



Indicadores circulares para a indústria de ímãs de terras raras

Jéssica Prats Raspini (UFSC)

pratsjessica@gmail.com

Vitor Allan Prats Raspini (UFSC)

pratsvitor@gmail.com

Franciele Rossetti Cunico (UFSC)

franciele.ros7@gmail.com

Orestes Estevam Alarcon (UFSC)

orestes.alarcon@ufsc.br

Lucila Maria de Souza Campos (UFSC)

lucila.campos@ufsc.br

Os ímãs de Nd-Fe-B têm papel significativo no processo de descarbonização da economia, uma vez que eles estão presentes em tecnologias verdes, como veículos elétricos e turbinas eólicas. No entanto, ímãs de Nd-Fe-B apresentam em sua composição elevados teores de elementos de terras raras (ETRs), os quais são considerados recursos críticos. Ainda, a extração dos ETRs e a posterior produção de ímãs de Nd-Fe-B geram impactos ambientais significativos. Estima-se que nos próximos anos a demanda por ímãs de Nd-Fe-B aumente em níveis expressivos. Neste contexto, a adoção dos princípios da economia circular na indústria é tida como uma estratégia para garantir o suprimento de elementos de terras raras, matéria-prima da produção dos ímãs, e para minimizar os impactos ambientais do processo produtivo. No entanto, a adoção de estratégias circulares deve ser acompanhada de avaliações, as quais são obtidas a partir de indicadores circulares, a fim de orientar ações de modo a aumentar a circularidade dos ímãs. Assim, este artigo teve como objetivo compreender o panorama atual dos estudos de indicadores de circularidade no âmbito da indústria de ímãs de Nd-Fe-B. Após a revisão da literatura, verificou-se que esta temática se encontra em fase embrionária, sendo localizado apenas um artigo totalmente alinhado ao tema. Trabalhos futuros podem direcionar esforços à construção ou adaptação dos indicadores da literatura ao contexto da indústria dos ímãs. Estes indicadores devem considerar o escopo completo da economia circular, estar alinhados com os preceitos da sustentabilidade e ser embasados em dados robustos e confiáveis.

Palavras-chave: Ímãs de Nd-Fe-B, Terras Raras, Economia Circular, Indicadores de circularidade.

1. Introdução

O mercado de ímãs permanentes é, atualmente, dominado pelos ímãs de Nd-Fe-B devido ao seu produto energético superior (YANG *et al.*, 2016). Estes ímãs têm papel significativo no processo de descarbonização da economia, pois a transição para sistemas de transporte e energia de baixo carbono demanda tecnologias verdes, tais como veículos elétricos e turbinas eólicas, que contém quantidades significativas de Nd-Fe-B (HABIB, 2019). Contudo, ímãs de Nd-Fe-B apresentam em sua composição elevados teores de elementos de terras raras (ETRs) (ÖNAL *et al.*, 2017), os quais são considerados recursos críticos (BGS, 2015). Ainda, a extração dos ETRs e a posterior produção de ímãs de Nd-Fe-B geram impactos ambientais expressivos, devido ao elevado consumo de água e energia, e ao uso intensivo de produtos químicos (EPA, 2012). De acordo com Busch *et al.* (2014) a sustentabilidade e a resiliência futura da infraestrutura de baixo carbono depende do gerenciamento efetivo dos materiais críticos, o qual deve ocorrer através de estratégias circulares.

Dentro do ciclo de vida dos elementos de terras raras muitas fases causam impactos, mas os danos podem ser reduzidos ao incluir os ETRs no conceito de economia circular. Neste contexto, a utilização de indicadores circulares é importante para apontar aspectos críticos, orientando onde ações devem ser implementadas para aumentar a circularidade dos ímãs e reduzir os impactos negativos. Estes resultados orientam governos e empresas e também servem como benchmarking de progresso da cadeia produtiva de ETRs (AKERMAN, 2016). Assim, com o intuito de compreender o panorama atual dos estudos de índices de circularidade de ímãs de terras raras, o presente estudo visa mapear a literatura, a fim de identificar os principais aspectos do temas mencionado, assim como as lacunas de pesquisa, a partir do questionamento: “qual é o cenário atual da adoção de índices de circularidade na indústria de ímãs Nd-Fe-B?”.

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

2. Procedimentos metodológicos

A definição do escopo da pesquisa foi apresentada com a seguinte pergunta: há pesquisas sobre índices de circularidade que utilizaram os ímãs de Nd-Fe-B como estudo de caso? Em um primeiro momento, optou-se por uma revisão sistemática da literatura, a partir de bases de dados Scopus e *Web of Science*. No entanto, apenas um documento foi localizado

(AKERMAN, 2016), o que demonstra que a literatura acerca dessa temática (índices de circularidade aplicados à ímãs de Nd-Fe-B) ainda é embrionária.

Ante ao resultado da revisão sistemática, o objetivo do presente estudo foi readequado, procedendo-se uma revisão exploratória. Assim, as seções a seguir foram desenvolvidas de modo a reconhecer os principais tópicos abordados na literatura dentre a temática de indicadores circulares gerais. Ainda, buscou-se entender sob quais níveis (macro, meso ou micro) os ímãs de Nd-Fe-B devem ter sua circularidade avaliada, elencando as fragilidades das metodologias já estabelecidas e reconhecendo a importância da seleção e interpretação adequadas dos indicadores.

3. Referencial teórico

3.1. Ímãs de Nd-Fe-B

Os ímãs de Nd-Fe-B, também conhecidos por ímãs permanentes, dominam o mercado de ímãs devido ao seu produto energético superior (YANG *et al.*, 2016). Esses ímãs são constituídos de aproximadamente 30 a 40% em peso de elementos de terras (ÖNAL *et al.*, 2017), sendo empregados em eletrodomésticos e eletroeletrônicos, equipamentos médicos e, especialmente, em motores de veículos elétricos e turbinas eólicas (HABIB, 2019). Atualmente o monopólio de mercado de terras raras chinês, representa um risco potencial de abastecimento destes minerais para os fabricantes de tecnologias de energia renovável (JIN *et al.*, 2018). Em 2015, os ETRs foram considerados os materiais com maior criticidade, considerando o risco de fornecimento, pelo British Geological Institute (BGS, 2015).

No Brasil, no ano de 2011, as terras raras foram consideradas “minerais estratégicos” pelo Plano Nacional de Mineração 2030 do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2011). Neste contexto, o país tem adotado uma série de iniciativas para desenvolver as cadeias nacionais de exploração de terras raras e produção de ímãs de Nd-Fe-B. Um dos fatores de prioridade nacional decorre do alto consumo de ímãs pelas empresas BOSCH, EMBRACO e WEG, bem como nas organizações multinacionais como SAMSUNG e GE, que utilizam este componente para aplicações em motores elétricos industriais, motores para sistemas de ventilação, motores para eletrodomésticos, entre outros (GOMES, 2015). Ainda, estima-se demanda crescente dos elementos de terras raras: o valor de mercado deve exceder os US\$ 51 bilhões até 2022 somente em aplicações de ímãs (KUMAR, 2017), crescimento impulsionado, principalmente, pela difusão dos veículos elétricos e das turbinas eólicas (LI *et al.*, 2019).

O mercado positivo de ITRs despertou interesse brasileiro, já que no país existem depósitos não explorados de ETRs. De acordo com o relatório *U.S. Geological Survey (2021)* o Brasil ocupa a terceira posição mundial em termos de reserva de terras raras. Além disso, o rejeito da exploração do Nióbio, realizada pela empresa Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) em Araxá, Minas Gerais, contém ETRs, apresentando potencial de exploração comercial (INCT, 2014). Assim, o potencial brasileiro de exploração de terras raras e a projeção de aumento na demanda impulsionaram o estabelecimento de iniciativas para viabilizar a implantação do ciclo completo da cadeia industrial de terras raras no Brasil. Dentro desta ação está inserido o primeiro Laboratório-Fábrica de ligas e ímãs de terras raras do hemisfério Sul, denominado LabFab-ITR, construído na cidade de Lagoa Santa, em Minas Gerais.

Contudo, a extração dos ETRs e a posterior produção de ímãs de Nd-Fe-B geram impactos ambientais expressivos, devido ao elevado consumo de água e energia, e ao uso intensivo de produtos químicos (EPA, 2012). Neste contexto, a adoção da economia circular na indústria de ITRs é vista como uma estratégia para garantir o fornecimento dos ETRs e contribuir com a redução dos impactos ambientais.

3.2. Ímãs de Nd-Fe-B e economia circular

A abordagem da economia circular (EC) visa dissociar o desenvolvimento econômico do consumo de recursos finitos, eliminando as externalidades negativas da economia (EMF, 2015). O conceito de EC é econômico e estratégico, embasado na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais. As estratégias circulares podem ser aplicadas na mineração de terras raras, na produção de ímãs, assim como na gestão dos materiais pós-consumo (XAVIER *et al.*, 2019). Assim, as organizações se beneficiam das diversas oportunidades que emergem da adoção de um modelo circular: além da captura do valor adicional de seus produtos e materiais, estratégias circulares podem mitigar riscos de volatilidade de preços e de fornecimento de matérias-primas.

Existem três rotas principais para o reaproveitamento de um ímã de Nd-Fe-B: (i) reutilização direta, (ii) reprocessamento físico da liga de ímã ou (iii) reciclagem elementar, a qual representa a recuperação dos elementos de terras raras (DIEHL *et al.*, 2018). A escolha da rota adequada depende do ponto da cadeia de suprimentos no qual a matéria-prima secundária será inserida. As estratégias circulares aplicadas aos ímãs de Nd-Fe-B precisam garantir que as características magnéticas do ímã estejam de acordo com seu uso futuro.

Os ímãs permanentes são utilizados em diversos tipos de equipamento. Habib (2019), portanto, categorizou os produtos de pós-consumo de acordo com o grau de viabilidade técnica e econômica da recuperação dos recursos. Considerando critérios como vida útil, propriedade e massa do ímã, os produtos foram divididos em níveis. Assim, cada nível representa um certo grau de acessibilidade para a recuperação dos ITRs, ou seja, o potencial de circularidade dos ímãs.

Salienta-se que a transição para uma economia circular deve ser monitorada. Ferramentas de medição são necessárias para apoiar empresas, tomadores de decisão e formuladores de políticas na avaliação dos efeitos da adoção de estratégias circulares (BRACQUENÉ *et al.*, 2020; SAIDANI *et al.*, 2019).

3.3. Índices de circularidade

Os indicadores de circularidade, por sua vez, são entendidos como “*ferramentas analíticas voltadas para medir o grau de associação de um sistema (ou parte de um) às práticas e estratégias aplicadas para desenvolver ainda mais uma economia circular*” (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Tais indicadores têm por objetivo avaliar, monitorar, medir e comunicar o progresso e desempenho de sistemas ou processos ante a uma economia circular (OLIVEIRA *et al.*, 2021; SAIDANI *et al.*, 2019).

Em 2017, a instituição British Standards apresentou a primeira estruturação prática e orientação universal para a adoção dos princípios da economia circular: a norma BS 8001:2017 (BSI, 2017). A norma apresenta um conjunto de definições e esclarecimentos e também fornece recomendações. No entanto, a orientação sobre o monitoramento da implementação de estratégias circulares é bastante genérica, sendo transferida às organizações a responsabilidade pela escolha dos indicadores circulares apropriados (PAULIUK, 2018).

A Comissão Europeia reconheceu a necessidade de indicadores circulares em seu plano de ação para a economia circular (EC, 2015). De acordo com a organização, para avaliar o progresso da transição para uma EC, é importante dispor de um conjunto de indicadores fidedignos. Neste contexto, considerando o crescente interesse pela economia circular, uma infinidade de indicadores circulares foram desenvolvidos nos últimos anos (SOO *et al.*, 2021; HARRIS *et al.*, 2021). De acordo com Saidani *et al.* (2019), a primeira publicação específica sobre indicadores circulares é do ano de 2010. Desde então, é crescente o número de estudos publicados nesta temática.

Os indicadores circulares consideram diferentes escalas de EC, como micro (produtos e empresas), meso (simbiose industrial) e macro (governos), e foram desenvolvidos embasados em diferentes domínios, finalidades e utilizações (SAIDANI *et al.*, 2019).

A literatura concentra diversos estudos que identificam e categorizam indicadores circulares nos diversos níveis do sistema. Saidani *et al.* (2019), por exemplo, revisaram 55 indicadores de circularidade e desenvolveram uma taxonomia com 10 categorias, diferenciando, por exemplo, entre os níveis de implementação (micro, meso e macro) e estratégias circulares (manutenção, reutilização manufatura e reciclagem).

3.3.1 Índices de circularidade de produtos

Em relação às escalas de EC supracitadas (micro, meso e macro), o estudo de Saidani *et al.* (2017) introduziu uma nova classificação centrada no produto: o nível nano. De acordo com os autores, a utilização de indicadores circulares ao nível nano se faz necessária para distinguir estritamente a influência de produtos específicos, e suas opções de design, da circularidade global de uma empresa (SAIDANI *et al.*, 2017).

Neste contexto, o foco deste trabalho é direcionado ao nível micro, uma vez que se pretende investigar a utilização de indicadores circulares para o produto ímãs de Nd-Fe-B.

Não há um método padronizado para medir a circularidade dos produtos e não existe consenso sobre o que os indicadores circulares em nível de produto devem medir, o que torna subjetiva a avaliação das estratégias circulares (NIERO; KALBAR, 2019). Para Saidani *et al.* (2017), os indicadores de desempenho de circularidade de produto podem ser relevantes para fins informativos, comparativos e de melhorias durante as fases de design e desenvolvimento do produto, bem como para definir metas circulares tangíveis para produtos. Ainda, as métricas de circularidade devem indicar quão bem os princípios da EC são incorporados a um produto ou serviço (CORONA *et al.*, 2019).

A literatura conta com diversos estudos de revisão de indicadores circulares no nível micro (KRISTENSEN; MOSGAARD, 2020; SAIDANI *et al.*, 2019; NIERO; KALBAR, 2019; CORONA *et al.*, 2019, WALKER *et al.*, 2018).

Especificamente no nível micro, os três indicadores mais citados são o Indicador de Circularidade Material (em inglês, *Material Circularity Indicator* - MCI), desenvolvido pela Fundação Ellen MacArthur (EMF) e Granta Design, o Índice de Economia Circular (em inglês, *Circular Economy Index* - CEI) proposto por Maio e Rem (2015) e o Indicador de Potencial de Reutilização (em inglês, *Reuse Potencial Indicator* - RPI), elaborado por Park e

Chertow (2014) (BRACQUENÉ *et al.*, 2020). Os estudos de Elia *et al.* (2017) e Garza-Reyes *et al.* (2018) convergem em considerar o MCI o indicador mais completo para a avaliação da circularidade no nível micro.

Por sua vez, Saidani *et al.* (2017) testaram três abordagens distintas para medir o desempenho circular de produtos: o MCI; o *Circular Economy Toolkit* (CET), proposto por Evans e Brocken (2017) e o *Circular Economy Indicator Prototype* (CEIP), desenvolvido por Cayzer *et al.* (2017). Os autores, no entanto, apontaram deficiências nas metodologias: apesar de fornecerem resultados rápidos e fáceis, as abordagens deixaram de considerar a complexidade do contexto da economia circular, assim como não fornecem orientações para melhorar a circularidade do produto (SAIDANI *et al.*, 2017). Walker *et al.* (2018) avaliaram os mesmo três indicadores circulares. Segundo os autores, a utilização de indicadores relativos à circularidade dos materiais deve ser apoiada por estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (WALKER *et al.*, 2018).

Ainda neste contexto, Niero e Kalbar (2019) desenvolveram uma abordagem metodológica acoplando indicadores de circularidade de materiais com indicadores embasados em ACV, a partir de análise de decisão multicritério. Bracquené *et al.* (2020) propuseram um método mais abrangente para medir a circularidade de um produto. Segundo os autores, o Indicador de Circularidade do Produto (PCI) supera as limitações da abordagem MCI (BRACQUENÉ *et al.*, 2020). Mais recentemente, Soo *et al.* (2021) mediram a circularidade de materiais de veículos empregando as metodologias MCI e PCI.

As abordagens são diversas e não existe uma forma comumente aceita de medir a circularidade no nível micro (KRISTENSEN; MOSGAARD, 2020). Ainda, a maioria das métricas de circularidade apresenta limitações variadas, como falta de evidência empírica ou escopo limitado (HARRIS *et al.*, 2021). Os indicadores devem ser respaldados por métodos científicos e de avaliação rigorosos (SAIDANI *et al.*, 2017). Contudo, a escassez de informações sobre os processos de cálculo de alguns indicadores é preocupante (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Assim, tem-se uma barreira tanto para os produtores que desejam fornecer produtos e serviços circulares, quanto para os consumidores que desejam comparar produtos (KRISTENSEN; MOSGAARD, 2020).

Neste contexto, é de suma importância compreender os indicadores circulares disponíveis de forma a empregá-los adequadamente (SAIDANI *et al.*, 2019). Os tomadores de decisão precisam estar cientes das fragilidades de cada abordagem (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Por fim, ressalta-se que as estratégias circulares devem ser monitoradas de uma perspectiva de sistemas. Organizações sem orientações específicas sobre monitoramento e avaliação podem selecionar indicadores circulares incoerentes, que se encaixam em sua estratégia corporativa, mas não contribuem para uma economia circular mais ampla e para os Objetivos de Sustentabilidade (PAULIUK, 2018). Assim, é necessário compreender a relação entre os indicadores circulares e os impactos ambientais (HARRIS *et al.*, 2021). Idealmente, o projeto de uma métrica deve partir da definição de CE, a qual deve estar alinhada com o objetivo final de alcançar o desenvolvimento sustentável (CORONA *et al.*, 2019). No entanto, de acordo com Oliveira *et al.* (2021), os indicadores avaliam o desempenho da sustentabilidade de forma superficial. A maioria dos indicadores circulares direcionam-se aos aspectos econômicos, com aspectos ambientais, e especialmente sociais, incluídos em um menor frequência (KRISTENSEN; MOSGAARD, 2020). Glogic *et al.* (2021) e Oliveira *et al.* (2021) recomendam o uso de metodologias como ACV em paralelo aos indicadores circulares de forma a fornecer uma avaliação de sustentabilidade ampla e robusta no contexto de uma economia circular.

4. Resultados e discussões

O estudo de Akerman (2016) compilou índices de circularidade comparando-os, posteriormente, com os indicadores de sustentabilidade da ONU. O ciclo de vida dos elementos de terras raras foi utilizado como estudo de caso para a validação dos indicadores circulares, verificando a conformidade do ciclo de vida dos ETRs com o conceito de EC. A autora salienta que o escopo completo da economia circular deve ser considerado no desenvolvimento de indicadores, caso contrário, o potencial de implementação da EC é reduzido a uma análise de fluxo de material, potencial de reciclagem e/ou reutilização (AKERMAN, 2016). Tal alegação está alinhada com o estudo de Oliveira *et al.* (2021), no qual os autores argumentam que os indicadores tendem a se concentrar na recirculação de materiais e recursos, carecendo de robustez para a avaliar o desempenho de sistemas circulares.

Akerman (2016) também identificou áreas com falta de informações, caso da fabricação de produtos intermediários e finais que utilizam ETRs. Dados de diferentes países são necessários para a avaliação dos ciclos de vida dos recursos. No entanto, estes podem ser gerados e/ou compilados de maneiras distintas e diversas, o que dificulta a unificação e utilização nos indicadores circulares (AKERMAN, 2016). Ainda, empresas e países podem

interpretar de maneira equivocada os resultados dos indicadores circulares. A autora exemplifica que, no caso do ciclo de vida dos ETRs, as empresas de manufatura podem amenizar a sua influência no ciclo de vida, uma vez que os problemas mais evidentes são a extração mineral e a baixa taxa de reciclagem (AKERMAN, 2016).

O estudo de Akerman cobre apenas parcialmente o objetivo desta pesquisa. Apesar de utilizar os elementos de terras raras como estudo de caso, o documento não aborda propriamente os ímãs de terras raras. Ademais, a autora categoriza os índices em cinco grupos distintos, mas não fornece orientação sobre as abordagens adequadas e as melhores ferramentas para mensurar estes índices.

Destaca-se que a pesquisa sobre a circularidade de ímãs de Nd-Fe-B encontra-se em fase embrionária, uma vez que a pesquisa exploratória localizou apenas o estudo supracitado.

No Brasil, a política para a produção e exploração de terras raras foi elaborada dentro dos marcos do Plano Nacional de Mineração 2030 (BRASIL, 2011) e apresenta como visão de futuro da cadeia produtiva nacional de ímãs de terras raras, horizonte 2030, a produção de ímãs a partir de terras raras nacionais, obedecendo aos princípios da sustentabilidade (CGEE, 2013). A adoção dos princípios circulares na cadeia nacional de ímãs têm potencial de contribuir para reduzir a extração primária de recursos e minimizar os impactos ambientais e sociais relacionados à produção de ímãs.

Por sua vez, o aumento da demanda de ímãs de Nd-Fe-B, ocasionado pela difusão de veículos elétricos híbridos (HEVs), veículos totalmente elétricos (EVs) e turbinas eólicas, reforça a necessidade de investir em estratégias de manutenção e recuperação do valor de ímãs pós-consumo. Neste cenário, os indicadores circulares são de suma importância para orientar ações de modo a aumentar a circularidade dos ímãs de Nd-Fe-B, assim como da cadeia nacional de ímãs de terras raras.

5. Considerações finais

Estima-se que nos próximos anos a demanda por ímãs de Nd-Fe-B aumente em níveis expressivos devido a difusão de tecnologias verdes, como carros elétricos e turbinas eólicas. Neste contexto, a adoção dos princípios da economia circular na indústria é tida como uma estratégia para garantir o suprimento de elementos de terras raras, matéria-prima da produção dos ímãs, e para minimizar os impactos ambientais do processo produtivo. No entanto, a adoção de estratégias circulares deve ser acompanhada de avaliações, as quais são obtidas a partir de indicadores circulares, a fim de orientar ações de modo a aumentar a circularidade

dos ímãs. Assim, este artigo teve como objetivo compreender o panorama atual dos estudos de indicadores de circularidade no âmbito da indústria de ímãs de Nd-Fe-B. Após a revisão da literatura, verificou-se que esta temática se encontra em fase embrionária, sendo localizado apenas um artigo.

O Brasil está estruturando sua cadeia nacional de ímãs de Nd-Fe-B. De forma a atingir o potencial circular da cadeia, o uso de indicadores circulares se faz necessário. Assim, trabalhos futuros podem direcionar esforços à construção ou adaptação dos indicadores da literatura ao contexto da indústria dos ímãs. Estes indicadores devem considerar o escopo completo da economia circular, estar alinhados com os preceitos da sustentabilidade e ser embasados em dados robustos e confiáveis.

Agradecimentos

Os autores 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

AKERMAN, Alin. Development of Circular Economy Core Indicators for Natural Resources: analysis of existing sustainability indicators as a baseline for developing circular economy indicators. **Royal Institute of Technology: Industrial Ecology**, Stockholm, 2016.

BRACQUENÉ, Ellen; DEWULF, Wim; DUFLOU, Joost R.. Measuring the performance of more circular complex product supply chains. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 154, p. 104608, mar. 2020. Elsevier BV.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Mineração 2030** (PNM – 2030). Brasília: MME, 2011. 178 p.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY – BGS (2015). **Risk list 2015**. United Kingdom. 2015.

BSI - British Standards Institution. **BS 8001:2017. Framework for Implementing the Principles of the Circular Economy in Organizations – Guide**. The British Standards Institution, London, UK (2017)

BUSCH, J.; STEINBERGER, J. K.; DAWSON, D.A.; PURNELL, P.; ROELICH, K. Managing Critical Materials with a Technology-Specific Stocks and Flows Model. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 2, p.1298-1305, 2 jan. 2014. American Chemical Society (ACS).

CAYZER, Steve; GRIFFITHS, Percy; BEGHETTO, Valentina. Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 10, n. 4-5, p. 289-298, 26 jun. 2017. Informa UK Limited.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE (2013). **Usos e aplicações de Terras Raras no Brasil: 2012-2030**. Brasília. 2013. 254 p.; il, 24 cm. ISBN 978-85-60755-64-6.

CORONA, Blanca; SHEN, Li; REIKE, Denise; CARREÓN, Jesús Rosales; WORRELL, Ernst. Towards sustainable development through the circular economy—A review and critical assessment on current circularity metrics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 151, p. 104498, dez. 2019. Elsevier BV.

DIEHL, O.; SCHÖNFELDT, M.; BROUWER, E.; DIRKS, A.; RACHUT, K.; GASSMANN, J.; GÜTH, K.; BUCKOW, A.; GAUß, R.; STAUBER, R.. 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.

ELIA, Valerio; GNONI, Maria Grazia; TORNESE, Fabiana. Measuring circular economy strategies through index methods: a critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 2741-2751, jan. 2017. Elsevier BV.

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: 19 de maio de 2021.

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

EUROPEAN COMMISSION (EC). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. Brussels, 2015.

EVANS, J; BOCKEN, N. **The Circular Economy Toolkit**, 2017. Disponível em: <http://circulareconomytoolkit.org/>.

GARZA-REYES, Jose Arturo; VALLS, Ailin Salomé; NADEEM, Simon Peter; ANOSIKE, Anthony; KUMAR, Vikas. A circularity measurement toolkit for manufacturing SMEs. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 23, p. 7319-7343, 24 dez. 2018. Informa UK Limited.

GLOGIC, Edis; SONNEMANN, Guido; YOUNG, Steven B.. Environmental Trade-Offs of Downcycling in Circular Economy: combining life cycle assessment and material circularity indicator to inform circularity strategies for alkaline batteries. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1040, 20 jan. 2021. MDPI AG.

GOMES, R. C. Potencial de aproveitamento de fontes secundárias para terras-raras: ímãs permanentes. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015. 50p

HARRIS, Steve; MARTIN, Michael; DIENER, Derek. Circularity for circularity's sake? Scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 172-186, abr. 2021. Elsevier BV.

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

KRISTENSEN, Heidi Simone; MOSGAARD, Mette Alberg. A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability? **Journal of Cleaner Production**, v. 243, p. 118531, jan. 2020. Elsevier BV.

KUMAR, Aneesh. Magnets and Magnet Materials: Global Markets. BBC Publishing, 2017. Disponível em: <<https://www.bccresearch.com/market-research/advanced-materials/magnets-magnet-materials-marketsreport.html>> Acesso em: 20 maio. 2020.

LI, Xiang-Yang; GE, Jian-Ping; CHEN, Wei-Qiang; WANG, Peng. Scenarios of rare earth elements demand driven by automotive electrification in China: 2018:2030. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 145, p. 322-331, jun. 2019. Elsevier BV.

MAIO, Francesco di; REM, Peter Carlo. A Robust Indicator for Promoting Circular Economy through Recycling. **Journal of Environmental Protection**, v. 06, n. 10, p. 1095-1104, 2015. Scientific Research Publishing, Inc.,

NIERO, Monia; KALBAR, Pradip P.. Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: a proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 140, p. 305-312, jan. 2019. Elsevier BV.

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.

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development. **Measuring and Managing Results in Development Co-operation**. November 2014.

OLIVEIRA, Carla Tognato de; DANTAS, Thales Eduardo Tavares; SOARES, Sebastião Roberto. Nano and micro level circular economy indicators: assisting decision-makers in circularity assessments. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 455-468, abr. 2021. Elsevier BV.

ÖNAL, M. A. R.; AKTAN, E.; BORRA, C. R.; BLANPAIN, B.; VAN GERVEN, T.; GUO, M. Recycling of Nd-Fe-B magnets using nitration, calcination and water leaching for REE recovery. **Hydrometallurgy**, v. 167, p.115-123, jan. 2017. Elsevier BV.

PARK, Joo Young; CHERTOW, Marian R.. Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. **Journal of Environmental Management**, v. 137, p. 45-53, maio 2014. Elsevier BV.

PAULIUK, Stefan. Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001: 2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 81-92, fev. 2018. Elsevier BV.

YANG, Y.; WALTON, A.; SHERIDAN, R.; GUTH, K.; GAUB, R.; GUTFLEISCH, O.; BUCHERT, M.; STEENARI, B. M.; GERVEN, T. V.; JONES, P. T.; BINNEMANS, K. REE Recovery from End-of-Life Nd-Fe-B Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. **Journal of Sustainable Metallurgy**, v. 3, n. 1, p.122-149, 20 set. 2016. Springer Science and Business Media LLC.

INCT PATRIA. Processamento e Aplicações de Ímãs de Terras Raras para Indústria de Alta Tecnologia. CHAMADA INCT – MCTI/CNPq/CAPES/FAPs N° 16/2014, 2014.

JIN, H.; SONG, B. D.; YIH, Y.; SUTHERLAND, J. W. Sustainable Value Recovery of Nd-Fe-B 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).

SAIDANI, Michael; YANNOU, Bernard; LEROY, Yann; CLUZEL, François. How to Assess Product Performance in the Circular Economy? Proposed Requirements for the Design of a Circularity Measurement Framework. **Recycling**, v. 2, n. 1, p. 6, 3 mar. 2017. MDPI AG.

SAIDANI, Michael; YANNOU, Bernard; LEROY, Yann; CLUZEL, François; KENDALL, Alissa. A taxonomy of circular economy indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 542-559, jan. 2019. Elsevier BV.

SOO, VI Kie; DOOLAN, Matthew; COMPSTON, Paul; DUFLOU, Joost R.; PEETERS, Jef; UMEDA, Yasushi. The influence of end-of-life regulation on vehicle material circularity: a comparison of europe, japan, australia and the us. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 168, p. 105294, maio 2021. Elsevier BV.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries 2021. U.S. **Geological Survey**, 2021.

WALKER, Stuart; COLEMAN, Nick; HODGSON, Peter; COLLINS, Nicola; BRIMACOMBE, Louis. Evaluating the Environmental Dimension of Material Efficiency Strategies Relating to the Circular Economy. **Sustainability**, v. 10, n. 3, p. 666, 1 mar. 2018. MDPI AG.

XAVIER, L. H.; GIESE, E. C.; RIBEIRO-DUTHIE, A. C.; LINS, F. A. F. Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. **Resources Policy**, , n. August, p. 101467, 2019. Elsevier Ltd.