



Artigo de Revisão

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v16n22022p02-16

Submetido em: 01 mar. 2021

Aceito em: 26 dez. 2022

.....

Ímãs de terras raras e energias renováveis: desafios tecnológicos e proposta de regulação

Rare earth magnets and renewable energy: technological challenges and proposal for a regulation

Fabiano Baldez da Costa Brito  <https://orcid.org/0000-0002-9549-5506>

Instituto Federal Fluminense.

Mestre em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal Fluminense: Macaé, RJ, BR

E-mail: fabianobcbrito@gmail.com

Marcos Antonio Cruz Moreira  <https://orcid.org/0000-0001-9928-7846>

Instituto Federal Fluminense.

Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, RJ, BR

E-mail: mcruczn@gmail.com

Augusto Eduardo Miranda Pinto  <https://orcid.org/0000-0002-3473-8340>

Instituto Federal Fluminense.

Doutor em Direito pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, RJ, BR

E-mail: augustoeypinto@gmail.com

Severino Joaquim Correia Neto  <https://orcid.org/0000-0001-8287-1392>

Instituto Federal Fluminense.

Doutor em Ciências da Educação pela Universidade Americana - PY

E-mail: profnetoseverino@gmail.com

Eurico Huziwara  <https://orcid.org/0000-0002-9256-2072>

Universidade Estácio de Sá.

Doutor em Produção Vegetal pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro: Campos dos Goytacazes, RJ, BR

E-mail: euricohuziwara@gmail.com

Resumo: A aderência de uma nação à Agenda 2030 da ONU implica na busca da utilização de energias renováveis em sua matriz energética. Excetuando-se a energia hidrelétrica, as energias eólicas (EE) e fotovoltaica têm dominado o mercado brasileiro. Um fator determinante para o salto tecnológico que permitiu à EE rivalizar em custo com a energia hidrelétrica foram os superímãs (SI) de terras-raras (TR). No entanto, a despeito de possuir a 2ª maior reserva mundial de TR, o Brasil possui produção inexpressiva e não detém tecnologia para produção de SI. Este trabalho visa apresentar a avaliação do potencial de geração de energia através do aproveitamento do Nd para fabricação de SI, considerando os dados disponíveis para as reservas de Araxá/MG e a extrapolação de

dados de uma máquina vernier. A análise indica o potencial de produção de 2,8Mton de Nd, equivalente a um potencial de geração da ordem de $2,168 \times 10^3$ GW, mostrando-se viável a utilização das reservas de TR para esse fim. Sugere-se a adoção de políticas públicas no país para restringir a exportação de minério *in natura* e priorizar a produção de SI para geração de energia, através da criação de um fundo público-privado com prazo determinado, através de percentual da Cfem a determinar.

Palavras-chave: Superímãs. Terras-raras. Regulação.

Abstract: The adherence of a nation to the UN Agenda 2030 implies the search for the use of renewable energies in its energy matrix. Except for hydropower, wind and photovoltaics have dominated the Brazilian market. A determining factor for the technological leap that allowed the wind to compete in cost with hydroelectric power was the rare earth (RE) super magnets (SM). However, despite having the 2nd largest world RE reserve, Brazil has inexpressive production and does not have the technology for the SM production. This work aims to present the evaluation of the potential of energy generation using SM based machines, considering the data available for the reserves of Araxá/ MG and the extrapolation of data from a vernier machine. The analysis indicates the production potential of 2.8Mton of Nd, equivalent to a generation potential of the order of $2,168 \times 10^3$ GW, proofing viable the use of TR reserves for this purpose. It is suggested to adopt federal public policies to restrict the export of fresh ore and prioritize the SM production for energy generation, through the creation of a public-private fund with a fixed term, through a percentage of Cfem to be determined.

Keywords: Super magnets. Rare earths. Regulation.

1 Introdução

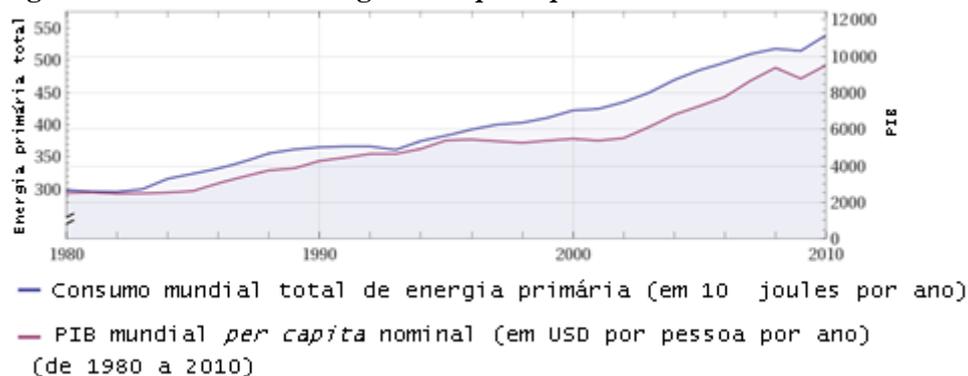
O crescimento do PIB – Produto Interno Bruto – *per capita* mundial a partir da crise econômica de 2008 aponta uma forte tendência de aumento da demanda por energia no mundo, conforme pode ser visto na Figura 1, o que traz sérias preocupações sobre o impacto ao meio ambiente. A Figura 2 apresenta o gráfico comparativo entre o consumo total de energia e o PIB *per capita* no período de 1980 a 2010, o que corrobora a relação entre estas duas variáveis.

Figura 1 – Produto Interno Bruto *per capita* mundial – 2007 - 2017



Fonte: Banco Mundial, calculado pelo Wolfram Alpha, adaptado pelos Autores (2019)

Figura 2 – Consumo de energia e PIB *per capita* nominal mundiais - 1980 a 2010



Fonte: Banco Mundial, calculado pelo Wolfram Alpha, adaptado pelos Autores (2019)

Para fazer jus à essa previsão de aumento da demanda, maior participação de fontes de energia renováveis na matriz energética mundial se torna um imperativo para que se busque um crescimento econômico ambientalmente sustentável. No Brasil, as fontes de energia renováveis correspondem a um total de 83,3% da matriz elétrica nacional (EPE, 2019). Ainda que o percentual apresentado seja superior à média de 22,8% dos países da OCDE (EIA, 2017), dada a assinatura da declaração de apoio ao Acordo de Paris pelo Brasil em 2018, será necessário aumentar significativamente o investimento neste setor nos próximos anos de forma a reduzir as emissões atmosféricas de gases de efeito estufa.

A conversão eletromecânica de energia através de máquinas dotadas de ímãs permanentes para produção em escala industrial se tornou possível após o desenvolvimento dos chamados superímãs de TR. A partir dos anos 1980, com o trabalho de Sagawa et al.(1984a,1984b), após intensas pesquisas em diversas instituições que visavam substituir os ímãs de Samário-Cobalto (SmCo), foram desenvolvidos os superímãs de neodímio (Nd), notadamente aqueles da família neodímio-ferro-boro (NdFeB). A utilização destes ímãs tornou competitiva, por exemplo, a produção de energia elétrica através de fontes eólicas, cujo custo de geração atual no Brasil é comparável à da energia hidrelétrica (GWEC, 2018), assim como a produção de veículos elétricos com alta eficiência e autonomia, como aqueles produzidos pela companhia automotiva Tesla, que recentemente liberou suas patentes, inclusive as dos motores elétricos a ímãs permanentes (AGRELA, 2019), entre outras aplicações.

A Lei de Lenz decorre da aplicação da Lei de Faraday-Maxwell para sistemas de geração, e enuncia que a força eletromotriz induzida em uma bobina é proporcional à derivada temporal do fluxo magnético. Na classe de máquinas elétricas a ímãs permanentes, esse fluxo é obtido através da variação da posição (rotação ou translação) ao longo do tempo de ímãs permanentes em relação a posição das bobinas coletoras, independentemente da configuração que cada máquina apresente. Esta movimentação pode advir de fontes motrizes diversas, renováveis (*e.g.* ventos, ondas, marés, biomassa, calor solar) ou não (combustão de derivados do petróleo, gás natural, carvão etc.), desde que compatíveis com as características elétrica e mecânica do gerador. Cabe destacar que o potencial de conversão de energia do gerador é limitado não somente

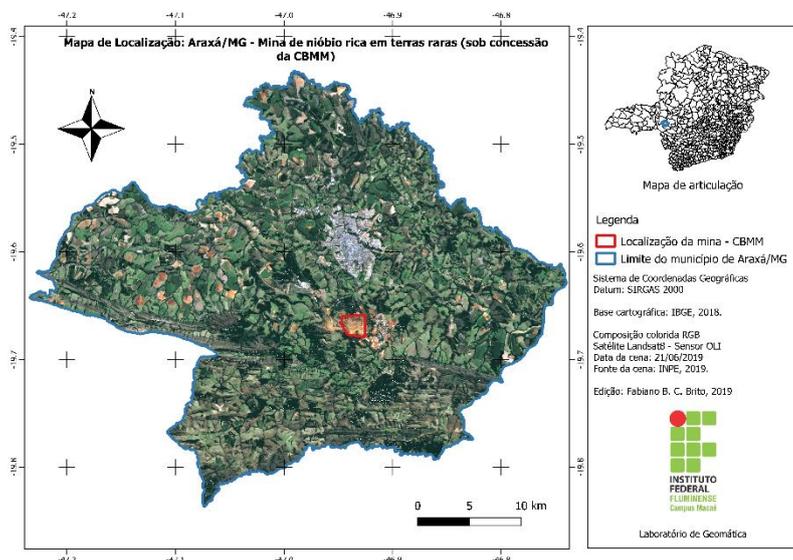
por suas próprias características eletromecânicas, mas também pela disponibilidade e características da fonte primária.

Além disso, o avanço tecnológico e a implantação de marcos legais (BRASIL, 2004; ANEEL, 2012) permitiram a produção descentralizada de energia elétrica, inclusive em imóveis de pessoas físicas, seja na forma *offgrid*, sistemas de geração isolados da rede, podendo ou não possuir sistema local de armazenamento de energia em baterias, ou *ongrid* – aquela integrada ao SIN – Sistema Interligado Nacional, com forte destaque para a utilização de células fotovoltaicas (ANEEL, 2017). A popularização da geração nesta modalidade distribuída através de fontes renováveis diversas da fotovoltaica, tais como a eólica, a termosolar, aquelas oriundas do aproveitamento da energia ondomotriz - das ondas do mar - em diversas modalidades, entre outras, passa necessariamente pelo desenvolvimento tecnológico de máquinas elétricas a ímãs permanentes mais robustas e eficientes que permitam a produção de energia em escala industrial.

Dentre os diversos componentes deste tipo de máquina, o que possui menor disponibilidade em termos de quantidade e disseminação tecnológica no Brasil são os ímãs de Nd, sobretudo os da liga NdFeB. Trata-se de um componente crítico ao desenvolvimento e aplicação de toda a classe de máquinas elétricas rotativas e lineares a ímãs permanentes, tanto para fornecimento de força motriz de alta eficiência quanto para a conversão eletromecânica de energia, assim como para discos rígidos e alto-falantes de alto desempenho, por exemplo.

O Brasil possui a 2ª maior reserva de TR do mundo, junto com o Vietnã, ficando atrás apenas da China (USGS, 2019). O projeto em andamento com maior avanço no Brasil é o da CBMM – Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, em mina localizada na cidade de Araxá, no estado de Minas Gerais (Figura 3), integrante do Complexo Carbonatítico do Barreiro, (PORTAL DA MINERAÇÃO, 2016). Há acumulações economicamente viáveis no Complexo Carbonatítico de Catalão I, localizado no estado de Goiás, sob concessão chinesa (PADILLA, GHALAYINI, PAPP, 2019), entre outras.

Figura 3 – Mapa de Localização: Araxá/MG – Mina de Nb rica em TR (sob concessão da CBMM)



Fonte: Autores (2019)

O processo geológico de enriquecimento de minerais de elementos de TR em formações de carbonatitos, como a da referida mina, são categorizadas como mineralização supergênica, que envolve o intemperismo profundo em ambientes tropicais. Nela, as intrusões de carbonita são importantes fontes de Nióbio, abrigado primariamente no pirocloro $[(\text{Na,Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH,F})]$ (PADILHA, 2019). Mais de 90% das reservas mundiais de nióbio vem dos depósitos de laterita de muitas centenas de metros de espessura do complexo de Barreiro (POHL, 2011).

As reservas provadas de óxidos de TR (OTR) do depósito de Araxá apontam 6,34 milhões de toneladas medidas (5,01% de OTR) e 21,94 milhões de toneladas estimadas (3,99% de OTR) (MBAC, 2012), podendo em alguns casos ser superior a 12% (MBAC, 2012). O principal minério para este fim é a monazita, de fórmula $[(\text{OTR, Th})\text{PO}_4]$, que representa 15% do total. O conteúdo de óxidos de didímio (Nd e Pr - praseodímio) é de 18,06% (MBAC, 2011).

Atualmente, a produção de TR no Brasil é praticamente inexpressiva em relação às suas reservas e com baixo impacto comercial, ocorrendo como rejeito sobretudo da produção de nióbio, em Araxá/MG (SOUSA, GUIMARÃES, BOTELHO, 2013; SENADO FEDERAL, 2013) (Figura 3). Esta posição contrasta com a chinesa, que possui a maior reserva provada de TR e foi responsável por 80% da produção mundial de TR (GAMBOGI, 2018). A China já havia anunciado que restringiria a exportação de TR em favor da exportação de ímãs (QI, QINGFEN, 2010), priorizando o produto de maior valor agregado. Recentemente, diante da chamada “Guerra Comercial” com os EUA, que envolve a discussão sobre barreiras alfandegárias para o comércio entre os dois países, o governo chinês anunciou que proibiria a venda de TR aos países que impusessem restrição à importação de seus produtos (AGÊNCIA O GLOBO, 2019), o que virtualmente poderia paralisar a indústria dos países afetados. Estas incertezas políticas e comerciais fortalecem a tendência de aumento dos preços do minério, o que impacta diretamente em todas as linhas industriais dependentes deste insumo. Assim, a adoção de uma política de extração estratégica de TR e a obtenção da tecnologia de produção de superímãs pode se tornar um pilar para o desenvolvimento sustentável e para a soberania do país.

Diante desse cenário, este trabalho apresenta um estudo econômico referente à produção brasileira de TR, incluindo uma comparação entre as receitas potenciais do comércio do óxido de Nd (O.Nd), de fórmula Nd_2O_3 , do Nd metálico e dos ímãs NdFeB virtualmente manufaturados, um método de avaliação do potencial de armazenamento de energia magnética destas reservas, caso seu uso fosse destinado exclusivamente à produção de ímãs para uso em máquinas elétricas, e, a partir dos resultados obtidos, uma proposta de marco legal para exploração deste tipo de recurso no país.

2 Material e Métodos

A produção teórica total de ímãs de NdFeB ($Q_{ímã}$) foi estimada a partir do conteúdo explotável da reserva de OTR do Complexo do Barreiro de Araxá/MG sob concessão da MBAC Fertilizer Corp., devido a maior quantidade de dados disponíveis (MBAC, 2012) e pela proximidade geográfica com projeto de desenvolvimento que está em andamento em conjunto entre CBMM e IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas (NETO et al., 2017). O cálculo foi efetuado através das Equações 1, 2, 3 e 4, e os dados consolidados são apresentados na Tabela 1.

$$\chi_{Nd} = \frac{2.M_{Nd}}{2.M_{Nd}+3.M_O} \quad (1)$$

Onde M_{Nd} é a massa molecular do Nd e M_O é a massa molecular do Oxigênio (NCBI, 2004). Os índices foram extraídos diretamente da fórmula do O.Nd.

$$Q_{O.Nd} = Q_{OTR} \times \chi_{O.Nd} [g] \quad (2)$$

$$Q_{Nd} = Q_{O.Nd} \times \chi_{Nd_{O.Nd}} [g] \quad (3)$$

$$Q_{ímã} = Q_{Nd} / \chi_{Nd_{ímã}} [g] \quad (4)$$

Tabela 1 – Dados consolidados de produção potencial

Símbolo	Valores	Descrição	Fonte do dado
Q_{OTR}	$21,94 \times 10^{12}g$	Quantidade de OTR	MBAC (2012)
$Q_{O.Nd}$	$3,36 \times 10^{12}g$	Quantidade explotável de O.Nd	Autores (2019)
$\chi_{O.Nd}$	0,153	Taxa de O.Nd em Q_{OTR}	Sousa, Guimarães, Botelho (2013)
Q_{Nd}	$2,80 \times 10^{12}g$	Quantidade de Nd metálico	Autores (2019)
$\chi_{Nd_{O.Nd}}$	0,833	Fração mássica de Nd no O.Nd	Autores (2019)
$\chi_{Nd_{ímã}}$	0,3	Fração mássica de Nd no ímã	Gomes, Bardano, Nascimento (2015)
$Q_{ímã}$	$9,33 \times 10^{12}g$	Quantidade de ímãs produzíveis	Autores (2019)

Fonte: Autores (2019)

O potencial comercial da reserva supracitada foi estimado utilizando a Equação 5 e os dados das receitas obteníveis \mathfrak{R}_i com preço \wp_i de venda direta do estoque completo dos produtos, onde i representa O.Nd, Nd metálico ou os ímãs NdFeB N35 virtualmente fabricados, assim como o preço do carbonatito concentrado, apenas para fins de informação, visto que não foi possível obter o volume total, todos apresentados na Tabela 2. Não foram considerados os custos para a extração no caso em tela devido ao fato de que o Nd nestas reservas seria produzido a partir do rejeito da produção de nióbio, o que virtualmente o torna negativo para o caso em questão (PORTAL DA MINERAÇÃO, 2016) e para agregação de valor, pois,

dado que a tecnologia não está plenamente desenvolvida (IPT, 2018), estes valores ainda não estão disponíveis. O preço dos ímãs foi calculado através da média aritmética simples segundo os dados (ALIEXPRESS, 2019a a 2019j) apresentados respectivamente na Tabela 2. Os dados foram selecionados de forma a contemplar lotes que garantissem a mínima distorção decorrente de vendas a varejo.

$$\mathfrak{R}_i = \varphi_i \times Q_i \text{ [US\$]} \quad (5)$$

Tabela 2 – Tabela de cálculo de preço médio dos ímãs

Quantidade	Diâmetro	Altura	Preço (R\$)	Peso (kg)	US\$/kg
100	0.005	0.001	7.92	0.014726216	135.13
500	0.01	0.001	106.58	0.294524311	90.92
1000	0.003	0.003	65.19	0.159043128	102.99
100	0.022	0.002	112.59	0.570199067	49.61
100	0.01	0.01	304.3	0.589048623	129.80
50	0.02	0.002	130.42	0.235619449	139.08
50	0.01	0.01	95.04	0.294524311	81.08
50	0.015	0.003	90.31	0.19880391	114.14
50	0.015	0.003	87.12	0.19880391	110.11
10000	0.003	0.003	537.48	1.590431281	84.91
Média					103.78

Fonte: Autores (2019)

Tabela 3 – Preços dos produtos: Carbonatito concentrado, O.Nd, Nd, ímã

Símbolo	Valores (US\$/g)	Descrição	Fonte
$\varphi_{Carbonatito}$	$4,22525 \times 10^{-3}$	Preço médio do carbonatito concentrado	SMM (2019)
$\varphi_{O.Nd}$	$4,436512 \times 10^{-2}$	Preço médio do O.Nd	SMM (2019)
φ_{Nd}	$5,864355 \times 10^{-2}$	Preço médio do Nd	SMM (2019)
$\varphi_{ímã}$	0,103	Preço do ímã NdFeB N35	Autores (2019)

Fonte: Autores (2019)

Para a estimativa da faixa de potencial de geração de energia de máquinas dotadas de ímãs permanentes, foram utilizados dois critérios, ambos voltados para a energia eólica: os dados do protótipo AFVHM – máquina vernier híbrida de fluxo axial – topologia mais eficiente, com acionamento a 130RPM (rotações por minuto), descrita em Roding (2001), extrapolado para o estoque teórico completo de ímãs $Q_{ímã}$, e a relação de 2700kg de ímãs necessários para uma turbina de 3MW, segundo Campos et al. (2015).

Para isso, foi calculado o Índice de Potência/ Massa magnética I_P/Mm segundo a equação abaixo:

$$I_P/Mm = \frac{P_{máquina}}{m_{ímã}} \text{ [W/g]} \quad (6)$$

Onde $P_{máquina}$ é a potência elétrica gerada pela máquina estudada e $m_{ímã}$ é a massa total dos ímãs utilizados no gerador, calculada para o protótipo através da equação a seguir:

$$m_{ímã} = \rho_{ímã} \times V_{ímã} \text{ [g]} \quad (7)$$

Onde $\rho_{ímã}$ é a massa específica de $7,5 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$ (ECLIPSE MAGNETICS, 2018) e $V_{ímã}$ é o volume total dos 36 ímãs N30 tipo bloco (forma de paralelepípedo) utilizados no protótipo, com medidas 50mm x 30mm x 6mm (RODING, 2001).

Assim, o potencial energético estimado da reserva supracitada foi calculado para cada um dos índices obtidos através da equação abaixo:

$$P = I_{P/Mm} \times Q_{ímã} \text{ [W]} \quad (8)$$

Todos os cálculos foram realizados utilizando o Microsoft Excel®.

3 Resultados e Discussão

Considerando somente as receitas potenciais de comercialização do O.Nd, do Nd e dos ímãs N35 apresentados na Tabela 4, resta claro que quanto maior for o grau de beneficiamento (aumento do valor agregado), maior será a receita esperada. Considerando os extremos estudados (ímã manufaturado x óxido de neodímio), encontra-se uma variação superior a 644%. Este prisma já indica a vantagem em restringir a exportação de minério e incentivar a manufatura de ímãs com essa matéria-prima, seja para industrialização interna ou para exportação, visto que permitirá maior geração de empregos, incentivará a instalação de uma indústria de microeletrônica mais avançada e aumentará a arrecadação de impostos.

Cabe ressaltar que as bases de preço deste estudo foram tomadas a partir de recorte pontual, mas a relação entre eles ao longo do tempo exibe um comportamento semelhante ao apresentado.

Tabela 4 – Receitas potenciais com o comércio de O.Nd, Nd e ímãs N35

Símbolo	Valores (x 10^{11} US\$)	Descrição
$\mathfrak{R}_{O.Nd}$	1,490668032	Receita obtenível com O.Nd
\mathfrak{R}_{Nd}	1,6420194	Receita obtenível com Nd metal.
$\mathfrak{R}_{ímã}$	9,61	Receita obtenível com ímãs N35

Fonte: Autor (2019)

A Tabela 5 mostra os valores calculados para os $I_{P/Mm}$ e seus respectivos potenciais de geração de potência P segundo os dados descritos na seção 2.

Tabela 5 - Comparação $I_{P/Mm}$ x Potencial de Geração P

Referência	$I_{P/Mm}$ (W/g)	Potencial de Geração P (TW)
Roding (2001)	0,232	2,168
Campos et al. (2015)	1,111	10,360

Fonte: Autor (2019)

Frente às diversas limitações construtivas do protótipo considerado, pode-se notar que frente a uma máquina de um gerador de porte industrial, ele teve um bom desempenho. Mesmo quando considerado o potencial de geração de energia decorrente do $I_{P/Mm}$ do protótipo Roding (2001), este é superior a 13 vezes a capacidade instalada atual de 165,85GW do Brasil (ANEEL, 2019).

Valores dessa ordem de grandeza indicam que a reserva de neodímio de apenas uma das reservas brasileiras é o suficiente para garantir a autossuficiência deste metal para fins de geração independentemente da modalidade adotada para o fornecimento da energia primária, desde que adotados sistemas híbridos e/ ou complementares baseados em fontes renováveis. Cabe ressaltar que ímãs de neodímio aumentam a eficiência de motores elétricos e autofalantes, entre outros, reduzindo também a demanda por energia elétrica e/ ou por combustíveis fósseis, quando se considera a substituição gradual por veículos híbridos e/ ou puramente elétricos. O neodímio ainda é utilizado na produção de baterias, e outras TR são parte de diversos eletroeletrônicos.

A exemplo da política comercial proposta pela China (BUYS, 2012), o Brasil deveria tratar TR como recurso estratégico, e não *commodities*; assim, recomenda-se regular a produção e, quando o processo de extração estiver plenamente desenvolvido, restringir ao máximo a exportação de minério *in natura* ou óxido para priorizar a manufatura de ímãs permanentes, seja para geração de energia, para aumento de eficiência de motores elétricos, fabricação de componentes eletroeletrônicos, exportação ou outros fins. Para isso, sugere-se a criação de um fundo por tempo determinado com a aplicação de um percentual da CFEM - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CNM, 2012) em cooperação com a iniciativa privada para aceleração do processo de Pesquisa & Desenvolvimento na área de produção e aplicação de ímãs permanentes.

4 Conclusão

A viabilidade da adoção de uma tecnologia envolve as esferas técnica, econômica e de disponibilidade. À despeito das simplificações adotadas neste estudo, fica patente o grande potencial de utilização das reservas de terras-raras disponíveis no Brasil para fins de geração de energia.

No entanto, para garantia da disponibilidade do item mais crítico da máquina elétrica, cuja configuração pode ser adaptada para conversão eletromecânica de diversas fontes renováveis de energia, tais como a eólica, a termosolar e a das ondas do mar, só para citar as de maior disponibilidade no Brasil, é recomendável a adoção de um marco legal que vise ao controle de produção de neodímio e ao domínio da tecnologia de manufatura de superímãs. Para desenvolver essa tecnologia, sugere-se, entre outras fontes, a criação de um fundo por tempo determinado formado a partir de um percentual a definir da receita da CFEM - Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais – destinada à União em parceria com a iniciativa privada.

Como consequência, são esperadas a independência em relação aos preços e tensões políticas internacionais relativas ao neodímio, a contribuição positiva para a balança comercial brasileira, a apropriação de tecnologias de ponta no desenvolvimento de equipamentos magnéticos, a redução de preços e consequente aumento geração distribuída de energia, reduzindo também a demanda de implantação de projetos de geração de energia de grande escala, o que sempre traz maiores impactos ao meio ambiente.

Referências

AGÊNCIA O GLOBO. China avisa que não venderá terras raras a países que boicotam o desenvolvimento. **Brasil Econômico**. Disponível em <https://economia.ig.com.br/2019-05-30/china-avisa-que-nao-vendera-terras-raras-a-paises-que-boicotam-o-desenvolvimento.htm>. Acesso em 01 jun. 2019.

AGRELA, L. Elon Musk libera patentes da Tesla para ajudar a salvar o planeta. **Revista Exame**. São Paulo: Editora Abril, 2019. Disponível em: <https://exame.abril.com.br/tecnologia/elon-musk-libera-patentes-da-tesla-para-ajudar-a-salvar-o-planeta/>. Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. 100pcs 5mm x 1mm Craft Model Disc Rare Earth Neodymium Super Strong Magnets N35. AliExpress, 2019a. Disponível em https://www.aliexpress.com/item/2014057786.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid.... Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. 10*1 500pcs 10 mm X 1 mm disc powerful magnet craft magnet neodymium magnets rare earth neodymium permanent strong magnet N35. AliExpress, 2019b. Disponível em https://www.aliexpress.com/item/2014057786.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid... Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. Retail Wholesale 1000pcs 3mm x 3mm Disc Rare Earth Neodymium Super Strong Magnets N35 Craft Model magnet 3x3mm. AliExpress, 2019c. Disponível em

https://www.aliexpress.com/item/32795106116.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid... Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. Zion 100pcs Dia 22x2mm super strong magnet N35 rare earth small round powerful neodymium magnet 22*2mm permanent magnetic. AliExpress, 2019d. Disponível em https://www.aliexpress.com/item/32884127539.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid... Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. Powerful Neodymium Magnets Disc 10mm x 10mm NdFeB Rare Earth 100pcs 10x10 N35 Imanes Magnetic Strong Small Cylinder Magnet. AliExpress, 2019e. Disponível em https://www.aliexpress.com/item/32957468502.html?spm=a2g1y.12024536.productList_13461441.pic_1&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid... Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. 50 Pcs Lot 20mm X 2mm Disc Rare Earth Neodymium Super Strong Magnets N35. AliExpress, 2019f. Disponível em https://www.aliexpress.com/item/32884127539.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid... Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. 50pcs D10X10mm Neodymium Magnet Strong Magnet N35 NdFeB Rare Earth Disc Magnet Free Shipping. AliExpress, 2019g. Disponível em <https://www.aliexpress.com/item/32973216203.html?spm=a2g0o.detail.1000060.3.5541642dskkIeu&gps-id=pcDetailBottomMoreThisSeller&scm=1007.13339.139...> Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. Strong Magnets Sheet 50pcs Disc 15mm x 3mm N35 NdFeB 15x3 Rare Earth Powerful Magnetic Round Neodymium Magnets Sheets. AliExpress, 2019h. Disponível em https://www.aliexpress.com/item/32884127539.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid... Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. 50pcs x Strong Magnet N35 Round Slice Disc 15 X 3 mm Rare Earth Neodymium Wholesale Free Shipping!ndfeb Neodymium magnets. AliExpress, 2019i. Disponível em https://www.aliexpress.com/item/32482679581.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid... Acesso em 21 jul. 2019

ALIEXPRESS. Retail Wholesale 10000pcs 3mm x 3mm Disc Rare Earth Neodymium Super Strong Magnets N35 Craft Model magnet 3x3mm. AliExpress, 2019j. Disponível em https://www.aliexpress.com/item/32797311737.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.52f8224a6r2V9a&algo_pvid=28e77f76-4296-44f8-bac6-7dfaa0957d03&algo_expid... Acesso em 21 jul. 2019

ANEEL. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.** Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília: 2012. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em 21 jul. 2019

ANEEL. **Nota Técnica nº 0056/2017-SRD/ANEEL:** Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024. Agência Nacional de Energia

Elétrica. Brasília: 2017. Disponível em http://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+Técnica_0056_PROJEÇÕES+GD+2017/38cad9ae-71f6-8788-0429-d097409a0ba9. Acesso em 21 jul. 2019

ANEEL. Capacidade de Geração do Brasil. In: **BIG - Banco de Informações de Geração**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília: 2019. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em 01 ago. 2019

BRASIL. Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004. Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, seção I, Edição Extra, retificado em 04/08/2004. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2004/Decreto/D5163.htm. Acesso em 21 jul. 2019

BUYS, B. Terras-raras: uma oportunidade imperdível? **Ciência e Cultura**, v. 64, n. 1, p. 8–9, 2012. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0009-67252012000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=en. Acesso em 2 ago. 2019

CNM. Entenda a Cfem (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais). **Série Estudos Técnicos - julho de 2012**, Volume 5, N. 14, p. 179-188 Confederação Nacional de Municípios – CNM. Brasília, 2012. Disponível em <https://www.cnm.org.br/cms/biblioteca/ET%20Vol%205%20-%2014.%20Entenda%20a%20CFEM.pdf>. Acesso em 21 jul. 2019

ECLIPSE MAGNETICS. NdFeB Magnets/ Neodymium Iron Boron Magnets Datasheet. Eclipse Magnetics. Sheffield (GB), 2018. Disponível em https://www.eclipsemagnetics.com/media/wysiwyg/datasheets/magnet_materials_and_assemblies/ndfeb_neodymium_iron_boron-standard_ndfeb_range_datasheet_rev1.pdf. Acesso em 21 jul. 2019

EIA. **International Energy Outlook 2017**. U.S. Energy Information Administration. Washington, 2017. Disponível em [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf). Acesso em 21 jul 2019.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2019: Relatório Síntese/ Ano Base 2018**. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relatório%20Síntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>. Acesso em 21 jul. 2019

GAMBOGI, J. Rare Earths [advance release]. In: **2015 Minerals Yearbook**. U.S. Geological Survey. Washington, DC: 2018, p. 60.1-60.18. Disponível em <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/rare-earth/myb1-2015-raree.pdf>. Acesso em 01 jun. 2019.

GOMES, R.C, BARDANO, B.M.M., NASCIMENTO, M. **Potencial de aproveitamento de fontes secundárias para terras-raras: ímãs permanentes.** In: XXVI ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2015, Poços de Caldas/MG. Poços de Caldas: CETEM, 2015. Disponível em <https://www.cetem.gov.br/images/congressos/2015/CAC00100015.pdf>. Acesso em 01 jun. 2019.

GWEC. **Global Wind Report: Annual Market Update 2017.** Global Wind Energy Council: Bruxelas, 2018. Disponível em: <http://files.gwec.net/files/GWR2017.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2018

IPT. **Novo passo para superímãs.** Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2018. Disponível em https://www.ipt.br/noticia/1399-novo_passo_para_superimas.htm. Acesso em 20 jul. 2019

MBAC. Projeto CBMM Terras Raras. In: I Seminário Brasileiro de Terras-Raras, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, 07 de dezembro 2011. MBAC Fertilizer Corp., 2011. Disponível em www.cetem.gov.br/images/palestras/2011/isbtr/MBAC-carlos-braga-antenor.pptx. Acesso em 01 jun. 2019.

MBAC. **Mineral Resource Estimate - Araxá Rare Earth Oxide-Phosphate-Niobium Project, Minas Gerais State, Brazil: NI 43-101 Technical Report - 01 jun. 2012.** MBAC Fertilizer Corp., 2012. Disponível em www.sedar.com. Acesso em 21 jul. 2019

NETO J. B. F. et al. **Obtenção de didímio metálico a partir dos óxidos de terras raras produzidos em Araxá, Brasil.** In: 72º Congresso Anual da ABM – Internacional & 17º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante da ABM Week, realizada de 02 a 06 de outubro de 2017, São Paulo, SP, Brasil. Disponível em <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/obtencao-de-didimio-metalico-a-partir-dos-oxidos-de-terras-raras-produzidos-em-araxa-brasil>. Acesso em 21 jul. 2019

PADILLA A.J., GHALAYINI Z.T., PAPP J.F. Niobium [advance release]. In: **2016 Minerals Yearbook.** U.S. Geological Survey. Washington, DC: 2019, p. 52.1-52.8. Disponível em <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2016-niobi.pdf>. Acesso em 01 jun. 2019.

PADILLA A.J. Niobium (Columbium). In: **Mineral Commodity Summaries 2019.** U.S. Geological Survey. Washington, DC: 2019, p. 114-115. Disponível em http://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf. Acesso em 01 jun. 2019.

NCBI. Periodic Table of Elements. In: **PubChem.** U.S. National Center for Biotechnology Information. Bethesda (MD), 2004. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/periodic-table/>. Acesso em 21 jul 2019.

POHL, W. L. Economic Geology, Principles and Practice: Metals, Minerals, Coal and Hydrocarbons - Introduction to Formation and Sustainable Exploitation of Mineral Deposits. Wiley-Blackwell, 2011.

PORTAL DA MINERAÇÃO. **Primeiro superímã com terras-raras do país nasceu em Minas**. Belo Horizonte, 2016. Disponível em <https://portaldamineracao.com.br/en/primeiro-superima-com-terras-raras-do-pais-nasceu-em-minas/>. Acesso em 21 jul. 2019.

Qi, Z., Qingfen, D. China to reduce rare earth export quotas. China Daily. Beijing, 2010. Disponível em http://www.chinadaily.com.cn/business/2010-10/19/content_11427356.htm. Acesso em 21 jul. 2019.

RODING, W. E. **Vernier Hybrid Wind Turbine Generators**. 2001. 89p. Electrical Power and Control School of Engineering, University of Durham, Durham, 2001. Disponível em http://etheses.dur.ac.uk/3802/1/3802_1363.pdf?UkUDh:CyT. Acesso em 01 jun. 2019.

SAGAWA, M. et al. New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe (invited). **Journal of Applied Physics**, v. 55, n. 6: p.2083–2087, 1984. doi:10.1063/1.333572. Disponível em <https://aip-scitation-org.ez135.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1063/1.333572>. Acesso em 01 jun. 2019.

SAGAWA, M. et al. Permanent magnet materials based on the rare earth-iron-boron tetragonal compounds. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 20, n.5: p. 1584–1589, 1984. CiteSeerX 10.1.1.533.8984. doi 10.1109/TMAG.1984.1063214. Disponível em <https://ieeexplore-ieee-org.ez135.periodicos.capes.gov.br/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1063214>. Acesso em 01 jun. 2019.

SENADO FEDERAL. Nióbio brasileiro domina mercado. In: **Terras Raras – Estratégias para o futuro**. Revista Em Discussão! Ano 4, Nº 17, setembro de 2013. Senado Federal. Brasília (DF), 2013. Disponível em http://www.senado.gov.br/noticias/jornal/emdiscussao/Upload/201304%20-%20setembro/pdf/em%20discussão!_setembro_2013_internet.pdf. Acesso em 25 jun. 2019

SMM. Rare Earth Price Chart, China Rare Earth Price Today Market. Shanghai Metals Market – SMM. Shanghai, 2019. Disponível em <https://price.metal.com/Rare-Earth>. Acesso em 21 jul 2019.

SOUSA, C.A.F. et al. Projeto CBMM Terras Raras. In: EXPOSIBRAM – Expo & Congresso Brasileiro de Mineração, Belo Horizonte (MG), Brasil, 18 a 21 de setembro 2017. Instituto Brasileiro de Mineração IBRAM, Belo Horizonte, 2017. Disponível em <https://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2018/05/cmb-2017-painel-6-clovis-antonio-de-faria-sousa.pdf>. Acesso em 01 jun. 2019.

SOUSA, C.A.F., GUIMARÃES R.C., BOTELHO, M.H.M. Desenvolvimento de processo e produtos de terras-raras na CBMM. In: II Seminário Brasileiro de Terras-Raras, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, 29 de novembro de 2013. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCTIC, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em <https://www.cetem.gov.br/images/palestras/2013/iisbtr/15-clovis-antonio.pdf>. Acesso em 01 jun. 2019.

USGS. Mineral commodity summaries 2019. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 2019, 200 p. Disponível em <https://doi.org/10.3133/70202434>. https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf. Acesso em 01 jun. 2019.

VAN GOSEN, B.S., et al. Rare-earth elements. In: Schulz, K.J., et al., eds. **Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply**: Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2017. p. O1–O31. Disponível em <https://doi.org/10.3133/pp1802O>. Acesso em 25 jun. 2019.