

# **UMA BREVE REVISÃO SOBRE ENERGIA EÓLICA, SUSTENTABILIDADE, RECICLAGEM E SUAS RELAÇÕES.**

## **A BRIEF REVIEW ON WIND ENERGY, SUSTAINABILITY, RECYCLING AND ITS RELATIONS.**

**Renan Rodrigues Manhães**

Aluno de Graduação de Engenharia Química  
7º período, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ  
Período PIBIC ou PIBITI/CETEM: Setembro de 2021 a julho de 2022

**Francisco Mariano da Rocha de Souza Lima**

Orientador, Engenharia Mineral, D. Sc  
flima@cetem.gov.br

**Ligia Marcela Tarazona Alvarado**

Coorientador, Engenharia Control Electronico e instrumentação, M.Sc.  
lmtalvarado@poli.ufrj.br

### **RESUMO**

O agravamento do efeito estufa e, conseqüentemente, do aquecimento global são as forças motrizes para o incremento ambiental na produção energética. No intuito de produzir uma energia mais sustentável, a energia eólica se mostrou uma opção ambientalmente satisfatória e aumentou significativamente a sua parcela de participação nas matrizes do mundo todo. Nesse trabalho, empregou-se o método Methodi Ordinatio como ferramenta para revisar sistematicamente a literatura sobre três tópicos: Reciclagem de ímãs permanentes, energia eólica e sustentabilidade. Com isso, obtivemos cerca de 10 artigos e pudemos concluir que altos índices de reciclagem podem incrementar satisfatoriamente a sustentabilidade da geração de energia com turbinas DDPMSG. No entanto, esses índices >90%, apesar de abundantes na literatura, não são praticados por conta da dispersão dos ímãs em fim de ciclo de vida, dos custos logísticos, das perdas materiais e pela dificuldade de adaptação dos métodos de reciclagem ao cenário mundial de distribuição das plantas produtivas e dos centros de concentração de ímãs NdFeB.

**Palavras-chave:** Reciclagem, ímãs permanentes, energia eólica.

### **ABSTRACT**

The Greenhouse Effect's aggravation and the increase of global temperature are the main driving forces of energy production environmental improvement. Aiming to produce a more sustainable electric energy, an efficient way to avoid carbon emissions was found in Wind Energy, which steadily increased its share in world's energy matrix. In this paper, we employed an ordination methodology (PAGANI, KOVALESKI, RESENDE;2015) to guide literature research of three subjects: sustainability, wind energy and recycling of rare earth permanent magnets. The importance of recycling in the energy production based in DDPMSG turbines was ratified and the low level of its practice around the globe was linked to material dispersion, logistic costs and issues on integrate the recycling methods on world's dispersion of production sites.

**Keywords:** Recycling, permanent magnets, wind energy.

## 1. INTRODUÇÃO

O agrave das questões climáticas e, sobretudo, do aquecimento global, pôs em voga a busca por práticas mais sustentáveis e pela redução das emissões de carbono, tanto na indústria quanto no setor energético. Esse movimento se materializou, no setor energético, na busca por fontes de energia alternativas que, além de menos carbono-emissoras, sejam compatíveis com a economia circular intrínseca à sustentabilidade almejada. Dentre as fontes alternativas às fósseis, a matriz eólica se mostrou como uma possível protagonista na transição energética, pois, além de ser instantaneamente renovável, a produção eólica de energia possui uma pegada de carbono virtualmente nula em sua etapa de operação e significativamente menor do que as demais renováveis ao longo de seu ciclo de vida. (BASOSI, et. al, 2020).

A produção de energia eólica, além das baixas emissões, possui outro atributo positivo que justifica seu uso é a versatilidade. Isso se deve ao fato de que os arranjos de turbina são variados e podem ser adaptado ao regime e local de instalação da turbina. Em geral, porém, as turbinas do tipo com Gerador síncrono de acionamento direto, ou *Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Generator* (DDPMSG), em inglês, são preferíveis em função de seu menor índice de falha e de demanda de manutenção (MARX, SCHREIBER & ZAP, 2018). Esse melhor desempenho operacional se deve ao fato de que as turbinas DDPMSG, são classificadas como *Gearless*, ou seja, funcionam com as lâminas integradas ao gerador através de uma única estrutura e por isso estão menos sujeitas aos desgastes provocados pela vibração causada pelo vento, sobretudo, em instalações *offshore* (MOGHADAM, 2020). No entanto, esse tipo de turbina possui ímãs permanentes (NdFeB) compostos de elementos de terras raras, cuja produção, e conversão em ímã, está atrelada a grandes impactos ambientais (SCHREIBER, et al. 2017). Além disso, a distribuição geospacial destes elementos é altamente desigual e a sua produção ocorre majoritariamente na China, o que põe em risco a estabilidade de preços e a disponibilidade de estoque destes componentes imprescindíveis à expansão das turbinas DDPMSG enquanto opção renovável de produção energética (VALERO & VALERO, 2019).

Tendo em vista que ímãs de terras raras empregados na energia eólica estão atrelados à mineração altamente poluidora praticada na China e que há, de fato, escassez geopolítica deste insumo fundamental a expansão da energia eólica, a exploração de alternativas à produção chinesa, tais como a reciclagem e a substituição dos ímãs NdFeB, é necessária (ADIBI, 2018). Para isso, a concatenação da avaliação do ciclo de vida da turbina, dos ímãs permanentes e da sustentabilidade ambiental e prática da produção de energia é a ferramenta ideal para a análise integral desta problemática e para avaliação do potencial brasileiro enquanto plataforma recicladora. A literatura, porém, apesar de abundante em análises isoladas destes parâmetros, carece de ensaios que integrem todos estes temas e é esta a motivação desta pesquisa.

## 2. OBJETIVOS

Esta pesquisa busca avaliar conjuntamente fatores chave, levantados na literatura, para avaliação da sustentabilidade da geração de energia com turbinas eólicas do tipo DDPMSG e, assim, apontar a sua interdependência.

## 3. METODOLOGIA

O levantamento da literatura, que subsidiou a confecção desta pesquisa foi realizado através do portal de Periódicos CAPES através da metodologia *Methodi Ordinatio* (PAGANI, KOVALESKI, RESENDE;2015). Nessa metodologia, a busca é seguida pela triagem e pela atribuição, através da Equação 1, de um índice de relevância que leva em conta o ano de publicação, o fator de impacto do seu veículo de publicação e o número de citações.

$$InOrdinatio = \frac{Fator\ de\ Impacto}{1000} + \alpha (Ano\ de\ pesquisa - Ano\ de\ publicação) + \sum Citações \quad (1)$$

O valor de ponderação temporal,  $\alpha$ , empregado foi igual a 7 e, com isso, foram obtidos 48 artigos com InOrdinatio variando de 434,24 a 70,782. Esses artigos foram classificados em 3 principais temas: sustentabilidade, Avaliação de Ciclo de Vida de turbinas eólicas DDPMSG e reciclagem, lidos sistematicamente e o resultado será discutido no item 4.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Sustentabilidade e Avaliação do Ciclo de Vida

No que se refere aos impactos ambientais, a literatura corrobora a tese de que a opção por fontes secundárias de terras raras, em detrimento da exploração primária, sobretudo, na China, gera uma redução dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da turbina. Em MARX, SCHREIBER & ZAPP, 2018, realizou-se uma avaliação de ciclo de vida comparativa de três turbinas de mesma potência: duas turbinas *gearless* (DDPMSG e DDSG) e uma com caixa de engrenagem (DFIG), sendo que a turbina DDSG não contém ímãs permanentes. Obteve-se que a turbina DDPMSG, em um cenário com reaproveitamento integral dos elementos de terras raras, reduziu em 4 vezes o seu impacto total normalizado, passando a ser a com menores emissões dentre as três opções.

Em outra avaliação de ciclo de vida, LOBERAS-VALLS et. al, 2015, obteve resultados semelhantes, em que a reciclagem pode reduzir até 92% dos impactos ao longo, de modo que a reciclagem, não só dos elementos de terras raras, se mostrou um fator crucial para o incremento ambiental da turbina.

### 4.2. Reciclagem e Turbinas Eólicas DDPMSG

A extração primária dos metais de terras raras se dá de maneira variável de acordo com a matriz mineral, mas, de maneira geral, consiste na extração, tratamento físico para homogeneização da granulometria e subsequente tratamento químico para produção de óxidos (SCHREIBER, et al. 2018).

Em se tratando de reciclagem destes elementos de terras raras, sobretudo do Nd e Dy, foi observado uma grande variedade de rotas que, em certo grau, são predominantemente hidrometalúrgicas, empregam solventes para a extração, ou ambas as técnicas conjugadas.

No ensaio de AMATO, et al. 2019, empreendeu-se uma análise comparativa dos impactos ambientais e econômicos da obtenção de metais de terras raras a partir de fontes secundárias (Ímãs permanentes de Hard Drive Disks e de turbinas eólicas) e de fontes primárias. Nessa análise, pode-se observar uma produção com impactos ambientais, em termos de  $CO_2/Kg$  metal, reduzidos em até 6 vezes. Ademais, os autores deste ensaio levaram a cabo, também, uma análise econômica que revelou uma redução nos custos produtivos, sendo este resultado fortemente condicionado ao preço de compra da matéria prima a ser reciclada.

Uma abordagem diferenciada da hidrometalurgia clássica é observada em CLIVE & CHEONG, 2021, cujo ensaio lançou mão de ácido acético ( $CH_3COOH$ ), como agente da lixiviação direta na recuperação de Nd e Dy. Isso mostrou uma alternativa menos poluente aos ácidos inorgânicos amplamente empregados na hidrometalurgia e que, além disso, apresente eficiência similares >99%. Em ensaio análogo, YOON, et al., 2015, empregou o ácido acético para lixiviamento de sucata de ímãs permanentes NdFeB e obteve eficiências semelhantes.

A reciclagem dos elementos de terras raras, seja por hidrometalurgia ou por adsorção, geralmente, resulta em óxidos, sulfatos, fosfatos, fluoretos ou em metais de terras raras. Isso, logicamente, é seguido por processos para a produção do ímã permanente, tais como a eletrólise, no caso dos óxidos, a fundição, a magnetização e anelamento, que possuem grande fardo ambiental. No intuito de encurtar o trajeto produtivo e aproveitar a energia incorporada ao ímã em final de vida, HONGYUE, et al., 2018, avaliou uma rota ímã-ímã de reciclagem. Em seu ensaio, o autor deu cabo da reciclagem de ímãs permanentes de Hard Disk Drives para produção de ímãs permanentes empregados em carros elétricos e obteve, além de uma redução

no uso de matéria prima na casa dos 90%, um incremento qualitativo nas propriedades magnéticas do material. No entanto, apesar de estabelecer, em seu ensaio, uma perda material de 30 a 40%, em estudo mais recente o próprio autor avalia a não fidedignidade deste valor, que oscila em outros ensaios da literatura (Hongyue, et al., 2020) Em termos de fluxo de material, o incremento da porcentagem de reciclagem dos elementos de terras raras, seja pré-consumo ou pós consumo, certamente é uma maneira de aumentar a sustentabilidade da geração de energia eólica e garantir menor dependência de importações, sobretudo, da China.

Em SEKINE, DAIGO & GOTO, 2016, o autor empreendeu um estudo de caso para avaliar o potencial de influência da implementação da reciclagem de ímãs de Neodímio e Dy, contidos em carros elétricos e compressores, na autossuficiência do Japão quanto a estes elementos. Os autores empregaram uma análise de fluxo de materiais para avaliar a viabilidade econômica e prática desta implementação e obtiveram um potencial de suprimento de 12 a 40% da demanda interna destes elementos de terras raras. Esse ensaio, porém, também identificou que os custos logísticos são relevantes e inviabilizam a reciclagem quando existem longas distancias entre pontos de coleta e recuperação. Esse parâmetro não inviabilizou a implementação no Japão, mas, dadas as dimensões continentais do Brasil, pode ser um grande impeditivo no Scale Up para o Brasil e para o mundo. Em BUSCH, DAWSON & ROELICH, 2017, foi realizada uma análise sistemática da viabilidade da economia circular dos materiais necessários aos carros elétricos e turbinas eólicas DDPMSG mediante a reciclagem e reaproveitamento de recursos em uma pequena ilha do Reino Unido. Apesar de os autores estimarem índices de recuperação menores aos reportados na literatura, a estimativa de 90% de recuperação está longe dos 1% praticados atualmente para os ímãs permanentes de terras raras, de modo que a conclusão fica condicionada a estes altíssimos índices. Não obstante, obteve-se a viabilidade da implementação da energia eólica, mas estes resultados estão condicionados as particularidades da ilha, como, por exemplo, ausência de indústrias, que indicam que o Scale Up deste cenário não produziria o mesmo resultado positivo.

## **5. CONCLUSÕES**

Nesta breve pesquisa, podemos concatenar ensaios isolados sobre temas que, na verdade, são interdependentes. Se encontraram 10 artigos os quais foram classificados em temas de relevância: sustentabilidade e avaliação do ciclo de vida, turbinas DDPMSG e reciclagem. Com isso, nota-se uma discrepância entre a literatura e o que é praticado, de fato, em termos de reciclagem de ímãs NdFeB. Ademais, pode-se observar que, caso viabilizados e implementados, as rotas de recuperação de terras raras poderiam, além de aumentar a independência quanto a extração primária, possibilitar uma produção de energia ambientalmente mais sustentável em termos de emissões por ciclo de vida. No entanto, as publicações avaliadas não contemplam externalidades inerentes ao processo de reciclagem como, por exemplo, distribuição e captação dos materiais a serem reciclados ou disponibilidade real, considerando o tempo de vida de cada material. Portanto, ensaios sobre estes fatores, assim como sobre a determinação das perdas materiais inerentes aos processos, deverão ser feitos para complementar a análise do potencial da reciclagem de ímãs NdFeB. Por fim, infere-se que a sustentabilidade da produção de energia eólica com turbinas DDPMSG passa por técnicas de reaproveitamento dos metais de terras raras, mas, também, por fatores de governança e gestão.

## **6. AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao CNPq pela bolsa concedida e ao CETEM e equipe pelo apoio fornecido nesta trajetória.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIBI, Naem et al. New resource assessment characterization factors for rare earth elements. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, [S. l.], p. 1-1, 25 maio 2018.

YEN, Clive H.; CHEONG, Rui. Application of Green Solvents for Rare Earth Element Recovery from Aluminate Phosphors. *Minerals (Basel)*, [s. l.], v. 11, n. 287, 10 mar. 2021.

BEOLCHINI, Francesca; AMATO, Alessia. Sustainable Strategies for the Exploitation of End-of-Life Permanent Magnets. *Processes*, [s. l.], v. 9, n. 857, ed. 5, 13 maio 2021.

BUSCH, Jonathan; DAWSON, David; ROELICH, Katy. Closing the low-carbon material loop using a dynamic whole system approach. *Journal of cleaner production*, United Kingdom, v. 149, p. 751-761, 23 fev. 2017.

MARX, Josefina; SCHREIBER, Andrea; ZAPP, Petra; WALACHOWICZ‡, Frank. Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent Magnet Production from Different Rare Earth Deposits. *ACS sustainable chemistry & engineering*, [s. l.], v. 6, p. 5858-5867, 22 mar. 2018.

MOGHADAM, Farid; NEJAD, Amir. Evaluation of PMSG-based drivetrain technologies for 10-MW floating offshore wind turbines: Pros and cons in a life cycle perspective. *Wind energy*, [S. l.], p. 2049-, 13 fev. 2020.

WULF, Christina; ZAPP, Petra; SCHREIBER, Andrea; MARX, Josefina; SCHLOR, Holger. Lessons Learned from a Life Cycle Sustainability Assessment of Rare Earth Permanent Magnets. *Journal of industrial ecology*, [s. l.], v. 21, ed. 6, p. 1578-1590, 2017. SEKINE, Nobuo; DAIGO, Ichiro; GOTO, Yoshikazu. Dynamic Substance Flow Analysis of Neodymium and Dysprosium Associated with Neodymium Magnets in Japan. *Journal of industrial ecology*, [s. l.], v. 21, ed. 2, p. 356-357, 2016.

VALERO, Antonio; VALERO, Alicia. Thermodynamic Rarity and Recyclability of Raw Materials in the Energy Transition. *Entropy*, [S. l.], p. 9-21, 1 jul. 2019.

YOON, H.S, et. al. The effect of grinding and roasting conditions on the selective leaching of Nd and Dy from NdFeB magnet scraps. *Metals*, 2015, 5, 1306–1314.