



MODELAGEM E ANÁLISE DE CENÁRIOS DO MERCADO DE ÍMÃS DE TERRAS-RARAS NA ENERGIA EÓLICA NACIONAL

OCHARÁN, J.S.¹, LIMA, F.M.S.¹, ALVARADO, L.M.T.¹, LOVÓN, G.C.¹⁻², SAMPAIO, M.S.¹

¹Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Departamento de Processos Mineraiis. Cidade Universitária, Rio de Janeiro. e-mail: jsaraviao@poli.ufrj.br ; flima@cetem.gov.br

²Universidade Federal do Paraná - UFPR. Departamento de Engenharia de Produção. e-mail: giancarlo.lovon@ufpr.br

RESUMO

O crescimento da energia eólica (EE) vem contribuindo na diminuição dos gases de efeito estufa e na demanda de fontes renováveis de energia, sendo os aerogeradores contendo ímãs de terras-raras (TRs) as tecnologias que maximizam a eficiência energética. Dentro desse novo paradigma tecnológico e energético, o Brasil destaca-se pela crescente participação de EE e ser o segundo país com maiores reservas de TRs no cenário mundial. O objetivo do trabalho foi analisar cenários do mercado de ímãs de TRs dentro do setor eólico nacional e através de uma modelagem dinâmica projetiva de 12 anos. Os resultados indicam que o consumo atual dos ímãs seria de 981 toneladas, a demanda e oferta projetadas seriam de 1.815 e 824 toneladas respectivamente e uma escassez de 991 toneladas. Foi constatada que a produção nacional de 1.000 toneladas de óxidos de TRs poderia atender a demanda de esses ímãs. O mercado analisado apresenta-se interessante diante do crescimento das capacidades de energia eólica e frente às reservas existentes de TRs, embora, novas estratégias desde perspectivas técnicas, econômicas e ambientais devem ser desenvolvidas para determinar a viabilidade dessa cadeia produtiva.

PALAVRAS-CHAVE: Terras Raras, Energia Eólica, Modelagem Dinâmica.

ABSTRACT

The wind energy has been contributing to the greenhouse gas reductions and the demand of renewable energy sources with the wind turbines containing rare earth (RE) magnets as an important technology to maximize energy efficiency. Within this new technological and energetic paradigm, Brazil stands out due to the increasing share of wind energy and to be the second country with the largest reserves of RE in the world scenario. The aim was to analyze scenarios of the RE magnets market within the national wind sector and through a dynamic projective modeling of 12 years. The results indicate that the current consumption of the magnets would be 981 tons and the demand and supply projected until 2030 would be of 1,815 and 824 tons respectively, evidencing a scarcity of 991 tons. It was found that national production of 1,000 tons of RE oxides could meet the demand for these magnets. The market analyzed is interesting before the growth of wind energy capacity and the existing RE reserves, although new strategies from technical, economic and environmental perspectives must be developed to determine the viability of this productive chain.

KEYWORDS: Rare Earths, Wind Energy, Dynamic Modeling.

1. INTRODUÇÃO

As terras-raras (TRs) compreendem um grupo de 17 elementos químicos e sua demanda esta sendo promovida devido às suas aplicações em diversos produtos de alta tecnologia (IMHOLTE et al., 2018; YANG et al., 2017). Especificamente, os ímãs contendo TRs como Neodímio (Nd), Praseodímio (Pr), Disprósio (Dy) e Samário (Sm) são usados primordialmente em componentes elétricos e eletrônicos, motores elétricos de veículos híbridos, geradores elétricos, discos rígidos de computadores e nos modernos aerogeradores para produção elétrica (IMHOLTE et al., 2018; OCHARÁN et al., 2018; YANG et al., 2017).

As maiores reservas de TRs estão na China com cerca de 40% (55.000×10^3 t), seguido pelo Brasil com 16% (22.000×10^3 t) (DNPM, 2014). Esse país asiático também é o maior produtor de óxidos, metais, ligas e ímãs de TRs devido a sua consolidação como maior explorador das suas reservas (YANG et al., 2017; CODEMIG, 2016a). Aproximadamente 90% das ligas metálicas, 75% dos ímãs a base de Nd e 60% dos ímãs de Sm, comercializados no mundo, são fabricados nesse país (CODEMIG, 2016a). O Brasil não fabrica ligas para ímãs de TRs, sendo que esses ímãs existentes no mercado nacional foram importados por empresas comercializadoras e distribuidoras (CODEMIG, 2016a, 2016b).

Os principais ímãs existentes no mercado são de TRs, a base de Ferro (Fe) ou de ferrite e da mistura de alumínio (Al), níquel (Ni) e cobalto (Co). Dessa variedade, os ímãs de TRs apresentam melhores propriedades magnéticas, têm um menor volume e são principalmente usados na geração de energia (OCHARÁN et al., 2018; YANG et al., 2017; CODEMIG, 2016a; JIN et al., 2016). Os aerogeradores contendo esses ímãs apresentam maior 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). As quantidades necessárias desses ímãs variam dependendo a potência energética. Um aerogerador com potência instalada de 03 MWh precisa aproximadamente 2.700 kg de ímãs na mistura de Nd, Fe e Boro (B), sendo que 01 tonelada corresponderia a Nd (CAMPOS, 2015).

Nesse preâmbulo, o presente estudo segue a metodologia, cálculos e projeções realizadas por Ocharán et al. (2018), mas agora através de um modelo para compreender e interpretar a dinâmica deste mercado específico ao longo do tempo. Portanto, o objetivo do trabalho foi determinar os cenários do mercado de ímãs de TRs dentro do setor nacional da energia eólica (EE) baseado em uma modelagem dinâmica para os próximos 12 anos. Enquadrou-se o estudo no contexto do fornecimento e distribuição de energia elétrica dentro do sistema interligado nacional e desconsiderando instalações eólicas de pequeno porte (até 50 KWh).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Setor nacional de energia eólica

A geração de EE equivale aproximadamente o 9% da matriz elétrica brasileira e sua capacidade instalada é de 14,4 GWh (ABEEOLICA, 2018). Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEOLICA, 2018) espera-se um aumento da capacidade instalada até 18,8 GWh até o final de 2024, conforme apresentado na Figura 1.

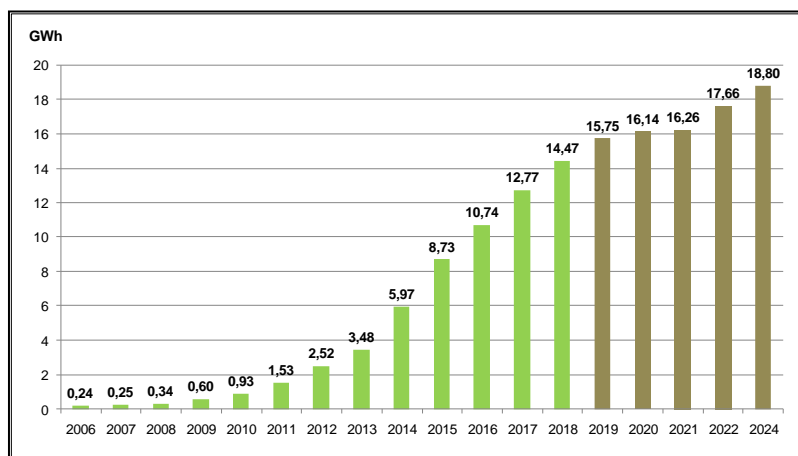


Figura 1. Evolução da capacidade instalada de energia eólica.

Fonte: ABEEOLICA (2018).

O setor eólico nacional exige fornecedores altamente especializados. O aerogerador representa 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 de diversos componentes e faltam fabricantes para *itens* como os sistemas de controle, sensores, anemômetros, caixas multiplicadoras de velocidade (caixa de engrenagem), rolamentos (principal e de giro) e ímãs permanentes (ABDI, 2014).

2.2 Cenário nacional da fabricação de ímãs de TRs

A fabricação dos ímãs depende da produção de óxidos e/ou metais de TRs, Fe e B. Atualmente não há fabricação desses ímãs para instalações eólicas em escala industrial nem há fornecedores nacionais para a maioria das matérias-primas e insumos necessários (OCHARÁN et al., 2018; CODEMIG, 2016b). Há um empreendimento da Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG) para a operação de um Laboratório-Fábrica de Ímãs de NdFeB, tendo uma capacidade instalada de 100 toneladas/ano. As operações serão a separação, redução, produção da liga e produção e magnetização do ímã. Com 20 toneladas de óxidos de TRs se produzirão 7,5 toneladas de ímãs sem Dy ou 9,2 toneladas com Dy. Segundo os documentos revisados, a produção no final de 2018 deveu ser de 03 toneladas e para o final dos anos 2019 e 2020 deverá ser de 05 e 10 toneladas (CODEMIG, 2016a, 2016b). A comercialização desses ímãs será para os setores de veículos híbridos e energia eólica (CODEMIG, 2016a, 2016b). As matérias-primas serão os óxidos de TRs a partir da produção do nióbio realizada pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração no município de Araxá (MG) que está produzindo 1.000 toneladas desses óxidos (CODEMIG, 2016a, 2016b).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Determinação de cenários do mercado

O primeiro cenário foi o consumo estimado de ímãs de TRs no setor da EE até o final de 2018. Segundo as empresas que instalaram aerogeradores com esse tipo de ímãs,

determinou-se a participação do mercado sendo a somatória das capacidades instaladas entre a capacidade instalada atual de EE. Posteriormente, segundo os dados de Campos (2015) a respeito da necessidade de 2.700 kg de ímãs de TRs para geração de 03 MWh de EE, conseguiu-se estimar as quantidades consumidas. Finalmente, por meio das proporções indicadas na Tabela 1, calcularam-se as proporções em massa de TRs e dos elementos de liga.

Tabela 1. Proporções em massa da composição química de TRs em ímãs.

Elementos de Liga	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).

O segundo cenário foi a demanda projetada de ímãs de TRs. Definiu-se uma avaliação de 12 anos, até 2030. A continuação avaliou-se a tendência das capacidades instaladas acumuladas de EE na conjuntura nacional conforme a Figura 1. Calcularam-se e analisaram-se curvas de regressão e coeficientes de determinação para definir a equação mais adequada para as projeções. A equação polinomial de segundo grau $y = 0,028 x^2 + 0,754 x - 2,322$ com coeficiente de determinação de 0,958 foram os mais precisos. Posteriormente, aplicou-se a equação polinomial para obter os valores das capacidades instaladas acumuladas até 2030. Em seguida calcularam-se as capacidades instaladas para cada ano projetado, sendo a diferença de capacidades instaladas acumuladas do ano analisado menos a do ano anterior. Com essa base determinaram-se a demanda projetada de ímãs de TRs e a necessidade de óxidos de terras raras (OTRs) para atender essa demanda.

O terceiro cenário foi a oferta projetada de ímãs de TRs. Igualmente considerou-se um período de avaliação de 12 anos. Baseado no piloto de fabricação de ímãs, determinou-se que a produção máxima (capacidade instalada) desse empreendimento seria de 100 toneladas/ano. Segundo os prognósticos encontrados na documentação revisada sobre essa produção, avaliaram-se curvas de regressão e coeficientes de determinação, sendo que a equação exponencial $y = 1,594 E^{0,602X}$ com coeficiente de determinação de 0,992 foi a mais adequada. Os dados foram projetados até atingir a produção máxima de ímãs permanentes. Dessa forma, calculou-se a oferta projetada e estimaram-se as necessidades de OTRs para atender essa produção piloto.

Nesses dois cenários assumiu-se que as condições atuais do mercado internacional sobre comercialização de TRs e ímãs contendo esses elementos seriam constantes no período de avaliação.

3.2 Modelagem dinâmica

Através do programa *i-Think*, da *ISEE System*, executou-se a modelagem e simulação das informações e dados coletados para análise dos cenários. Nesse *software*, qualquer sistema pode conter até quatro elementos básicos: a) estoques (representam o estado de um recurso); b) fluxos de entrada e saída (atividades que produzem crescimento ou redução dos estoques); c) variáveis, conversores ou constantes (processam informações a respeito dos estoques e fluxos); e, d) conectores (links que conectam estoques, fluxos e conversores). (KIFLE et al., 2013; SANTOS; FERNANDES, 2012). Desse modo, definiram-se seis sistemas para o mercado de ímãs de TRs no setor da EE do país, conforme a Figura 2.

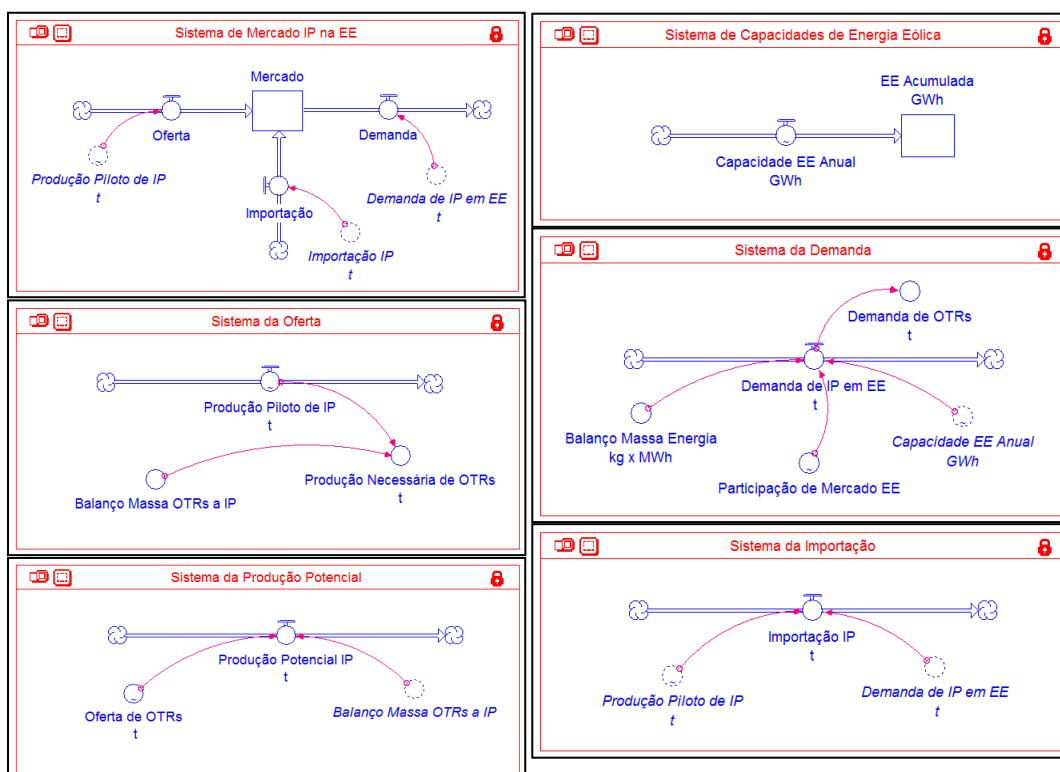


Figura 2. Modelo em *i-Think* dos seis sistemas relacionados ao mercado de ímãs de TRs.

O sistema de Mercado de Ímãs na EE está composto pelo mercado em si, quantidades em massa, representado por um estoque, que por sua vez é resultado da diferença dos fluxos da oferta e importações menos a demanda dos ímãs. O sistema de Capacidades de EE está conformado pelo estoque de EE Acumulada que é alimentada pelo fluxo da capacidade de EE por ano, projetada até 2030, e conforme a aplicação da equação polinomial de segundo grau. O sistema da Demanda está dada pelo fluxo da demanda em si de ímãs dentro do setor da EE que está em função do balanço de massa - energia (2.700 kg de ímãs podem gerar 03 MWh de EE), da participação do mercado na EE e da capacidade de EE anual por cada ano projetado. Além disso, a demanda de ímãs permite o cálculo da demanda de OTRs. O sistema da Oferta seria o fluxo da produção do empreendimento piloto de ímãs, projetada até 2030, e segundo a aplicação da equação exponencial até atingir a capacidade de produção máxima. Essa oferta, por sua vez, determina a produção necessária de OTRs baseado no balanço de massa na relação de 20 toneladas de OTRs geram 9,2 toneladas de ímãs. Também foi considerado o sistema de Produção Potencial que é fluxo estimado de produção de ímãs em função da oferta de OTRs e do balanço de massa. Finalmente, o sistema de Importação é o fluxo das importações de ímãs em função da produção piloto e da demanda de ímãs no setor de EE.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A capacidade instalada total das duas companhias que instalaram aerogeradores contendo ímãs de TRs é de 1.090 MWh, representando 7,6% da capacidade instalada total (14,4 GWh) de EE (ABEEOLICA, 2018). Essa proporção, por motivos de cálculos, é a participação do mercado nesse setor energético. As quantidades consumidas estimadas desses ímãs e as proporções em massa de TRs são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Quantidade em massa de ímãs de TRs consumidos no cenário eólico nacional, até final de 2018.

Capacidade Instalada (MWh)	Participação (%)	Quantidade de IP (t)	Quantidade de Elementos de Liga (t)							
			Nd	Pr	Dy	Fe	B	Co	Al	Ni
			18,0%	4,6%	6,1%	66,8%	1,0%	2,8%	0,1%	0,3%
14.300	7,6	980,7	176,5	45,1	60,3	655,9	10,0	27,9	1,2	3,8

Observa-se que o consumo de ímãs seria de 980,7 toneladas e as quantidades em massa de Nd, Pr e Dy seriam de 176,5 , 45,1 e 60,3 toneladas. O uso de Fe seria de 655,9 toneladas e os demais elementos de liga totalizaram 42,9 toneladas.

A Figura 3 apresenta o cenário projetado das capacidades de EE no contexto nacional. Nessa projeção, a Capacidade Instalada Acumulada de EE seria 31,90 GWh no final de 2030 e as Capacidades de EE Anuais variariam entre 0,11 a 3,32 GWh.

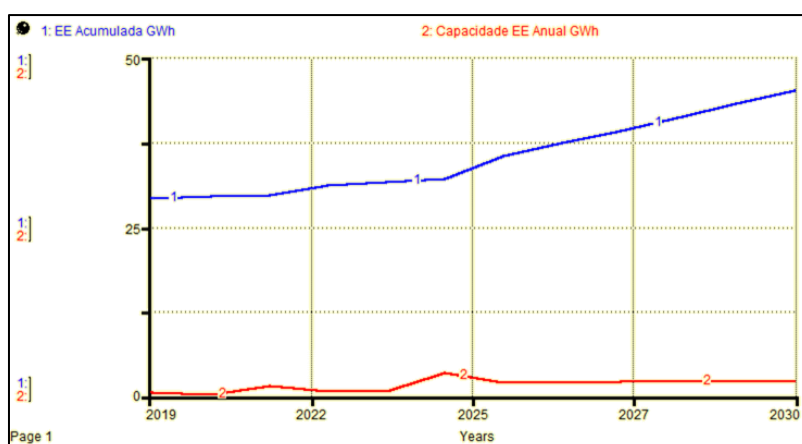


Figura 3. Capacidades de energia eólica no contexto nacional.

Para o cálculo da demanda de ímãs considerou-se a participação do mercado gradativa sendo de 7,62% até 2020, 10% até 2025 e 12% até final de 2030. No caso do cálculo da oferta de ímãs foi considerada que toda a produção do empreendimento piloto seria destinada ao setor da EE. A Figura 4 evidencia a evolução do mercado até final de 2030.

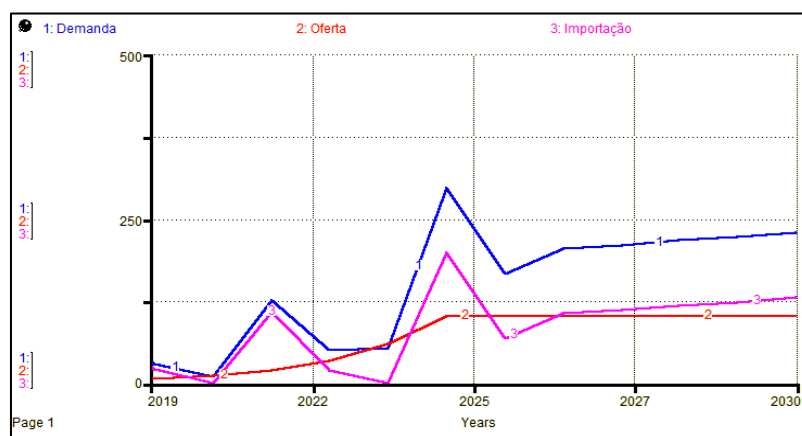


Figura 4. Evolução do mercado de ímãs de terras-raras no setor nacional de energia eólica.

Observa-se que em 2020 e 2023 a oferta atenderia a demanda não sendo necessário de importações e tendo um excedente de produção aproximado de 02 e 08 toneladas, respectivamente. No entanto, considerando o período avaliado, percebe-se uma tendência crescente na escassez, tendo uma média de 82,6 toneladas por ano e um pico de 198,5 toneladas no ano 2024. Até 2030, a demanda e a oferta seriam de 1.815,1 e 824,1 toneladas com uma escassez de 991 toneladas de ímãs de TRs.

Conforme as projeções da demanda e da oferta, determinaram-se as necessidades de OTRs para o mercado desses ímãs no setor energético avaliado. A Figura 5 mostra a evolução dessas quantidades até final de 2030.

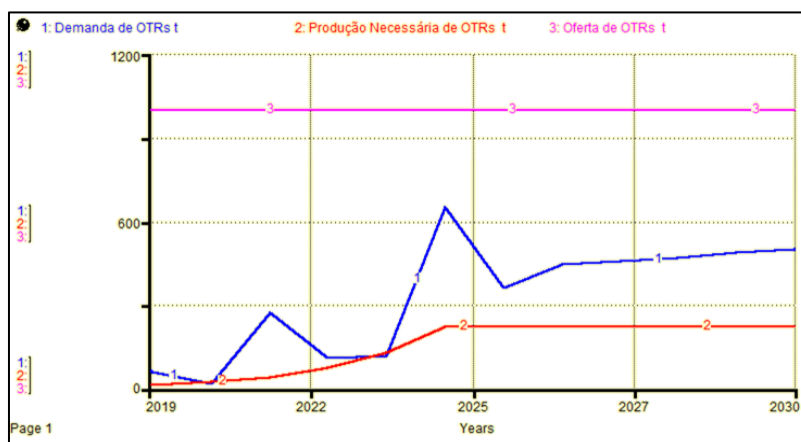


Figura 5. Evolução do mercado de óxidos de terras-raras no setor nacional de energia eólica.

Nota-se que a demanda de OTRs seria maior do que a produção desses óxidos para atender oferta. Da mesma forma, a escassez durante o período prevaleceria, sendo acima da média de 180 toneladas por ano. Nesse intervalo, a demanda e a produção necessária de OTRs seriam de 3.945,9 e 1.791,5 toneladas, tendo uma escassez de 2.154,4 toneladas.

Como existe produção nacional de OTRs de 1.000 toneladas, a Figura 6 evidencia a produção potencial de ímãs de TRs nesse mercado até final de 2030.

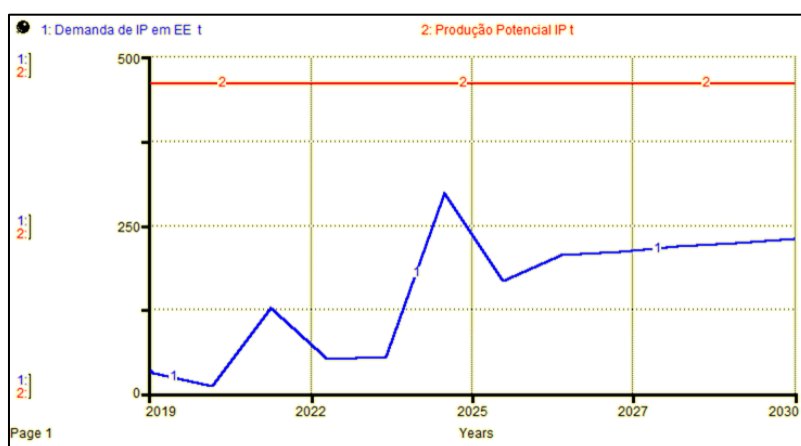


Figura 6. Demanda e produção potencial de ímãs de terras-raras no setor nacional de energia eólica.

Observa-se que a produção de OTRs permitiria uma produção potencial de aproximadamente 460 toneladas por ano de ímãs de TRs, gerando um estimado de 5.520 toneladas até final de 2030 e sendo, portanto, superior à demanda desses ímãs no setor energético analisado.

5. CONCLUSÕES

Há uma tendência crescente das capacidades instaladas de energia eólica, enfatizando um crescimento acumulativo da demanda e oferta de ímãs de TRs. O consumo atual desses ímãs seria de 981 toneladas, sendo que 282 toneladas corresponderiam a TRs. A demanda projetada seria de 1.815 toneladas de ímãs, sendo necessárias 3.946 toneladas de

OTRs. A oferta projetada seria de 824 toneladas de ímãs, necessitando 1.792 toneladas de OTRs. As estimativas realizadas evidenciam escassezes de 991 e 2.154 toneladas de ímãs e de OTRs no período analisado, sendo supridas pelas importações. A produção de OTRs permitiria a fabricação de 5.520 toneladas desses ímãs abastecendo, assim, o mercado da energia eólica. Deste modo, recomendam-se ajustes futuros dos dados apresentados e estudos complementares de âmbito técnico, ambiental, econômico e político a respeito da cadeia produtiva de TRs no contexto nacional de energia eólica a fim de determinar sua viabilidade.

6. REFERÊNCIAS

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

ABEOLICA – Associação Brasileira de Energia Eólica. Dados mensais, Novembro 2018.

Bessa FP. Estudo de viabilidade técnica e econômica de um parque eólico na Serra de Montedeiras. [Dissertação de Mestrado]. Faculdade de Engenharia de Energias, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, Portugal, 128 p., 2016.

Campos, MF. et al. Terras-Raras: aplicações e tendências do mercado para os próximos anos. In: Seminário Brasileiro de Terras-Raras, 3, 2015, 26 a 27 Nov. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Rio de Janeiro, Brasil.

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, Jan 21 – 22. Webcom Communications Corporation, Jacksonville, United States of America.

kifle D, Sverdrup H, Koca D, Wibetoe G. A Simple Assessment of the Global Long Term Supply of the Rare Earth Elements by Using a System Dynamics Model. *Environment and Natural Resources Research*; 2013; 3; 77-91.

Imholte D, Nguyen RT, Vedantam A, Brown M, Iyer A, Smith BJ, et al. An assessment of U.S. rare earth availability for supporting U.S. wind energy growth targets. *Energy Policy*; 2018; 113; 294–305.

Jin H, Afiuny P, McIntyre T, Yih Y, Sutherland J. Comparative life cycle assessment of NdFeB magnets: virgin production versus magnet-to-magnet recycling. *Procedia CIRP*; 2016; 48; 45–50.

Ocharán JLS, Lovón-Canchumani G, Lima FMS, Alvarado LM, Sampaio MS. Análise do mercado e aspectos ambientais dos ímãs de terras raras na energia eólica no Brasil. In: Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, 20, 2018, 03 a 05 Dez. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo (FEA/USP), São Paulo, Brasil.

Rabe W, Kostka G, Stegen KS. China's supply of critical raw materials: Risks for Europe's solar and wind industries? *Energy Policy*; 2017; 101; 692–699.

Santos M Dos, Fernandes A. Modelo dinâmico de sistemas para avaliar emissões atmosféricas na indústria de petróleo e gás. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference, 16, 2012, 17 a 20 set. Rio de Janeiro, Brasil.

Yang Y, Walton A, Sheridan R, Guth K, Gauß R, Gutfleisch O, et al. REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: a critical review. *J. Sustain. Metall.*; 2017; 3; 122–149.