,72%	96,28%
2025	422.479	404.076	18.403	4,36%	95,64%
2026	436.970	414.707	22.263	5,09%	94,91%
2027	451.958	425.026	26.932	5,96%	94,04%
2028	467.460	434.879	32.581	6,97%	93,03%
2029	483.494	444.079	39.415	8,15%	91,85%
2030	500.078	452.396	47.681	9,53%	90,47%
2031	517.230	459.548	57.682	11,15%	88,85%
2032	534.971	465.191	69.781	13,04%	86,96%
2033	553.321	468.905	84.416	15,26%	84,74%
2034	572.300	470.178	102.122	17,84%	82,16%
2035	591.930	468.389	123.541	20,87%	79,13%
2036	612.233	462.780	149.453	24,41%	75,59%
2037	633.232	452.433	180.799	28,55%	71,45%
2038	654.952	436.232	218.720	33,39%	66,61%
2039	677.417	412.823	264.595	39,06%	60,94%
2040	700.653	380.562	320.091	45,68%	54,32%
2041	724.685	337.458	387.227	53,43%	46,57%
2042	749.542	281.097	468.444	62,50%	37,50%
2043	775.251	208.554	566.697	73,10%	26,90%
2044	801.842	116.286	685.556	85,50%	14,50%
2045	829.345	0	829.345	100%	0%
2046	857.792	0	857.792	100%	0%
2047	887.214	0	887.214	100%	0%
2048	917.645	0	917.645	100%	0%
2049	949.121	0	949.121	100%	0%
2050	981.676	0	981.676	100%	0%

Fonte: elaboração própria

A Figura 36 apresenta a projeção de vendas de automóveis a partir das Tabelas 22 e 23.

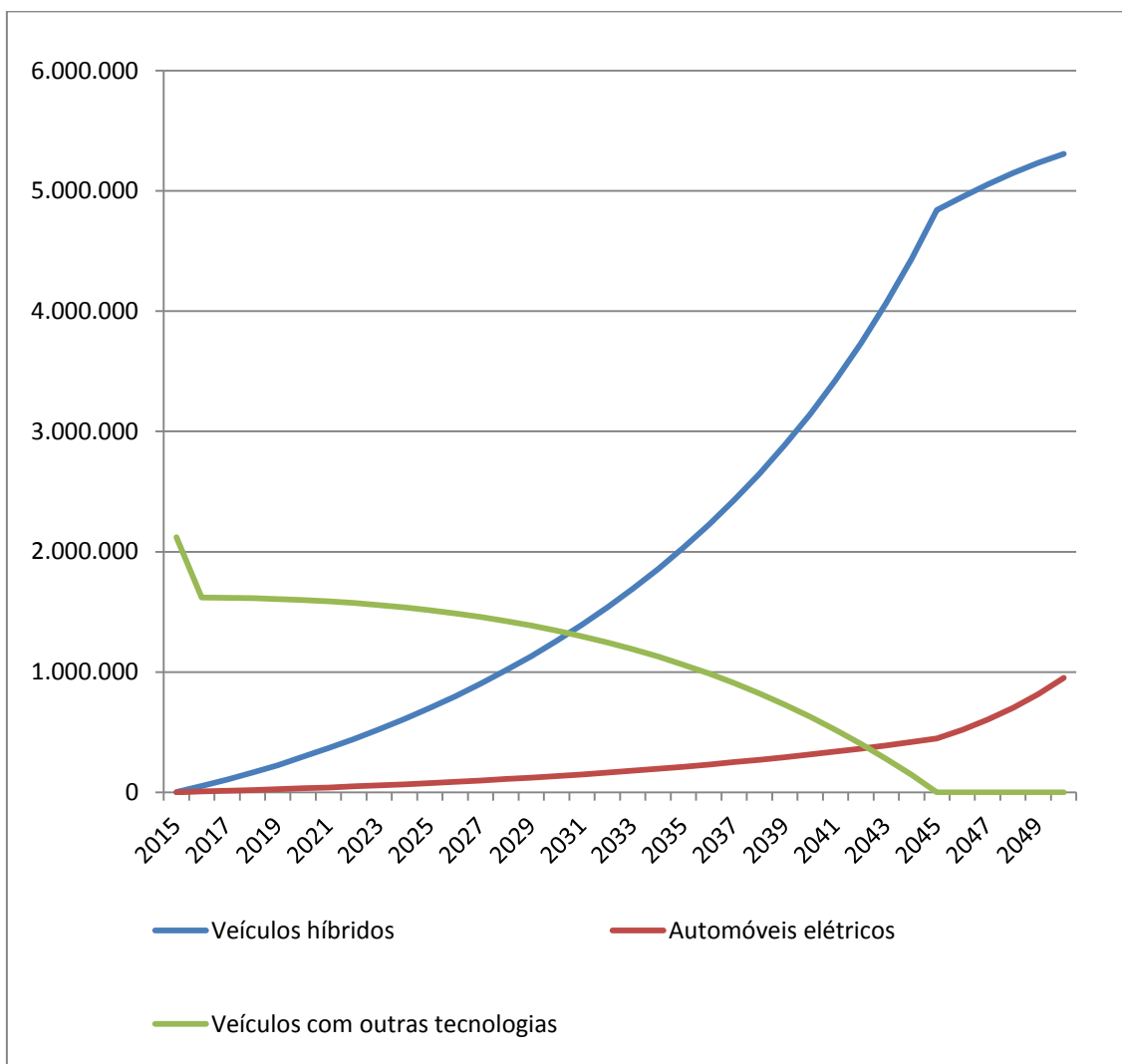


Figura 36 - Projeção de vendas de veículos leves de 2015 a 2050 no Brasil

6 APÊNDICE II

Estimativa da produção mundial em 2015

O Apêndice I tem o objetivo de estimar a produção mundial de cada ETR, considerando a produção ilegal e as cotas de produção chinesas. Para isso, a metodologia utilizada foi baseada em NASSAR *et al.*, (2016).

A Tabela 24 apresenta a produção de OTR por país com os dados do USGS (2017), que não considera a maioria produção de óxido de escândio (Sc_2O_3). Para o Brasil, foram considerados os dados do DNPM, em que o Brasil não produziu TR nesse ano, portanto não consta na Tabela 24.

Tabela 24 - Produção de OTR (t) por país

Produção de OTR em 2015 (t)	
China	105.000
Vietnã	250
Índia	1.700
Rússia	2.800
Malásia	500
Austrália	12.000
EUA	5.900
Tailândia	760

Fonte: USGS (2017)

Para estimar a produção de cada ETR, foram consideradas as concentrações de OTR das minas exploradas em cada país, como apresentado nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 25 - Proporção de OTR (%) em minas chinesas

OTR	Bayan Obo Inner Mongolia	Mianning Sichuan	Weishan Shandong	Depósitos de argilas de adsorção Sul da China								
				Longnan Jiangxic	Xunwu Jiangxi	Xinfeng Jiangxi	Shanghang Fujian	Pingyuan Guangdong	Jianghua Hunan	Dingnan Jiangxid	Guangxi	
Y_2O_3	0,5	0,9	0,8	64,9	10,1	24,3	25,6	10,3	47,4	11,7	29,0	
La_2O_3	23,0	31,5	35,5	2,2	38,0	27,6	27,3	27,2	16,0	16,8	24,1	
CeO_2	50,0	47,7	47,8	1,1	3,5	3,2	2,0	4,9	0,3	42,3	0,6	
Pr_6O_{11}	6,2	4,1	4,0	1,1	7,4	5,6	5,8	7,0	4,4	3,7	5,6	
Nd_2O_3	18,5	13,0	10,9	3,5	30,2	17,6	19,8	29,5	10,4	14,3	19,8	
Sm_2O_3	0,8	1,5	0,8	2,3	5,3	4,5	4,2	5,4	2,4	2,9	4,4	
Eu_2O_3	0,2	0,3	0,1	0,4	0,5	0,9	0,9	0,6	0,1	0,5	0,7	
Gd_2O_3	0,7	0,7	0,5	5,7	4,2	6,0	4,2	3,9	4,0	2,5	4,4	
Tb_2O_3	0,1	0,1	0,1	1,1	0,5	0,7	0,7	0,7	1,0	0,4	0,6	
Dy_2O_3	0,1	0,2	--	7,5	1,8	3,7	3,8	2,6	6,2	2,1	4,1	
Ho_2O_3	--	0,0	--	1,6	0,3	0,7	0,4	0,5	1,2	0,4	0,8	
Er_2O_3	--	0,1	--	4,3	0,9	2,5	2,3	0,9	3,5	1,1	2,6	
Tm_2O_3	--	0,0	--	0,6	0,1	0,3	0,4	0,1	0,6	0,2	0,4	
Yb_2O_3	--	0,1	0,0	3,3	0,6	1,1	1,0	0,7	2,4	1	2,7	
Lu_2O_3	--	--	--	0,5	0,1	0,2	0,4	0,1	0,4	0,1	0,5	
Total	100,1	100,0	100,5	100,0	103,5	98,9	98,9	94,5	100,2	100	100,0	

Fonte: NASSAR *et al.*, (2016)

Tabela 26 - Proporção de OTR em minas não chinesas (%)

	Dong Pao ¹	Índia Monazita	Rússia Loparita	Malásia Xenotímio	Malásia Monazita	Mount Weld CLD	Mountain Pass, EUA	Tailândia Monazita
Y₂O₃	0,01	0,45	1,25	2	61	0,76	0,12	-
La₂O₃	32,40	22	25	23	1,24	23,88	34	22,4
CeO₂	50,40	46	50,5	46,2	3,13	47,55	48,8	45,5
Pr₆O₁₁	4,00	5,5	5	4,6	0,493	5,16	4,2	5,1
Nd₂O₃	10,70	20	15	19,7	1,59	18,13	11,7	17,6
Sm₂O₃	0,90	2,5	0,65	3,2	1,14	2,44	0,79	2,3
Eu₂O₃	0,00	0,015	0,09	0,1	0,12	0,53	0,13	-
Gd₂O₃	0,00	1,2	0,55	0,8	3,47	1,09	0,21	1,2
Tb₄O₇	0,00	0,06	traços	--	0,906	0,09	0,014	-
Dy₂O₃	0,01	0,18	0,55	--	8,32	0,25	0,027	2,2
Ho₂O₃	-	0,02	0,7	--	1,98	0,03	0,004	-
Er₂O₃	-	0,01	0,8	--	6,43	0,06	0,003	-
Tm₂O₃	-	traços	0,1	--	1,12	0,01	0,001	-
Yb₂O₃	-	traços	0,2	--	6,77	0,03	0,001	-
Lu₂O₃	-	traços	0,15	--	0,988	0	0,0001	-
Total	98,42	97,94	100,54	99,60	98,70	100,01	100,00	96,30

¹ 0,83% de outros ETR foi alocado para o Dy

Fonte: USDOE (2011), IREL (2014) e NASSAR *et al.*, (2016)

A Tabela 25 apresenta os valores referentes às minas da China, enquanto a Tabela 26 apresenta os valores das minas de fora da China. Como alguns valores com o total das concentrações não somam 100%, eles foram normalizados antes do cálculo.

Para a Malásia, foi considerada uma produção de 95,5% a partir da monazita e 4,5% a partir do xenotímio com base no histórico de produção (AL-AREQI *et al.*, 2015).

No caso da China, a produção ilegal foi considerada entre 22 e 25% do total produzido no país (NGUYEN e IMHOLTE, 2016). Jiangxi, Guangdong e Sichuan foram as províncias que mais produziram ilegalmente NASSAR *et al.*, (2016). Sendo assim, foi decidido dividir a produção ilegal em três, cada uma dessas províncias produziu cerca de 11 mil toneladas de OTR ilegais, como mostrado na Tabela 27.

Tabela 27 - Cotas de produção e produção ilegal da China

Província	Cotas de produção (MLR, 2015)	% do total	Ilegal	% do total	cota de produção + produção ilegal	% do total
Inner Mongolia	59500	56,67%			59500	42,86%
Fujian (adsorção iônica)	2000	1,90%			2000	1,44%
Jiangxi (Adsorção iônica)	9000	8,57%	11273,333	33%	20273,333	14,60%
Shandong	2600	2,48%			2600	1,87%
Hunan (Adsorção iônica)	2000	1,90%			2000	1,44%
Guangdongd (Adsorção iônica)	2200	2,10%	11273,333	33%	13473,333	9,71%
Guangxi (Adsorção iônica)	2500	2,38%			2500	1,80%
Sichuan	25000	23,81%	11273,333	33%	36273,333	26,13%
Yunnane (Adsorção iônica)	200	0,19%			200	0,14%
Total	105000	100.0	33820	100%	138820	1

Fonte: MLR (2015), NGUYEN e IMHOLTE (2016).

A partir das Tabelas 24, 25, 26 e 27, foi elaborada a Tabela 28, onde é apresentada a estimativa da produção de OTR por país.

Deste modo, a estimativa da produção de ETR foi calculada através de cálculos estequiométricos, utilizando valores da Tabela 29.

A Tabela 30 mostra o resultado final da estimativa, em que os ETR estão na forma de metal.

Tabela 28 - Produção estimada de OTR por país em 2015 (t)

OTR	China	China cotas + ilegal	Vietnã	Índia	Rússia	Malásia	Austrália	EUA	Tailândia	Total	Total + ilegal
Y₂O₃	5525,9	9982,1	0,0	7,8	34,8	23,5	91,2	7,1	0,0	5690,3	10146,5
La₂O₃	26496,2	35646,6	82,3	381,9	696,2	110,5	2865,3	2006,0	176,8	32815,3	41965,7
CeO₂	44180,0	51550,2	128,0	798,5	1406,4	222,2	5705,4	2879,2	359,1	55678,9	63049,0
Pr₆O₁₁	5729,2	7524,5	10,2	95,5	139,2	22,2	619,1	247,8	40,2	6903,4	8698,7
Nd₂O₃	17802,6	24606,4	27,2	347,2	417,7	94,8	2175,4	690,3	138,9	21694,0	28497,9
Sm₂O₃	1577,5	2809,5	2,3	43,4	18,1	15,6	292,8	46,6	18,2	2014,4	3246,5
Eu₂O₃	291,6	455,0	0,0	0,3	2,5	0,5	63,6	7,7	0,0	366,1	529,6
Gd₂O₃	1379,0	2434,2	0,0	20,8	15,3	4,6	130,8	12,4	9,5	1572,5	2627,6
Tb₂O₇	210,3	377,9	0,0	1,0	0,0	0,2	10,8	0,8	0,0	223,2	390,8
Dy₂O₃	823,8	1582,8	0,0	3,1	15,3	1,9	30,0	1,6	17,4	893,1	1652,1
Ho₂O₃	143,0	294,4	0,0	0,3	19,5	0,5	3,6	0,2	0,0	167,2	318,5
Er₂O₃	419,4	780,5	0,0	0,2	22,3	1,5	7,2	0,2	0,0	450,7	811,8
Tm₂O₃	64,8	117,6	0,0	0,0	2,8	0,3	1,2	0,1	0,0	69,1	121,9
Yb₂O₃	306,2	567,9	0,0	0,0	5,6	1,5	3,6	0,1	0,0	316,9	578,7
Lu₂O₃	50,4	90,3	0,0	0,0	4,2	0,2	0,0	0,0	0,0	54,8	94,8
Total	105000,0	138820,0	250,0	1700,0	2800,0	500,0	12000,0	5900,0	760,0	128910,0	162730,0

Fonte: elaboração própria

Tabela 29 - Massa dos ETR para cálculos estequiométricos

Z	Símbolo	Terra rara	Óxidos	ETR/OTR	Massa do ETR	Massa O	Peso da molécula
39	Y	Ítrio	Y ₂ O ₃	0,7874443	88,906	15,999	225,809
57	La	Lantânio	La ₂ O ₃	0,8526872	138,91	15,999	325,817
58	Ce	Cério	CeO ₂	0,8140927	140,12	15,999	172,118
59	Pr	Praseodímio	Pr ₆ O ₁₁	0,8277065	140,91	15,999	1021,449
60	Nd	Neodímio	Nd ₂ O ₃	0,8573543	144,24	15,999	336,477
62	Sm	Samário	Sm ₂ O ₃	0,8623612	150,36	15,999	348,717
63	Eu	Európio	Eu ₂ O ₃	0,8636127	151,96	15,999	351,917
64	Gd	Gadolínio	Gd ₂ O ₃	0,8675934	157,25	15,999	362,497
65	Tb	Térbio	Tb ₄ O ₇	0,8502193	158,93	15,999	747,713
66	Dy	Disprósio	Dy ₂ O ₃	0,8713207	162,5	15,999	372,997
67	Ho	Hólmio	Ho ₂ O ₃	0,8729758	164,93	15,999	377,857
68	Er	Érbio	Er ₂ O ₃	0,8745232	167,26	15,999	382,517
69	Tm	Túlio	Tm ₂ O ₃	0,8756094	168,93	15,999	385,857
70	Yb	Itérbio	Yb ₂ O ₃	0,8782102	173,05	15,999	394,097
71	Lu	Lutécio	Lu ₂ O ₃	0,8793854	174,97	15,999	397,937

Fonte: NASSAR *et al.*, (2015)

Tabela 30 - Produção de ETR estimado em 2015 (t)

OTR	China	China cotas + ilegal	Vietnã	Índia	Rússia	Malásia	Austrália	EUA	Tailândia	Total	Total + ilegal
Y	4351,3	7860,4	0,0	6,2	27,4	18,5	71,8	5,6	0,0	4480,8	7989,8
La	22593,0	30395,4	70,2	325,6	593,7	94,3	2443,2	1710,5	150,7	27981,2	35783,6
Ce	35966,6	41966,6	104,2	650,0	1144,9	180,9	4644,7	2343,9	292,3	45327,8	51327,7
Pr	4742,1	6228,0	8,4	79,0	115,3	18,3	512,5	205,1	33,3	5714,0	7200,0
Nd	15263,1	21096,4	23,3	297,6	358,2	81,3	1865,1	591,8	119,1	18599,5	24432,8
Sm	1360,4	2422,8	2,0	37,4	15,6	13,5	252,5	40,2	15,7	1737,2	2799,6
Eu	251,8	393,0	0,0	0,2	2,2	0,4	54,9	6,6	0,0	316,2	457,3
Gd	1196,4	2111,9	0,0	18,1	13,3	4,0	113,5	10,7	8,2	1364,2	2279,7
Tb	178,8	321,3	0,0	0,9	0,0	0,2	9,2	0,7	0,0	189,8	332,2
Dy	717,8	1379,1	0,0	2,7	13,3	1,7	26,1	1,4	15,1	778,2	1439,5
Ho	124,9	257,0	0,0	0,3	17,0	0,4	3,1	0,2	0,0	145,9	278,1
Er	366,8	682,6	0,0	0,2	19,5	1,3	6,3	0,2	0,0	394,2	709,9
Tm	56,8	102,9	0,0	0,0	2,4	0,2	1,1	0,1	0,0	60,5	106,7
Yb	268,9	498,8	0,0	0,0	4,9	1,4	3,2	0,1	0,0	278,3	508,2
Lu	44,4	79,5	0,0	0,0	3,7	0,2	0,0	0,0	0,0	48,2	83,3
Total	87483,0	115795,7	208,1	1418,3	2331,4	416,5	10007,1	4917,1	634,5	107415,9	135728,6

Fonte: elaboração própria

De acordo com a estimativa realizada no presente estudo, a participação dos OTR sobre o total obteve resultados muito semelhantes aos apresentados pela ARGUS (2016) na Figura 14. A Figura 37 apresenta a estimativa de produção de OTR em 2015 considerando a produção ilegal estimada por NGUYEN e IMHOLTE (2016).

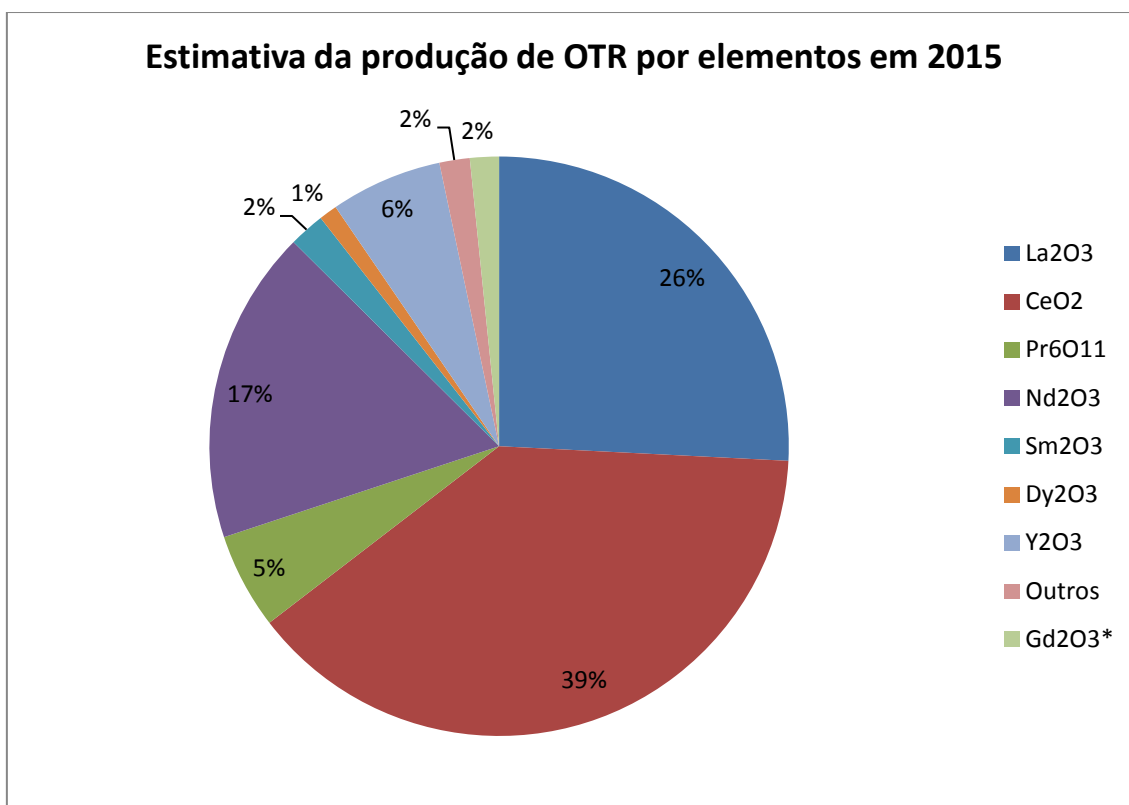


Figura 37 - Estimativa da participação da produção de OTR por elementos em 2015

*O gadolínio (Gd) não está incluído em “Outros”, pois foi estimado um volume produzido considerável, inclusive quando comparado ao disprósio.

Fonte: Elaborado pelo autor