



Estado da arte sobre a circularidade da indústria de ímãs de NdFeB

Jéssica Prats Raspini (UFSC)
pratsjessica@gmail.com

Lucila Maria de Souza Campos (UFSC)
lucila.campos@ufsc.br

Os ímãs de terras raras (ITR), em especial o NdFeB, estão presentes em tecnologias modernas e de energia verde, como turbinas eólicas e carros elétricos. Contudo, os elementos de terras raras são considerados materiais críticos, com elevado risco de fornecimento. Neste contexto, a adoção da economia circular (EC) na indústria de ITRs é vista como uma estratégia para garantir o fornecimentos desses elementos. Desta forma, o presente estudo almeja compreender o panorama atual dos estudos de circularidade de ímãs de terras raras. Após a revisão sistemática, 10 artigos foram classificados e analisados. Os resultados indicam que os estudos de EC-ITR são incipientes e não abordam a circularidade dos ímãs de NdFeB de forma sistêmica, ou seja, os aspectos da EC foram abordados de forma isolada, sendo o maior enfoque direcionado para o processo de reciclagem. Por fim, salienta-se a necessidade em estudos que considerem toda a cadeia produtiva de ITRs de maneira aprofundada, indicando as melhores práticas e oportunidades.

Palavras-chave: Economia Circular, Ímãs, NdFeB, Materiais Críticos.

1. Introdução

Diante da degradação ambiental e do esgotamento de recursos, o conceito de economia circular (EC) tem despertado o interesse mundial (SASSANELLI *et al.*, 2019). A EC é uma estratégia que se opõe ao sistema linear tradicional, na tentativa de superar o desafio da escassez de recursos e da disposição de resíduos (HOMRICH *et al.*, 2017), fornecendo novas perspectivas para garantir a sustentabilidade dos sistemas industriais (GAUSTAD *et al.*, 2018).

Uma das definições de EC mais replicadas foi concebida pela Fundação Ellen MacArthur e conceitua a economia circular como “*um sistema industrial que é restaurador ou regenerativo por intenção e design*” (EMF, 2015). Neste contexto, a EC contempla um ciclo contínuo de desenvolvimento positivo através da gestão dos estoques finitos e fluxos renováveis. Os produtos, componentes, materiais e energia são mantidos em circulação de forma a conservar seu valor agregado por um longo período de tempo. Desta forma, é possível preservar o capital natural, otimizar a produtividade de recursos e minimizar riscos sistêmicos (JABBOUR *et al.*, 2019; EMF, 2015).

Os recursos considerados críticos são aqueles que i) apresentam problemas potenciais em seu suprimento, ii) têm substitutos limitados ou iii) são utilizados em aplicações de grande importância, como em energia limpa, defesa, saúde e eletrônicos (GAUSTAD *et al.*, 2018). Os elementos de terras raras (ETR) foram considerados os materiais com maior criticidade, considerando o risco de fornecimento, pelo British Geological Institute (BGS, 2015).

Os ímãs permanentes de neodímio (Nd) são constituídos de aproximadamente 30 a 40% em peso de metais de terras raras e 60 a 70% de outros elementos, como ferro e boro (ÖNAL *et al.*, 2017). Ímãs de NdFeB têm colaborado com o processo de descarbonização da economia, uma vez que a transição para sistemas de transporte e energia de baixo carbono demanda tecnologias modernas e de energia verde, como veículos elétricos e turbinas eólicas, que contém quantidades significativas de ímãs de terras raras (HABIB, 2019; BUSCH *et al.*, 2017).

No entanto, o fornecimento quase monopolista chinês dos ímãs de terras raras (ITRs), em especial do NdFeB, representa um risco potencial de fornecimento para os fabricantes de tecnologias de energia renovável (JIN *et al.*, 2018). Além dos fatores estratégicos e econômicos, a mineração dos elementos de terras raras e a subsequente produção dos ímãs de NdFeB ocasionam impactos ambientais significativos, apresentando elevados níveis de consumo de água e energia, e uso de produtos químicos (EPA, 2012).

Neste contexto, é evidente a necessidade de desenvolver estratégias para lidar com os riscos associados à criticidade deste materiais (GAUSTAD *et al.*, 2018), gerenciando o equilíbrio

entre demanda e oferta dos recursos críticos. De acordo com Habib (2019), adotar a circularidade dos recursos críticos, de forma a reduzir a vulnerabilidade dos sistemas ao crescente risco de oferta, não é apenas uma escolha, mas uma conduta inevitável a ser praticada. Para reduzir o risco, as empresas estão buscando ativamente a recuperação de valor dos ímãs em fim de vida (JIN *et al.*, 2018).

Contudo, até o momento, pouco foi feito para avaliar a relevância das estratégias da economia circular na redução da vulnerabilidade de sistemas frente ao crescente risco de oferta de recursos críticos (HABIB, 2019). Assim, com o intuito de compreender o panorama atual dos estudos de circularidade de ímãs de terras raras, o presente estudo visa mapear a literatura, a fim de identificar os principais aspectos do temas mencionados, assim como as lacunas de pesquisa, a partir do questionamento: “qual é o cenário atual da adoção da circularidade na indústria de ímãs NdFeB?”.

O restante do trabalho está estruturado da seguinte forma: procedimentos metodológicos (ii), resultados e discussões (iii) e considerações finais (iv).

2. Procedimentos metodológicos

A definição do escopo foi apresentada como a seguinte pergunta: qual é o panorama da pesquisa sobre ITRs – Economia Circular? Posteriormente, selecionou-se o banco de dados Scopus, disponível no Portal de Periódicos CAPES, e, por fim, foram delineadas as palavras-chave a serem aplicadas na busca no banco de dados: ((*sustainab** OR “*circular economy*” OR “*closed loop*”) AND (“*rare earth*” OR *permanent* OR NdFeB OR Nd-Fe-B) AND *magnet*).

Em uma primeira busca, considerando o título, as palavras-chave e o resumo, foram localizados 2.169 estudos. No entanto, verificou-se que muitos destes estudos não estavam dentro do escopo pretendido, abordando principalmente motores elétricos síncronos. Dessa forma, a busca foi refeita considerando apenas documentos do tipo “artigo” e excluindo as palavras-chave: “*Synchronous Motors*”, “*Permanent Magnet Synchronous Motor*”, “*Closed Loop Control Systems*”, “*Controllers*”, “*AC Motors*”, “*Permanent Magnet Synchronous Generator*”, “*Synchronous Generators*”, “*Synchronous Machinery*”, “*PMSM*” e “*Finite Element Method*”. Após este refinamento, a amostra final continha 326 estudos.

Procedeu-se a leitura do título e resumo, restando 17 documentos. Por fim, os artigos finais do portfólio atendiam ao seguinte critério de inclusão: mencionar, ao menos uma vez, os conceitos “*circular economy*” ou “*closed loop*”. Deste modo, o portfólio final foi composto por dez

estudos, sendo um (01) estudo do ano de 2015, quatro estudos de 2018 e cinco estudos do ano de 2019. Estados Unidos, Canadá e Itália lideram as publicações com três (3), dois (2) e dois (2) estudos, respectivamente.

3. Resultados e discussões

Todos os dez estudos considerados trazem perspectivas e abordagens diversas para a circularidade dos ímãs de NdFeB, tais como: processos de reciclagem/recuperação dos ITRs e ETRs (AMATO *et al.*, 2019; XU *et al.*, 2019; JIN *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2018; DIEHL *et al.*, 2018; NLEBEDIM, KING; 2017), fontes secundárias de ITRs (HABIB, 2019; CIACCI *et al.*, 2019; TULSUM *et al.*, 2015) e análise econômica (LEADER *et al.*, 2019). No entanto, salienta-se que não foram encontrados estudos que abordam a circularidade dos ímãs de NdFeB de forma sistêmica, ou seja, os aspectos da EC foram discutidos de forma isolada, sendo o maior enfoque direcionado para o processo de reciclagem. A Tabela 1 apresenta uma categorização mais detalhada sobre os principais tópicos abordados nos estudos.

Tabela 1 - Categorização dos estudos após análise de conteúdo

	Processos de reciclagem e recuperação	Classificação ITRs pós - consumo	Análise econômica	Modelo de fluxo de material	Modelo de otimização da cadeia	Framework de decisão - reciclagem	Mineração urbana
Amato <i>et al.</i> (2019)	x						
Ciacci <i>et al.</i> (2019)	x			x			
Diehl <i>et al.</i> (2018)	x						
Habib (2019)		x					
Jin <i>et al.</i> (2018)					x		
Leader <i>et al.</i> (2019)			x				
Nlebedim e King (2017)						x	
Tulsum <i>et al.</i> (2015)	x						x
Xu <i>et al.</i> (2019)	x						

Zhang <i>et al.</i> (2018)	x						
----------------------------	---	--	--	--	--	--	--

Fonte: elaborado pela autora (2020)

3.1 Fontes secundárias de ímãs de NdFeB e elementos de terras raras

Ímãs permanentes de pós-consumo representam fontes promissoras de elementos de terras raras (AMATO *et al.*, 2019). Assim, a mineração urbana - processo de recuperação de elementos contidos em produtos em fim da vida - fornece uma fonte alternativa aos depósitos geológicos (CIACCI *et al.*, 2019; TULSUM *et al.*, 2015).

Neste contexto, a reciclagem de ímãs de NdFeB pós-consumo é um processo que contribui diretamente para a redução dos perigos sociais e ambientais atrelados à mineração de terras raras, eliminação da exposição a elementos radioativos e contenção dos riscos associados ao fornecimentos dos ETRs. Assim, a atividade de reciclagem fomenta a circularidade e a sustentabilidade dos elementos de terras raras (XU *et al.*, 2019, CIACCI *et al.*, 2019; NLEBEDIM, KING; 2017).

A partir da análise dos estudos supracitados, a temática de fontes secundárias de ímãs de NdFeB e elementos de terras raras foi discutida sob três perspectivas, descritas a seguir: (i) rotas de obtenção da matéria-prima secundária, (ii) categorização dos ímãs de NdFeB pós-consumo e (iii) desafios da obtenção da matéria-prima secundária.

3.1.1 Rotas de obtenção da matéria-prima secundária

Existem três rotas principais para a reciclagem de um ímã de NdFeB: (i) reutilização direta, (ii) reprocessamento físico da liga de ímã ou (iii) reciclagem elementar, a qual representa a recuperação dos elementos de terras raras (ZHANG *et al.*, 2018; DIEHL *et al.*, 2018). De acordo com Nlebedim e King (2017), a escolha da rota adequada depende do ponto da cadeia de suprimentos no qual o produto reciclado será inserido.

Reutilizar diretamente os ímãs é a melhor rota sob a ótica ecológica e econômica. No entanto, esta opção somente é viável nos casos em que composição desejada do novo ímã for igual a antiga. Contudo, ímãs costumam apresentar características muito específicas, como forma, composições químicas e propriedades magnéticas, inviabilizando esta alternativa (ZHANG *et al.*, 2018; DIEHL *et al.*, 2018).

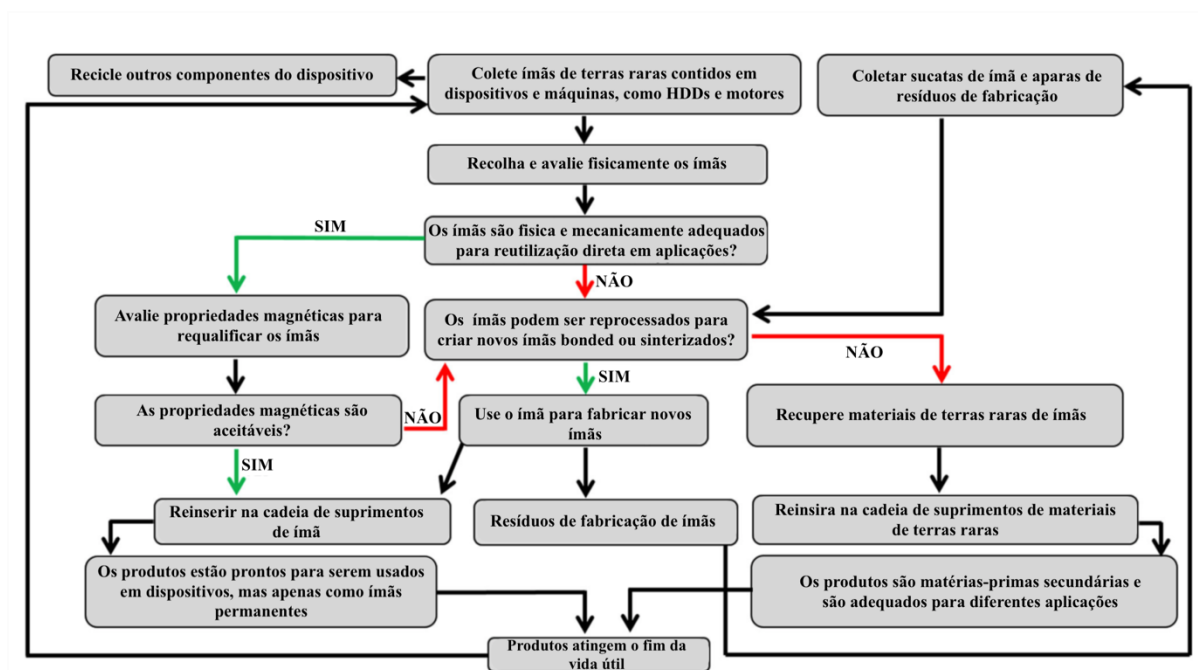
Neste contexto, os ímãs podem ser processados minimamente para atender às novas especificações. Ainda, de acordo com Nlebedim e King (2017), as indústrias de fabricação e

processamento de ímãs representam fontes significativas de materiais para reciclagem, uma vez que, em geral, 30% do ímã é perdido na forma de limalhas e escórias. Assim, alguns dos resíduos obtidos podem retornar ao ciclo de produção após tratamento mínimo (TULSUM *et al.*, 2015).

Por fim, tem-se a rota de reciclagem elementar, a qual ocorre a partir da recuperação dos elementos na forma de óxidos ou metais, através de abordagens de hidrometalurgia, pirometalurgia, eletroquímica, entre outras. No entanto, estes processos são complexos e demandam alto consumo de energia e matérias-primas, além de gerar emissões de gases de efeito estufa (AMATO *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2018).

A Figura 1 apresenta uma árvore de decisão para a reciclagem de ímãs permanentes, elaborada por Nlebedim e King (2017). Segundo os autores, esta estrutura demonstra o potencial da circularidade dos ímãs aos considerar: (i) a avaliação dos ímãs para posterior reuso ou remanufatura, (ii) readequação dos ímãs para as aplicações pretendidas, (iii) recuperação dos elementos de terras raras no caso da inviabilidade da reutilização/remanufatura dos ímãs e (iv) apontar a necessidade de reciclar os outros componentes e materiais nos quais os ITRs estão contidos.

Figura 1 - Árvore de decisão para a reciclagem de ímãs permanentes



Fonte: adaptado de Nlebedim e King (2017)

3.1.2 Categorização dos ímãs de NdFeB pós-consumo

Nesta circunstância, fontes secundárias de ímãs e elementos de terras raras têm potencial para compensar parte da mineração necessária ao atendimento da demanda (LEADER *et al.*, 2019), reduzindo o custo econômico do processo em até 70 vezes (AMATO *et al.*, 2019). Ainda, a utilização de fontes secundárias reduz significativamente o risco de fornecimento ao diversificar geograficamente a fonte desses materiais. Para empresas de fabricação de ímãs, a reciclagem da sucata do processo produtivo é uma forma realista de reduzir o risco de fornecimento (LEADER *et al.*, 2019).

O estudo de Ciacci *et al.* (2019) desenvolveu um modelo dinâmico de fluxo de material de modo a estimar os estoques e fluxos de neodímio na União Europeia (EU) no ano de 2016. Segundo a análise, as fontes secundárias de neodímio poderiam suprir cerca de 50% da demanda anual deste elemento na EU.

Por sua vez, o estudo de Habib (2019) desenvolveu uma abordagem de classificação para produtos de pós-consumo que contém ímãs de NdFeB, de forma a otimizar a circularidade dos recursos críticos. Estes produtos foram classificados em três níveis, considerando critérios como a vida útil, propriedade e massa do ímã. Assim, cada nível representa um certo grau de acessibilidade para a recuperação dos ITRs, sendo eles:

a) Nível I: produtos com vida útil longa (15 anos ou mais), como turbina eólicas e máquinas de ressonância magnética, os quais contêm ímãs maiores por unidade de produto (entre 500 e 2.000 kg). Tais produtos atendem a um número maior da população (1:10.000, por exemplo) e, usualmente, são propriedades das autoridades regionais ou estaduais. Neste nível, os produtos não enfrentam desafios de coleta no pós-consumo, sendo facilmente acessíveis para empresas de tratamento de resíduos devido a acordos com os proprietários e/ou produtores. Os ímãs desta categoria são técnica e economicamente viáveis de remoção sem danos e, quando recuperados e atendendo aos critérios dos novos produtos, podem ser reutilizados diretamente. Se necessário, os ímãs podem ser reparados com novo revestimento e remagnetização;

b) Nível II: compreende produtos com vida útil entre 8 e 15 anos, com tamanhos de ímãs medianos (entre 0,1 e 3kg), como máquinas de lavar e secar, geladeiras, veículos de passageiros, entre outros. A propriedade desses materiais costuma ocorrer em nível familiar. Nesta categoria, os produtos em fim de vida também são acessíveis para a recuperação, pois as pessoas tendem

a deixá-los em locais adequados para a disposição devido ao seu tamanho. Usualmente, estes ímãs em fim de vida não estão inteiros ou encontram-se dispersos em diversos compartimentos de um produto – nesses casos, eles ainda podem apresentar composições variadas. Tais aspectos dificultam o acesso e a fácil recuperação desses ímãs. Assim, os ITRs desta categoria costumam ser direcionados para a remanufatura, onde são derretidos e transformados em novos ímãs, com posterior magnetização. Ainda, como alternativa, estes materiais podem ser encaminhados para a etapa de separação e redução por produtos químicos, onde os elementos de terras raras são recuperados e utilizados para um mesmo ou diferente objetivo;

c) Nível III: esta categoria engloba os produtos com a menor expectativa de vida útil (1 a 6 anos) e com tamanho de ímã pequeno por unidade de produto (1g a 15g), como *smartphones*, computadores pessoais, escovas elétricas, entre outros. A propriedade destes materiais ocorre a nível individual. Neste nível, produtos de pós-consumo têm baixas taxas de coleta, uma vez que acabam como estoques de hibernação (guardados pelas pessoas em suas casas) ou coletados de maneira informal. Nesta categoria, a separação dos ímãs de produtos em fim de vida enfrenta desafios críticos. Esses pequenos ímãs são usualmente anexados aos demais componentes do produto através de adesivos. Ao desconectá-los, o revestimento pode ser danificado, ocasionando a oxidação dos ímãs e a redução das propriedades magnéticas. Assim, os ímãs são enviados para etapas anteriores da cadeia de ETRs, nas quais o neodímio e outros elementos são recuperados a partir de métodos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos. Posteriormente, estes elementos podem ser reintroduzidos na cadeia de suprimentos de ímãs de NdFeB ou em uma cadeia completamente diferente, como usos cerâmicos ou metalúrgicos.

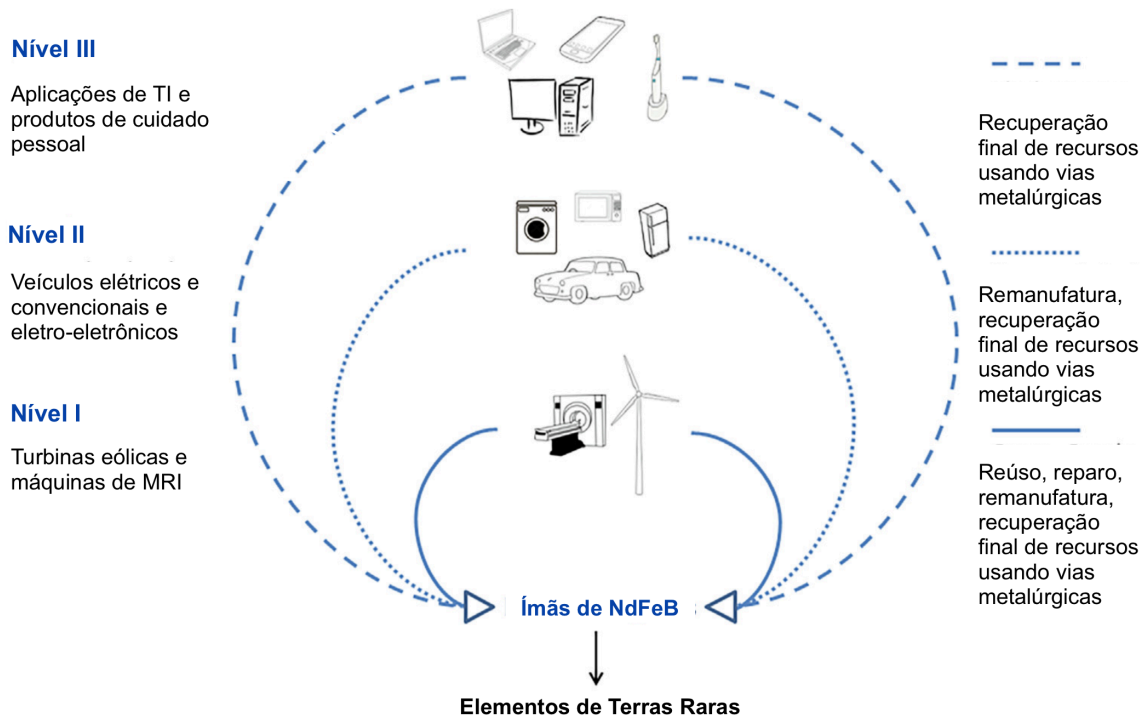
Salienta-se, que por necessitarem de processos complexos de remanufatura e recuperação, os níveis II e III demandam consumo de materiais e energia significativos, com potenciais encargos ambientais (HABIB, 2019). A Figura 2 apresenta o agrupamento dos diferentes produtos de acordo com a abordagem de classificação proposta por Habib (2019).

3.1.3 Desafios da obtenção da matéria-prima secundária

A obtenção de fontes secundárias depende da coleta de produtos pós-consumo, seguida da análise e classificação dos materiais, separação e desmontagem dos componentes-alvo (a qual pode ser manual ou automática) e, por fim, pré-tratamentos, como desmagnetização, limpeza e trituração (DIEHL *et al.*, 2018). No entanto, questões de design de produto, tecnologias de

reciclagem, coleta dos produtos de pós-consumo e inviabilidade econômica da produção secundária são os principais obstáculos à recuperação do neodímio (CIACCI *et al.*, 2019).

Figura 2 - Classificação de produtos visando a circularidade de ímãs de NdFeB



Fonte: adaptado de Habib (2019)

Usualmente, há falta de homogeneidade nos fluxos reversos, uma vez que os ímãs são produzidos com propriedades específicas e apresentam variações na composição de ETRs (DIEHL *et al.*, 2018, TULSUM *et al.*, 2015). Assim, estes materiais com composições químicas e propriedades físicas divergentes dificultam os processos de recuperação e reciclagem de ímãs. Deste modo, deve-se utilizar tecnologias avançadas que possam identificar e classificar a sucata. Ainda, são necessárias formas eficientes de desmontagem de produtos pós-consumo, uma vez que o desmantelamento manual demanda muito tempo e a trituração convencional pode ocasionar cerca de 90% de perda de material (DIEHL *et al.*, 2018).

As dificuldades de desmantelamento e separação da fração de interesse podem inviabilizar economicamente o potencial de recuperação de elementos de terras raras (TULSUM *et al.*, 2015). Por isso, deve-se buscar fluxos de resíduos específicos, com composição e qualidade conhecidas, que se adequem às tecnologias de reciclagem existentes, a fim de obter padrões de

qualidade estáveis nos produtos finais (DIEHL *et al.*, 2018). Por outro lado, torna-se mais acessível processar o refugo da produção pré-consumo de ímãs, uma vez que as etapas de classificação e desmontagem são dispensáveis (TULSUM *et al.*, 2015).

Para o estabelecimento de uma cadeia de reciclagem, a produção secundária deve ser tão competitiva quando a produção primária (CIACCI *et al.*, 2019). Contudo, de acordo com Jin *et al.* (2018), a logística reversa da cadeia de suprimentos (coleta de ímãs usados, desmontagem, reciclagem/remanufatura e revenda) não foi pesquisada de maneira aprofundada. Ainda, os baixos preços históricos do neodímio dificultam o estabelecimento das práticas de reciclagem (CIACCI *et al.*, 2019).

Para Jin *et al.* (2018), o sucesso de uma cadeia reversa sustentável de NdFeB depende de aspectos econômicos, ambientais e sociais. Assim, os autores projetaram uma infraestrutura otimizada para a recuperação de ímãs de NdFeB, considerando os locais ideais das instalações de processamento (centros de coleta, instalações de desmontagem de produtos pós-consumo, instalações de reciclagem e pontos de venda) e as capacidades e fluxos de transporte que maximizam os benefícios econômicos e ambientais e o suporte social para novas cadeias. De acordo com Jin *et al.* (2018), o modelo matemático MOVRNDM e a abordagem MONDGA são ferramentas úteis para a indústria projetar a cadeia de suprimentos reversa ideal para a economia circular.

4. Considerações finais

As tecnologias verdes estão emergindo como uma importante ferramenta para a descarbonização da economia. Entretanto, estas demandam ímãs permanentes de NdFeB, os quais contém elementos de terras raras considerados críticos. Assim, a adoção da economia circular na indústria de ímãs de NdFeB é vista como uma estratégia para garantir o suprimento destes elementos.

Este artigo teve como objetivo compreender o panorama atual dos estudos da circularidade dos ímãs de NdFeB. Após a análise de 10 artigos, verificou-se que a estudos de EC-ITR são incipientes e não abordam a circularidade dos ímãs de NdFeB de forma sistêmica, ou seja, os aspectos da EC foram abordados de forma isolada, sendo o maior enfoque direcionado para o processo de reciclagem. Ainda, a temática de fontes secundárias de ímãs de NdFeB e elementos de terras raras foi discutida sob três perspectivas: (i) rotas de obtenção da matéria-prima secundária, (ii) categorização dos ímãs de NdFeB pós-consumo e (iii) desafios da obtenção da

matéria-prima secundária.

Por fim, salienta-se a necessidade de metodologias e tecnologias avançadas de recuperação de elementos de terras raras e reciclagem de ímãs de NdFeB. Dessa forma, deve-se repensar o design de projeto dos ímãs, de forma a facilitar a separação e posterior caracterização de seus materiais, assim como seu reuso direto.

Para isto, são necessários estudos aprofundados que apontem como otimizar a cadeia reversa de ímãs de NdFeB, com possíveis soluções para integrar empresas e indústrias, de forma que o produto de pós-consumo de uma possa ser utilizado como matéria-prima de outra, assim como indicações de melhores práticas e oportunidades.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AMATO, A.; BECCI, A.; BIRLOAGA, I.; MICHELIS, I. de; FERELLA, F.; INNOCENZI, V.; IPPOLITO, N.m.; GOMEZ, C. Pillar Jimenez; VEGLIÒ, F.; BEOLCHINI, F.. Sustainability analysis of innovative technologies for the rare earth elements recovery. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 106, p. 41-53, maio 2019. Elsevier BV.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY – BGS (2015). **Risk list 2015**. United Kingdom. 2015. Disponível em: <https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/risklist.html>. Acesso em: 17 fev. 2020.

BUSCH, Jonathan; DAWSON, David; ROELICH, Katy. Closing the low-carbon material loop using a dynamic whole system approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 149, p.751-761, abr. 2017. Elsevier BV.

CIACCI, Luca; VASSURA, Ivano; CAO, Zhi; LIU, Gang; PASSARINI, Fabrizio. Recovering the “new twin”: analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in europe. : Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 142, p. 143-152, mar. 2019. Elsevier BV.

DIEHL, Oliver; SCHÖNFELDT, Mario; BROUWER, Eva; DIRKS, Almut; RACHUT, Karsten; GASSMANN, Jürgen; GÜTH, Konrad; BUCKOW, Alexander; GAUß, Roland; STAUBER, Rudolf. Towards an Alloy Recycling of Nd–Fe–B Permanent Magnets in a Circular Economy. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 4, n. 2, p. 163-175, 19 mar. 2018. Springer Science and Business Media LLC.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION – EMF (2015). **Rumo à Economia Circular: o racional de negócio para acelerar a transição.** Disponível

em:< https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-à-economia-circular_Updated_08-12-15.pdf>. Acesso em: 10 de janeiro de 2020.

EPA, 2012. **Rare earth elements: a review of production, processing, Recycling, and Associated Environmental Issues.** US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

GAUSTAD, Gabrielle; KRYSTOFIK, Mark; BUSTAMANTE, Michele; BADAMI, Kedar. Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p.24-33, ago. 2018. Elsevier BV.

HABIB, Komal. A product classification approach to optimize circularity of critical resources – the case of NdFeB magnets. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 90-97, set. 2019. Elsevier BV.

HOMRICH, Aline Sacchi; GALVÃO, Graziela; ABADIA, Lorena Gamboa; CARVALLHO, Marly. M. The circular economy umbrella: Trends and gaps on integrating pathways. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p.525-543, fev. 2018. Elsevier BV.

JABBOUR, Ana Beatriz Lopes de Sousa; LUIZ, João Victor Rojas; LUIZ, Octaviano Rojas; JABBOUR, Charbel Jose Chiappetta; NDUBISI, Nelson Oly; OLIVEIRA, Jorge Henrique Caldeira de; HORNEAUX JR., Flavio. Circular economy business models and operations management. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p.1525-1539, out. 2019. Elsevier BV.

JIN, Hongyue; SONG, Byung Duk; YIH, Yuehwern; SUTHERLAND, John W. Sustainable Value Recovery of NdFeB Magnets: A Multi-Objective Network Design and Genetic Algorithm. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 4, p. 4767-4775, 26 fev. 2018. American Chemical Society (ACS).

LEADER, Alexandra; GAUSTAD, Gabrielle; BABBITT, Callie. The effect of critical material prices on the competitiveness of clean energy technologies. **Materials for Renewable And Sustainable Energy**, v. 8, n. 2, jun. 2019. Springer Science and Business Media LLC.

NLEBEDIM, I. C.; KING, A. H.. Addressing Criticality in Rare Earth Elements via Permanent Magnets Recycling. **JOM**, v. 70, n. 2, p. 115-123, 12 dez. 2017. Springer Science and Business Media LLC.

ÖNAL, Mehmet Ali Recai; AKTAN, Emir; BORRA, Chenna Rao; BLANPAIN, Bart; VAN GERVEN, Tom; GUO, Muxing. Recycling of NdFeB magnets using nitration, calcination and water leaching for REE recovery. **Hydrometallurgy**, v. 167, p.115-123, jan. 2017. Elsevier BV.

SASSANELLI, Claudio; ROSA, Paolo; ROCCA, Roberto; TERZI, Sergio. Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p.440-453, ago. 2019. Elsevier BV.

TUNSU, Cristian; PETRANIKOVA, Martina; GERGORIĆ, Marino; EKBERG, Christian; RETEGAN, Teodora. Reclaiming rare earth elements from end-of-life products: A review of the perspectives for urban mining using hydrometallurgical unit operations. **Hydrometallurgy**, v. 156, p. 239-258, jun. 2015. Elsevier BV.

XU, Xuan; STURM, Saso; SAMARDZIJA, Zoran; VIDMAR, Janja; SCANCAR, Janez; ROZMAN, Kristina Zuzek. Direct Recycling of Nd–Fe–B Magnets Based on the Recovery of Nd₂Fe₁₄B Grains by Acid-free Electrochemical Etching. **Chemsuschem**, v. 12, n. 21, p. 4754-4758, 17 out. 2019. Wiley.

ZHANG, Jiakai; ANAWATI, John; YAO, Yuxiang; AZIMI, Gisele. Aeriometallurgical Extraction of Rare Earth Elements from a NdFeB Magnet Utilizing Supercritical Fluids. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 12, p. 16713-16725, 24 out. 2018. American Chemical Society (ACS).