

**ANÁLISE DO MERCADO E ASPECTOS AMBIENTAIS DOS ÍMÃS DE TERRAS RARAS NA
ENERGIA EÓLICA NO BRASIL**

JOSE LUIS SARAVIA OCHARAN
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

GIANCARLO LOVON-CANCHUMANI

FRANCISCO MARIANO SOUZA LIMA

LIGIA MARCELA TARAZONA ALVARADO
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA - RIO

MICHEL SERRA SAMPAIO

ANÁLISE DO MERCADO E ASPECTOS AMBIENTAIS DOS ÍMÃS DE TERRAS RARAS NA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Resumo. O crescimento da energia eólica vem contribuindo para a diminuição dos gases de efeito estufa e para o aumento do uso de fontes renováveis na matriz energética mundial. Os aerogeradores contendo ímãs permanentes de terras raras (TRs) apresentam-se como uma tecnologia importante para maximizar a eficiência operativa na geração de energia. O Brasil é o oitavo país do mundo com maior capacidade instalada de energia eólica e o segundo país com as maiores reservas de TRs. O presente trabalho teve por objetivo analisar o consumo, a demanda e a oferta de ímãs permanentes de TRs e seus aspectos ambientais no cenário nacional de energia eólica. Realizou-se uma pesquisa bibliográfica e documental e foram determinadas equações de regressão estatística para processar e analisar os dados e informações. No mercado de energia eólica, os resultados indicam que o consumo atual de ímãs permanentes de TRs é de 981 toneladas e que a demanda e oferta projetadas até 2030 seriam de 2.352 e 827 toneladas, respectivamente, evidenciando uma escassez de 1.525 toneladas para atender à demanda. Foi constatado que a produção de ímãs permanentes de TRs apresenta impactos ambientais principalmente no que tange a substâncias radioativas, emissão de particulados finos, poluição do ar e da água e desmatamento no seu ciclo de vida.

Palavras-chaves: Energias Renováveis, Ímãs Permanentes, Terras Raras.

***Abstract.** The global wind energy is associated with the greenhouse gases reductions and increases the renewable sources in the world energy matrix. Wind turbines containing permanent magnets of rare earths (RE) are important technologies to maximize operational efficiency in electric power generation. Brazil stands out as eighth country in the world with the largest wind energy installed capacity and second country with greater RE reserves. The aim of the present work was analyzing the consumption, demand and supply of RE permanent magnets and its environmental aspects in the wind energy national scenario. Bibliographical and documentary research and statistical regression equations were carried out to process and analyze information and data. In this wind energy market, the results show that the current REE permanent magnets consumption is 981 tons and the forecast demand and supply until 2030 would be 2,352 and 827 tons, demonstrating a scarcity of 1,525 tons to meet the demand. It is found that RE permanent magnets production has environmental impacts mainly regarding the radioactive substances, emission of fine particulates, air and water pollution and deforestation in its life cycle.*

Keywords: Renewable Energies, Permanent Magnets, Rare Earths.

1. INTRODUÇÃO

As terras raras (TRs) compreendem um grupo de 17 elementos químicos da tabela periódica e são classificados em leves – Lantânio (La), Cério (Ce), Praseodímio (Pr), Neodímio (Nd); médios – Promécio (Pm), Samário (Sm), Európio (Eu), Gadolínio (Gd); e Pesados – Térbio (Tb), Disprósio (Dy) Hólmio (Ho), Érbio (Er), Túlio (Tm), Itérbio (Yb), Lutécio (Lu), Ítrio (Y) (DNPM, 2014). Elas estão presentes em minerais como a monazita, bastnasita, xenotímio e argilas iônicas (KOLTUN; THARUMARAJAH, 2014). As maiores reservas de TRs no mundo situam-se na China, com cerca de 40% (55.000 x 10³ t), seguida pelo Brasil, com 16% (22.000 x 10³ t), e Estados Unidos, com 10% (13.000 x 10³ t) (DNPM, 2014).

A demanda de TRs vem se intensificado devido às suas aplicações em diversos setores de alta tecnologia como em motores elétricos, catalisadores para refino do petróleo, ímãs permanentes, baterias recarregáveis, painéis solares e diversos equipamentos médicos (IMHOLTE et al., 2018; YANG et al., 2017). Particularmente, os ímãs permanentes contendo Nd, Pr, Dy, Tb e Gd são usados primordialmente em vários componentes elétricos e eletrônicos, nos motores elétricos de veículos híbridos, geradores elétricos, discos rígidos de computadores e nos modernos geradores elétricos das turbinas eólicas (YANG et al., 2017; ORTIZ; JÚNIOR, 2014).

Recentemente, no Brasil, os elementos de TRs despertaram interesse governamental pela constatação da vulnerabilidade econômica na repentina elevação dos preços destes elementos frente ao monopólio da China na extração e produção de óxidos de TRs (LIMA et al., 2017; RABE et al., 2017). Apesar dessa realidade, o país apresenta grande potencial para a exploração e beneficiamento de elementos de TRs diante da sua crescente demanda em equipamentos e componentes de alta tecnologia. Consequentemente, estes foram incluídos como minerais estratégicos no Plano Nacional de Mineração 2030 para o desenvolvimento do tecnológico-econômico do país (DNPM, 2014).

Diante desse contexto, o presente trabalho teve por objetivo estimar e analisar o consumo atual, a demanda e a oferta de ímãs permanentes de TRs e seus aspectos ambientais dentro do cenário nacional da energia eólica. Dessa forma, as informações e dados apresentados visam abrir debates futuros desse potencial mercado e das futuras cadeias produtivas envolvidas.

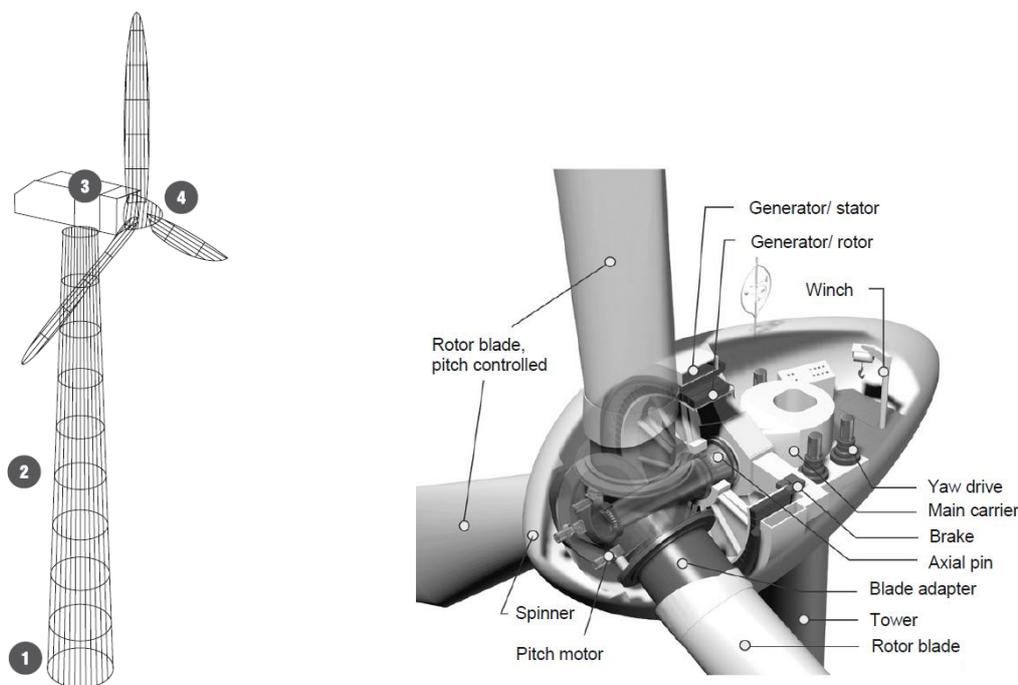
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Geração de energia eólica

Preocupações recentes sobre o aquecimento global gerado pelas emissões dos gases de efeito estufa e o esgotamento dos recursos naturais não renováveis têm acarretado o desenvolvimento e aproveitamento de fontes de energia renováveis e sustentáveis, como o caso da energia eólica. Essa energia renovável é uma das mais promissoras fontes de energia limpa que está suprimindo a demanda de energia nuclear, termoelétrica, de fontes fósseis, dentre outras, tendo maior participação e auge considerável nos últimos anos no mercado energético global (GWEC, 2018; SILVA et al., 2015).

Uma estação de energia eólica está composta principalmente pelo aerogerador, tendo uma vida útil entre 20 a 35 anos e sendo de eixo vertical ou horizontal. Os componentes de um aerogerador são a base-cimento, a torre, o rotor e o nacelle ou cabina (GASCH; TWELE, 2012). O rotor é formado pelas pás e o cubo de rotação. Dentro do nacelle, dependendo de cada modelo, encontram-se principalmente o eixo do rotor, a caixa de velocidades (caixa de engrenagens), o mecanismo de freio, o eixo do gerador, o gerador elétrico, o alternador, o sistema de bobinas, o sistema de ímãs permanentes, o sistema de orientação (*yaw system*), o controle de potência e, na parte externa, o anemômetro (GASCH; TWELE, 2012). O gerador

é responsável pela transformação da energia mecânica em energia elétrica, sendo síncrono ou assíncrono (BESSA, 2016; ABDI, 2014). Entre os principais tipos de geradores, tem-se: 1) assíncrono de indução com rotor gaiola; 2) assíncrono de indução com rotor ventilado; 3) assíncrono de indução duplamente excitado; 4) síncrono de excitação com ímãs permanentes; 5) síncrono excitado eletricamente com enrolamento de campo (ABDI, 2014). O Gráfico 1 mostra um exemplo dos componentes e partes de um aerogerador convencional.



a) Componentes: 1 – base; 2 – torre; 3 – nacelle; 4 – rotor.

b) Partes e acessórios do rotor e nacelle.

Gráfico 1. Componentes e partes de um aerogerador convencional.

Fonte: ABDI (2014) e Gasch e Twele (2012).

Os parques eólicos são de tipo *onshore* (instalados no continente) e *offshore* (instalados no mar). Os aerogeradores são considerados de pequeno porte (até 50 KWh), médio porte (de 50 a 1.000 KWh) e grande porte (acima de 1 MWh) (PINTO et al., 2013). O mercado eólico é dominado por instalações *onshore* e pelo modelo assíncrono de indução duplamente excitado (CODEMIG, 2016a). A tendência tecnológica a nível internacional para instalação de aerogeradores com ímãs permanentes acontece principalmente nas instalações de grande porte e em parques eólicos *offshore*, onde as velocidades dos ventos são maiores e constantes, permitindo assim atingir potências energéticas elevadas (RABE et al., 2017; WENG, 2017; CODEMIG, 2016a; GWEC, 2016).

2.2. Ímãs permanentes de TRs em aplicações eólicas

Os principais ímãs permanentes existentes no mercado são de TRs, de ferrite e da mistura de alumínio (Al), níquel (Ni) e cobalto (Co). Dessa variedade, os ímãs permanentes de TRs apresentam melhores propriedades magnéticas e têm um menor volume (CODEMIG, 2016a). Esses ímãs permanentes são produzidos a partir de uma liga que contém principalmente Nd e em menores proporções o Pr, Dy, Tb e/ou Gd (YANG et al., 2017; SUGIMOTO, 2011). Os elementos de TRs são aproximadamente 30% em peso do total da liga, que também é composta por outros elementos como Ferro (Fe), Boro (B) (YANG et al., 2017; JIN et al., 2016).

Os sistemas rotor-estator contendo ímãs permanentes de TRs substituem as caixas de velocidades (caixa de engrenagens), melhoram a eficiência energética devido à diminuição das perdas (possuem alta resistividade elétrica sem deteriorar as propriedades magnéticas) e diminuem as atividades de manutenção (RABE et al., 2017; BESSA, 2016; CODEMIG, 2016a; CONSTANTINIDES, 2016).

A modo de referência, um aerogerador de grande porte com capacidade instalada de 03 MWh precisaria de aproximadamente 2.700 kg de ímãs de NdFeB, sendo que 01 tonelada corresponderia a Nd (CAMPOS, 2015). As proporções estimadas dos elementos de TRs nos ímãs permanentes variam de acordo com a composição dos óxidos e/ou metais de TRs usados na formação das ligas e fabricação dos ímãs. Estima-se que a proporção em peso desses elementos seja 1/3 do peso total do ímã. Quando for usado Nd e Pr, as proporções aproximadas são 75% de Nd e 25% de Pr (CAMPOS, 2015). No caso de Nd e Dy, as proporções estimadas podem ser até de 80 e 20%, respectivamente. Finalmente, quando usado Tb, a proporção é 2% em peso (IMHOLTE et al., 2018).

3. METODOLOGIA

Foi realizada uma revisão bibliográfica e documental e a partir dessas informações e dados procedeu-se com uma fase projetiva. O estudo foi enquadrado dentro do sistema interligado nacional de energia elétrica conformado pelos ambientes de contratação regulada e livre. A geração de energia elétrica a partir de turbinas eólicas de pequeno porte e instalações domésticas não ligadas ao sistema nacional foram desconsideradas.

Para o cálculo dos ímãs permanentes de TRs existentes nas instalações eólicas do país, primeiramente, procuraram-se informações e dados de empresas que instalam aerogeradores com esses componentes e suas capacidades instaladas no parque eólico nacional. Posteriormente, determinou-se o fator de utilização desses ímãs no setor da energia eólica através da participação dessas capacidades instaladas dentro da capacidade instalada acumulada de energia eólica no país. A quantidade atual desses componentes foi calculada através da relação indicada por Campos (2015) de que 03 MWh de energia eólica precisaria de 2.700 kg de ímãs permanentes de TRs. Por último, a fim de determinar as quantidades em peso de elementos de TRs, escolheram-se as proporções mencionadas por Jin et al. (2016) e Campos (2015), que são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Proporção em massa de elementos de TRs em ímãs permanentes.

Elementos de TRs	Nd	Pr	Dy	Fe	B	Co	Al	Ni
Proporção:	18%	4,6%	6,15%	66,88%	1,02%	2,84%	0,12%	0,39%

Fonte: Adaptado de Jin et al. (2016) e Campos (2015).

Para a projeção da demanda nacional, inicialmente se definiu o período de avaliação até 2030. Após, verificou-se a evolução das capacidades instaladas acumuladas de energia eólica no cenário nacional a fim de avaliar a tendência dos dados. A partir daí, avaliaram-se as curvas de regressão (linear, logarítmica, exponencial e potência) e os coeficientes de determinação mais ajustados (valor próximo de “1” indica que o modelo de regressão se ajusta à mostra e é o mais confiável), sendo que a equação polinomial de segundo grau $y = 0,042 x^2 + 0,547 x - 1,809$ com coeficiente de determinação de 0,958 foi a mais precisa para as projeções subsequentes. Depois, aplicou-se a equação polinomial para obter os valores da capacidade instalada acumulada até 2030 e, em seguida, calculou-se a capacidade anual nova para cada ano projetado, sendo a diferença entre a capacidade instalada acumulada do ano seguinte menos a do ano em avaliação. Com essa base, determinou-se a demanda projetada de ímãs permanentes de TRs, em proporção mássica, por meio do fator de utilização multiplicado com a capacidade anual nova. Finalmente, a demanda projetada de TRs foi

obtida através das proporções mostradas na Tabela 1 e conforme a demanda projetada de ímãs permanentes. Assumiu-se que as condições atuais do mercado internacional sobre a comercialização de elementos de TRs e ímãs permanentes a partir desses elementos seriam constantes no período de avaliação.

Para a projeção da oferta nacional, primeiramente, procurou-se empreendimentos sobre produção e fornecimento nacional de ímãs permanentes de TRs para o setor da energia eólica do país. Em seguida, buscaram-se informações referentes ao balanço de massa para produzir ímãs permanentes a partir de concentrados de óxidos de TRs. Continuando, definiu-se a produção máxima de ímãs permanentes em função das capacidades limite de produção das empresas que fabricam os ímãs permanentes no território nacional. A seguir, analisaram-se os dados da produção desses ímãs com o propósito de determinar a tendência e definiu-se o período de avaliação até 2030. A equação de regressão foi exponencial $y = 1,594 e^{0,602 X}$ com coeficiente de determinação de 0,992 para as projeções respectivas. Com esses dados, calculou-se a oferta projetada de ímãs permanentes e de elementos de TRs, em proporção mássica, e segundo a Tabela 1. Por último, em função dos cálculos realizados e por meio do balanço de massa, determinou-se a necessidade de concentrados de óxidos de TRs para a oferta projetada. Do mesmo modo, assumiu-se que as condições atuais do mercado internacional sobre importação e comercialização dos elementos de TRs e ímãs permanentes seriam constantes no período de avaliação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Setor nacional de energia eólica

O Brasil encontra-se na oitava posição dos 10 países com maiores capacidades instaladas de energia eólica, com uma geração até o final de 2017 de 12,76 GWh, sendo superado por países como China (188,23 GWh) e Estados Unidos (89,08 GWh) (GWEC, 2018). A geração de energia eólica representa 8,3% da matriz elétrica brasileira, a capacidade instalada atual é de 12,95 GWh, há 518 usinas instaladas (parques eólicos) e mais de 6.600 aerogeradores em funcionamento e, dependendo dos períodos de maior força dos ventos, a energia eólica supre até 10% da demanda energética do país (ABEEOLICA, 2018). Espera-se, segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia do Brasil, uma expansão da capacidade instalada até 17,88 GWh para o final de 2023 (ABEEOLICA, 2018). Os Gráficos 2 e 3 mostram a distribuição da matriz elétrica e a evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil.

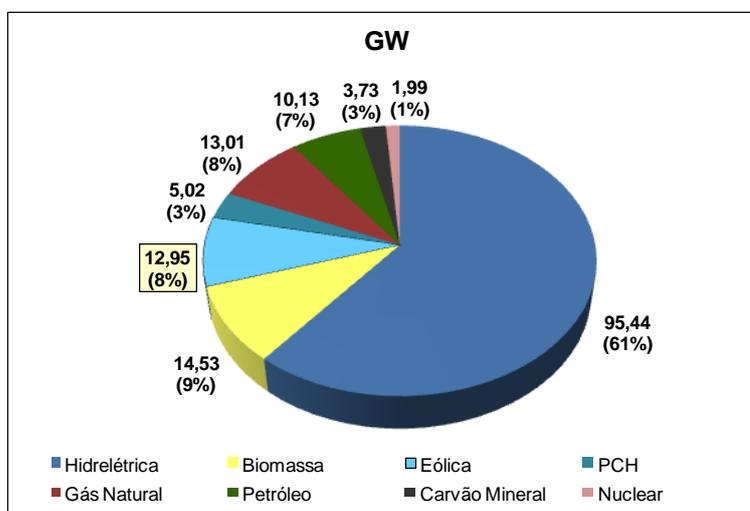


Gráfico 2. Distribuição da matriz elétrica brasileira em fevereiro de 2018.

Fonte: ABEEOLICA (2018).

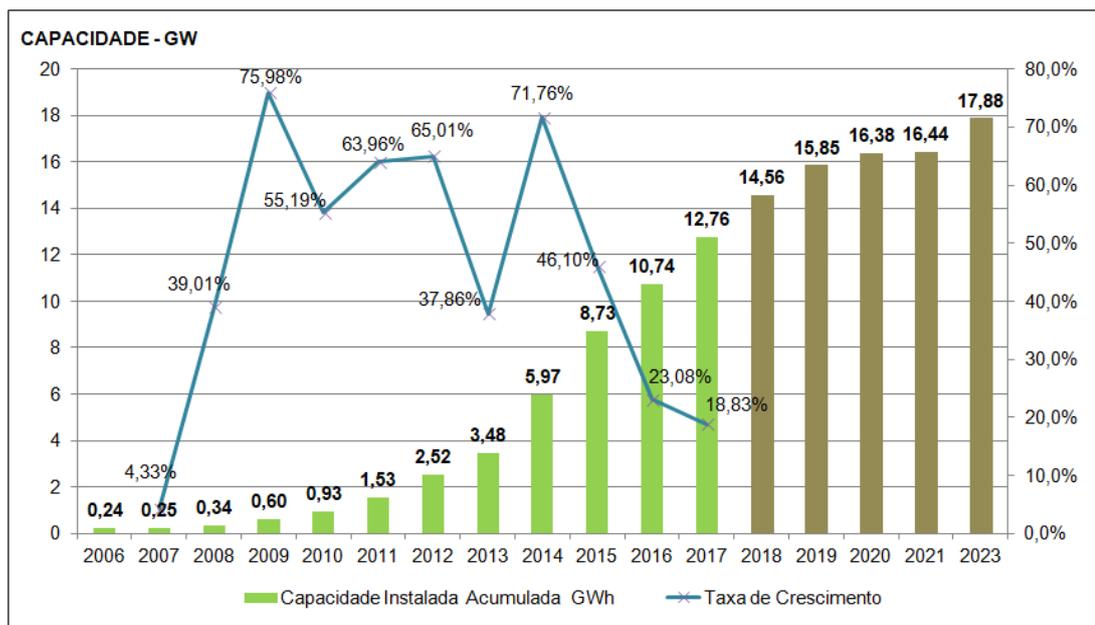


Gráfico 3. Evolução da capacidade instalada de energia eólica.

Fonte: ABEEOLICA (2018).

O setor eólico nacional exige fornecedores de partes, componentes e acessórios altamente especializados. O aerogerador representa geralmente mais de 60% do investimento total de um parque eólico, sendo que as importações representam aproximadamente 75% devido à falta de fornecedores especializados e de uma cadeia produtiva nacional tecnologicamente desenvolvida e consolidada (ABDI, 2014). Há capacidade limitada para a fabricação e distribuição, por exemplo, de flanges, tecidos de fibra de vidro, rolamentos, fundidos e torres que suportam o rotor e nacelle do aerogerador (ABDI, 2014). Faltam fabricantes para itens de alta tecnologia como os sistemas de controle, sensores, anemômetros, caixas multiplicadoras de velocidade (caixa de engrenagem), rolamentos (principal e de giro) e ímãs permanentes (ABDI, 2014). Apesar dessas lacunas, o desenvolvimento do setor e sua participação no mercado energético nacional vêm crescendo, impulsionado por meio dos fundos liberados pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e pelo Programa de Incentivos a Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), Lei nº10.438/2002. A proposta desses incentivos é a criação de cadeias produtivas de âmbito nacional (capital nacional ou estrangeiro) para a fabricação e fornecimento desses componentes tecnológicos e para a geração e comercialização de energia eólica (ABDI, 2014).

4.2. Contexto nacional da produção de ímãs permanentes de TRs

A matéria-prima principal para a fabricação de ímãs permanentes são os óxidos e/ou metais de elementos de TRs, Fe e B. A extração, concentração e beneficiamento de TRs são desenvolvidos em escala de laboratório e em escala piloto por diversas mineradoras como a Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, a Mineração Serra Verde e a Mineração Taboca e também por instituições como o Instituto de Pesquisas Tecnológicas, o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e o Centro de Tecnologia Mineral (CODEMIG, 2016a, 2016b). No entanto, não existe uma fabricação de ímãs permanentes de TRs para aplicações eólicas em escala industrial e nem há fornecedores nacionais para a grande parte das matérias-primas e insumos necessários (CODEMIG, 2016b).

Para a fabricação de ímãs permanentes de (Nd,Pr)FeB, a produção de óxido de didímio (Nd + Pr) ainda é baixa e o óxido de disprósio não é produzido no país (CODEMIG, 2016b). Há uma iniciativa em andamento da Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas

Gerais (CODEMIG) que atualmente está em processo de licenciamento ambiental para a operação de um Laboratório-Fábrica de Ímãs Permanentes de NdFeB e SmCo. Essa iniciativa será implementada na Região Metropolitana de Belo Horizonte (MG), terá uma capacidade instalada de 100 toneladas por ano e priorizará somente a produção com base em Nd devido à necessidade de produção e fornecimento nacional desse elemento e porque há maior participação e diversificação de mercado. As operações de fabricação serão a separação, redução, produção da liga e produção e magnetização do ímã e, no balanço de massa do ciclo produtivo (as 05 operações), 20 toneladas de óxidos TRs gerarão 7,5 toneladas de ímãs permanentes sem Dy ou 9,2 toneladas com Dy (CODEMIG, 2016a, b). As matérias-primas serão os óxidos de TRs extraídos da produção de nióbio pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) no município de Araxá (MG) e a distribuição e comercialização dos ímãs permanentes produzidos serão para os mercados de veículos híbridos e de energia eólica (CODEMIG, 2016a, b).

4.3. Estimativa da quantidade de ímãs permanentes de TRs em instalações eólicas

Há duas empresas identificadas que instalaram aerogeradores contendo ímãs permanentes de TRs, especificamente NdFeB, sendo que atualmente uma está falida e a outra continua operando dentro do território nacional (CODEMIG, 2016a). A companhia de capital argentino, IMPSA, instalou-se no Brasil em 2006, através da subsidiária *Wind Power Energy*, e parou suas atividades em 2014. A sua capacidade instalada aproximada nesse período foi de 390 MWh (DIÁRIO DO COMERCIO, 2014). A companhia de capital nacional, WEG, iniciou suas atividades no ramo eólico em 2012 e se mantém operativa atualmente. A sua capacidade instalada aproximada até o ano de 2017 foi de 700 MWh (FREITAS, 2017).

A capacidade instalada total dessas duas companhias é de 1.090 MWh. Esse valor representa atualmente 8,42% da capacidade instalada nacional de energia eólica. Portanto, esse valor é o fator (%) de utilização de ímãs permanentes de TRs nesse setor. Na Tabela 2 se indicam as quantidades estimadas, em massa, de elementos de TRs para o cenário eólico nacional.

Tabela 2. Quantidade em massa de elementos de TRs usados em ímãs permanentes dentro do cenário eólico nacional.

Capacidade Instalada (MWh)	Fator de Uso de IP (%)	Quantidade de IP (t)	Quantidade de Elementos de Liga (t)							
			Nd	Pr	Dy	Fe	B	Co	Al	Ni
			18,00%	4,60%	6,15%	66,88%	1,02%	2,84%	0,12%	0,39%
12.950	8,4%	981,4	176,6	45,1	60,4	656,3	10,0	27,9	1,2	3,8

Observa-se que as quantidades de TRs, consumidos até 2017 foram de 177, 45 e 60 toneladas de Nd, Pr e Dy, respectivamente. O uso de Fe foi de 656 toneladas, representando o principal elemento em massa, e os demais elementos de ligas totalizaram 43 toneladas, usados principalmente como revestimentos e anticorrosivos.

4.4. Demanda projetada

Nos próximos anos espera-se a participação e instalação de aerogeradores com ímãs permanentes de TRs da companhia de capital chinês, *Goldwind*, que assinou no primeiro semestre de 2018 um contrato para suprir inicialmente os 180 MWh não atendidos pela companhia IMPSA no estado da Bahia (COSTA, 2018). Sendo a companhia chinesa umas das líderes mundiais na instalação e operação de parques eólicos, presume-se um aumento das futuras instalações desse tipo de aerogeradores no país (COSTA, 2018).

A partir das capacidades e metas anuais de energia eólica publicadas até 2023 e conforme a metodologia explicada (aplicação da equação de regressão desde 2014), o Gráfico 4 mostra a capacidade instalada acumulada e a capacidade anual nova de energia eólica até 2030.

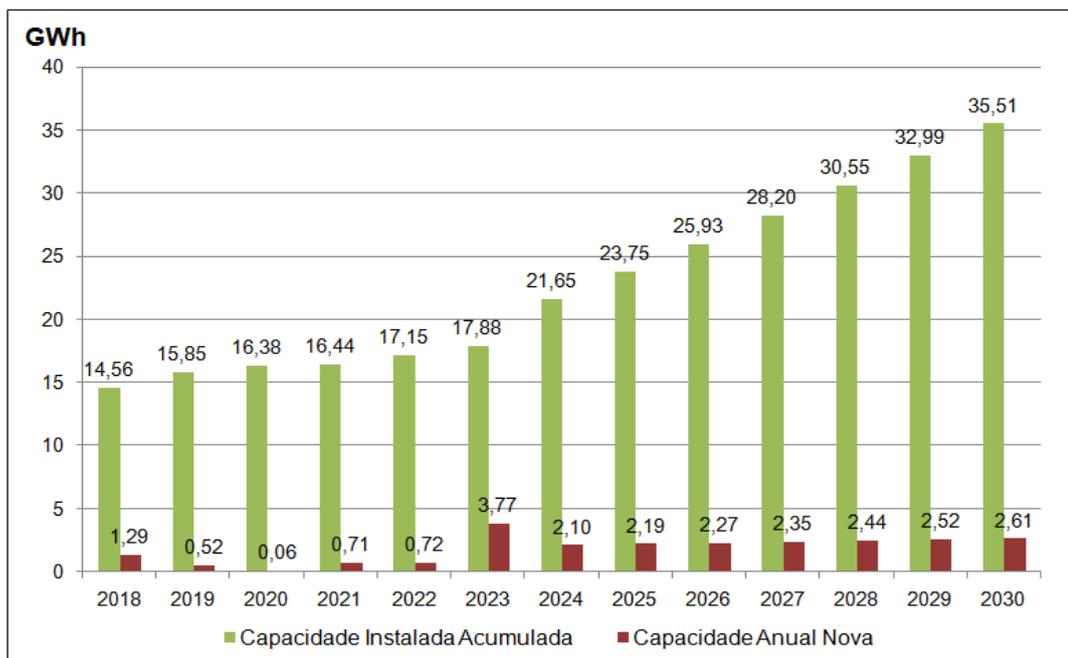


Gráfico 4. Capacidade instalada acumulada e capacidade anual nova de energia eólica.

A capacidade instalada acumulada de energia eólica seria 35,51 GWh no final de 2030. Conforme as informações e dados apresentados, a instalação dos aerogeradores com ímãs permanentes de TRs seria liderada pelas companhias WEG e *Goldwind*. Sob esse cenário crescente, assumiu-se um fator de utilização anual de ímãs permanentes de TRs de 8,42% até 2020, de 10% até 2025 e de 12% até o final de 2030. Dessa maneira, a demanda estimada de ímãs permanentes de TRs se apresenta no Gráfico 5.

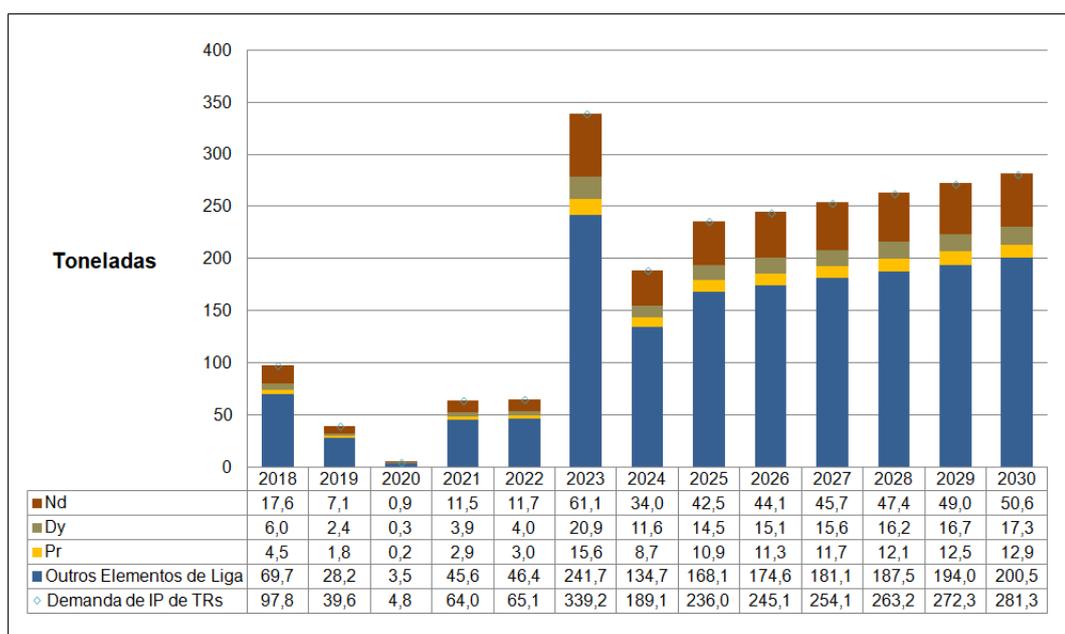


Gráfico 5. Demanda nacional de ímãs permanentes de TRs para geração de energia eólica.

Gráfico 6. Oferta de ímãs permanentes e necessidade de TRs para geração de energia eólica.

Desde 2024 até o final do período, a oferta será constante, visto que a produção atingiria a capacidade instalada. Nesse período e supondo que o Laboratório-Fábrica seja o único produtor e fornecedor, a oferta total seria 827,1 toneladas de ímãs permanentes contendo TRs. Esse valor necessitaria um aproximado de 1.798 toneladas de óxidos de TRs. Baseado nas proporções em massa indicadas na Tabela 1 e de acordo com as projeções da oferta estimadas, percebe-se que 148,9 (18%), 50,9 (6,2%) e 38,0 (4,6%) toneladas seriam de Nd, Dy e Pr, totalizando 237,8 toneladas. A quantidade de Fe seria de 553,2 toneladas (66,9%) e a quantidade dos outros elementos como B, Co, Al e Ni somariam um total de 36,1 toneladas (4,4%). A diferença dos valores dos óxidos e das composições em peso dos elementos de TRs se justifica pelos teores e eficiências do ciclo de fabricação dos ímãs permanentes.

4.6. Análise da demanda e oferta projetadas

Os dados projetados apresentam uma tendência crescente da demanda e oferta de ímãs permanentes e de elementos de TRs sob a assunção de que as condições atuais do mercado permanecerão constantes. O Gráfico 7 apresenta o comparativo da demanda e oferta de ímãs permanentes de TRs e o Gráfico 8 indica o comparativo da demanda e oferta de óxidos de TRs para a demanda e oferta projetadas de ímãs permanentes.

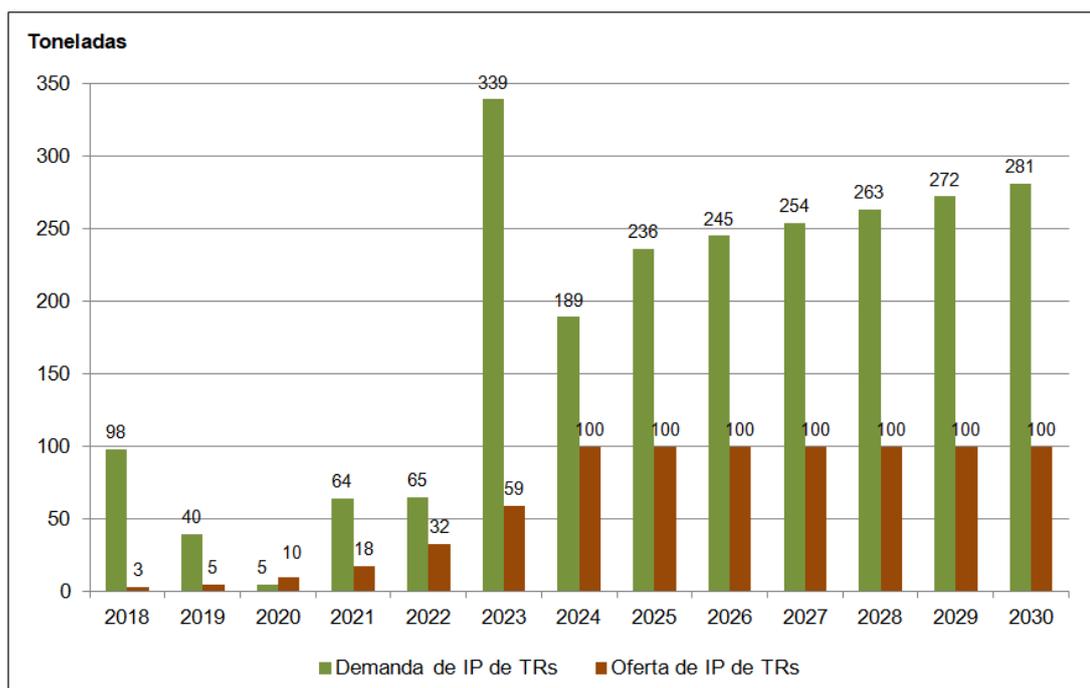


Gráfico 7. Demanda e oferta de ímãs permanentes de TRs para geração de energia eólica.

Observa-se que em 2020 poderia acontecer uma sobreprodução de ímãs permanentes, suprimindo a demanda. Percebe-se uma tendência crescente na escassez, superando a média de 117,3 toneladas por ano e tendo um pico de 280,2 toneladas em 2023. Durante o período, a demanda e a oferta seriam de 2.351,7 e 827,1 toneladas, tendo um déficit de abastecimento de 1.524,6 toneladas de ímãs permanentes de TRs.

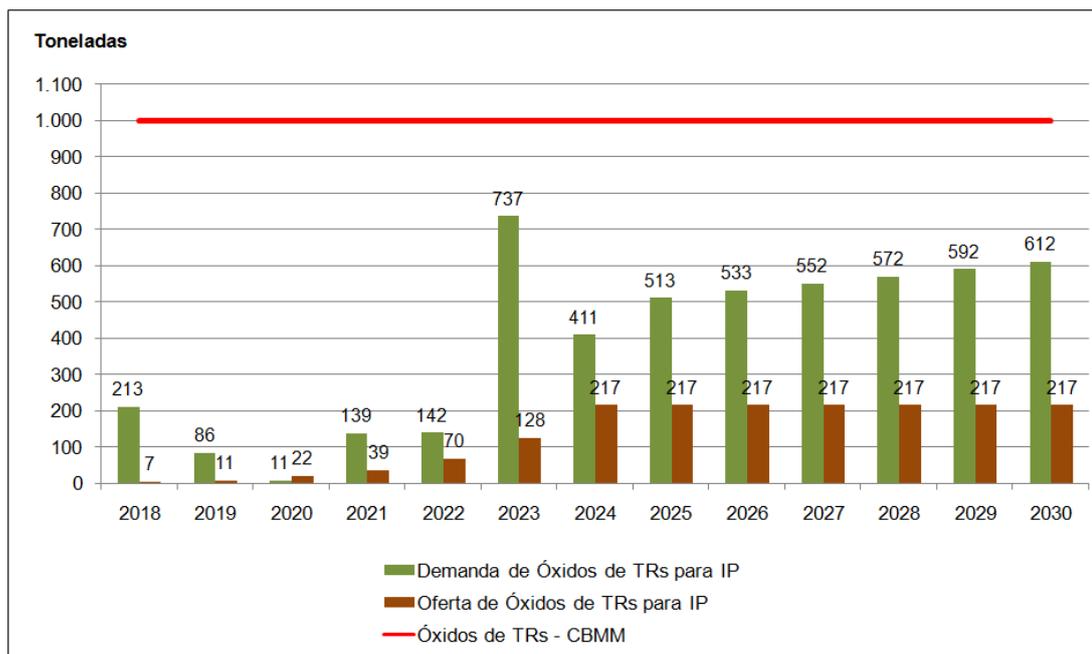


Gráfico 8. Demanda e oferta de óxidos de TRs para fabricação de ímãs permanentes.

Nota-se que a necessidade de óxidos de TRs para a demanda de ímãs permanentes seria maior do que a oferta. Da mesma forma, a escassez prevalece, sendo acima da média de 473 toneladas por ano. Nesse intervalo, a demanda e oferta de óxidos de TRs seriam de 5.112,4 e 1.798,0 toneladas, tendo um déficit de 3.314,3 toneladas.

Supõe-se que a escassez prevista continuaria sendo coberta pela importação de ímãs permanentes de TRs, principalmente da China, devido ao fato que esse país é o maior produtor de ligas (90% de participação no mercado global) e ímãs permanentes de TRs (75% de participação no mercado global para o caso do Nd) (CODEMIG, 2016a). No entanto, se a CBMM decidisse apostar por esse mercado, sua capacidade de produção de 1.000 toneladas/ano de óxidos de TRs permitiria produzir 460 toneladas/ano de ímãs permanentes, superando, portanto, a demanda.

4.7. Aspectos ambientais do uso de ímãs permanentes de TRs em instalações eólicas

Aprofundando na pesquisa, foi evidenciado que o desenvolvimento da energia eólica acaba sendo um paradoxo quando avaliamos todo seu ciclo de vida. A controvérsia radica, sobretudo, na utilização de recursos não renováveis e esgotáveis para a fabricação das diversas partes e componentes que permitam o funcionamento dos parques eólicos.

O desenvolvimento de uma cadeia em escala industrial de ímãs permanentes a partir de elementos de TRs para diversos segmentos produtivos de alta tecnologia, incluindo o setor da energia eólica, acarretaria impactos ambientais significativos, principalmente se consideramos as fases de extração e produção de óxidos de TRs. As operações para a produção de óxidos e fabricação de ímãs permanentes de TRs variam segundo as rotas tecnológicas e terminam sendo intensivas em consumo de água e energia (YANG et al., 2017; FIRDAUS et al., 2016).

As fases da extração e produção de óxidos de TRs são críticas, principalmente pelas substâncias radiativas e tóxicas geradas, dispersão de metais pesados, poluição do ar e da água, erosão, desmatamento e alterações da flora e fauna (JIN et al., 2016; FERNANDES; ALAMINO; ARAUJO, 2014; ZAIMES et al., 2014). Especificamente no contexto brasileiro, Lima et. al (2018) realizaram uma avaliação do ciclo de vida dessas duas fases, concluindo que as principais categorias de impacto ambiental são referentes às Mudanças Climáticas para

a Saúde Humana, Mudanças Climáticas para os Ecossistemas e à Depleção de Combustíveis Fósseis.

A fabricação de ímãs permanentes também apresenta riscos ambientais pela manipulação e utilização de alguns compostos tóxicos, como o caso do boro (B), pela geração de resíduos sólidos provenientes da fragmentação dos moldes necessários para a formação das ligas e pela emissão de particulados finos, gases, compostos orgânicos voláteis e efluentes como os lodos galvânicos resultantes dos processos de revestimento (CODEMIG, 2016a, b; FIRDAUS et al., 2016). Jin et al. (2016) executaram uma avaliação do ciclo de vida da fabricação desses produtos, mostrando que os principais impactos ambientais são o aquecimento global e acidificação relacionados com as mudanças climáticas e a saúde humana.

5. CONCLUSÕES

O estudo estimou as proporções e quantidades em massa do cenário atual e da demanda e oferta de ímãs permanentes e dos elementos de TRs. Há uma tendência crescente das capacidades instaladas de energia eólica até 2030, enfatizando um crescimento acumulativo da demanda e oferta de ímãs permanentes de TRs. O consumo atual de ímãs permanentes é de 981,4 toneladas, sendo que 282,1 toneladas correspondem a elementos de TRs (Nd, Pr e Dy). A demanda projetada é de 2.352 toneladas de ímãs permanentes, sendo 676,1 toneladas elementos de TRs e sendo necessárias 5.112,4 toneladas de óxidos de TRs para a produção desses ímãs. A oferta projetada é de 827,1 toneladas de ímãs, sendo 237,8 toneladas elementos de TRs e sendo necessárias 1.798 toneladas de óxidos de TRs. As estimativas realizadas evidenciam escassez de 1.524,6 e 3.314,3 toneladas de ímãs permanentes e de óxidos de TRs necessários para atender à demanda projetada.

O Brasil tem grande potencial para desenvolver a fabricação de ímãs permanentes de TRs, principalmente pelas reservas existentes e incentivos federais para o desenvolvimento de cadeias produtivas em território nacional vinculadas à geração de energia renovável. Nesse sentido, estudos de avaliação de ciclo de vida ligando aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais serão fundamentais para incentivar e promover um desenvolvimento da energia eólica, considerando as diversas cadeias produtivas envolvidas, como o caso dos ímãs permanentes de TRs.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao CNPq e CETEM, pela bolsa concedida e pelo apoio à pesquisa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEOLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica. Disponível: <<http://www.abeolica.org.br/>> Acesso: 22 / 03 / 2018.

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. Mapeamento da cadeia produtiva da indústria eólica no Brasil. 152 p., 2014.

BESSA, F. P. Estudo de Viabilidade Técnica e Económica de um Parque Eólico na Serra de Montedeiras. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energias. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, 2016, Portugal, 128 p.

CAMPOS, M. F. et al. Terras-Raras: Aplicações e Tendências do Mercado para os Próximos Anos. In: Seminário Brasileiro de Terras-Raras, 3, Rio de Janeiro (RJ), Brasil, 26 – 27 novembro, 2015. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCTIC, Rio de Janeiro, 2015.

CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. Viabilização de um Laboratório-Fábrica de Ímãs de Terras Raras no Brasil. Relatório Técnico Preliminar do Modelamento para Viabilização do Laboratório-Fábrica de Ligas e Ímãs. Entrega 2.1. Maio, 2016 a.

CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. Viabilização de um Laboratório-Fábrica de Ímãs de Terras Raras no Brasil. Relatório Técnico Preliminar da Análise da Situação Atual e Planejada para Insumos Críticos. Entrega 2.2. Maio, 2016 b.

CONSTANTINIDES, S. Market Outlook for Ferrite, Rare Earth and other Permanent Magnets. In: The International Forum on Magnetic Applications, Technologies & Materials, 2016, Jacksonville.

COSTA, L. Chesf, da Eletrobras, contrata chinesa Goldwind em tentativa de retomar parque eólico. Notícias, 19-04-2018. Reuters. Disponível em: <<https://br.reuters.com/article/businessNews/idBRKBN1HQ2TA-OBRBS>> Acesso: 16-05-2018.

DIÁRIO DO COMÉRCIO. IMPSA vai lançar oferta pública no Brasil ou EUA. Notícias, 21-05-2014. Disponível em: <<http://diariodocomercio.com.br/noticia.php?id=135473>> Acesso: 16-05-2018.

DNPM, B. D. N. D. P. M. Sumário Mineral. ISS 01012053. ed. Brasília: [s.n.], v. 1., 2014, 41 p.

FERNANDES, F. C.; ALAMINO, R. C.; ARAUJO, E. Recursos minerais e comunidade: impactos humanos, socioambientais e econômicos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2014. 392 p.

FIRDAUS, M. et al. Review of High-Temperature Recovery of Rare Earth (Nd/Dy) from Magnet Waste. Journal of Sustainable Metallurgy. Vol. 2, pp. 276–295, 2016.

FREITAS, M. WEG dá vida ao 1º ônibus elétrico movido a energia solar brasileiro. Notícias, 23-02-2017. Santa Catarina, Jornal OCP. Disponível em: <<https://ocp.news/geral/weg-da-vida-ao-primeiro-onibus-eletrico-movido-a-energia-solar-no-brasil>> Acesso: 16-05-2018.

GASCH, R.; TWELE, J. (Eds.). Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation. Chapter 3, Wind turbines - Design and Components. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

GWEC – Global Wind Energy Council. Global wind statistics 2017. GWEC, 2018, 4 p.

GWEC – Global Wind Energy Council. Global wind report 2015: annual market update. GWEC, 2016, 76 p.

IMHOLTE, D. D. et al. An assessment of U.S. rare earth availability for supporting U.S. wind energy growth targets. Energy Policy 113. pp. 294–305, 2018.

JIN, H. et al. Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling. Procedia CIRP 48, pp. 45 – 50, 2016.

KOLTUN P, THARUMARAJAH A. Life Cycle Impact of Rare Earth Elements. ISRN Metallurgy [internet] 2014; [citado 2016 Dec 2]; 2014: 10p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/907536>.

LIMA, F. M.; LOVÓN-CANCHUMANI, G. SAMPAIO, M.; ALVARADO-TARAZONA, L. M.B. Life cycle assessment of the production of rare earth oxides from a Brazilian ore. Procedia CIRP 69, pp. 481 – 486, 2018.

LIMA, F. M. S.; TARAZONA-ALVARADO, L. M.; LOVÓN-CANCHUMANI, G.; AI, S. A. R. Avaliação dos sistemas de abastecimento brasileiro de elementos de terras raras no sistema multi-oferta mundial. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 27, Belém (PA), 22 a 26 de Outubro, 2017.

ORTIZ, C. E. A.; JÚNIOR, E. M. V. Rare earth elements in the international economic scenario. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 67, n. 4, 2014. ISSN 0370-4467.

PINTO, J. S. et al. Dimensionamento das pás de aerogerador de eixo horizontal para instalação em uma propriedade rural. 2013.

RABE, W. et al. China's supply of critical raw materials: Risks for Europe's solar and wind industries? Energy Policy, 101, pp.692 – 699, 2017.

SILVA, L. C. Da et al. Implantação de parques eólico no Brasil. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 35, Fortaleza (CE), Brasil, 13 a 16 de outubro, 2015.

SUGIMOTO, S. Current status and recent topics of rare-earth permanent magnets. *Journal of Physics D: Applied Physics*. N°44, 11 pp., 2011.

WENG, Z. et al. Assessment of Global Rare Earth Supply & Wind Energy Growth: Opportunities and Challenges. In: *Green and Sustainable Chemistry Conference*, Berlin, Germany, 4-17th May, 2017.

YANG, Y. et al. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *J. Sustain. Metall*, 3, pp. 122 – 149, 2017.

ZAIMES, G. G.; HUBLER, B. J.; WANG, S.; KHANNA, V. Environmental Life Cycle Perspective on Rare Earth Oxide Production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(2); pp. 237 – 244, 2015.