

# INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA – ICV DA PRODUÇÃO DE ÍMÃS PERMANENTES A PARTIR DE UM MINÉRIO BRASILEIRO

## LIFE CYCLE INVENTORY - LCI OF THE PRODUCTION OF PERMANENT MAGNETS FROM A BRAZILIAN ORE

### **Michel Serra Sampaio**

Aluno de Graduação de Engenharia Química, 10º período, Universidade  
Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

Período PIBIC/CETEM: janeiro de 2016 a junho de 2018.

michelserra@eq.ufrj.br

### **Francisco Mariano da Rocha de S. Lima**

Orientador, Engenharia Mineral, D. Sc

flima@cetem.gov.br

### **Giancarlo Alfonso Lovón-Canchumani**

Co-orientador, Planejamento Energético, D. Sc

gcanchumani@cetem.gov.br

## RESUMO

Os ímãs permanentes de NdFeB requerem o uso de Elementos de Terras Raras (ETRs), pois esses elementos apresentam propriedades físico-químicas que são únicas e essenciais para o desenvolvimento de algumas tecnologias, como por exemplo, a energia eólica. No entanto, a produção dos ímãs, e conseqüentemente desses elementos, está associada a muitos problemas ambientais, já que ela consome grandes quantidades de recursos, além de produzir elementos radioativos; por isso, estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) são necessários para determinar os potenciais impactos gerados por essa produção. O objetivo do presente estudo é realizar o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) da produção de 1 quilo de ímãs permanentes a partir de um minério brasileiro, baseado na norma ISO 14040. A metodologia de pesquisa se baseou em dados coletados no Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) em parceria com demais instituições de pesquisa mineral brasileiras, além de dados da literatura. Os resultados do ICV mostraram um consumo de grandes quantidades de  $H_2SO_4$ , HCl e  $NH_4OH$  nas fases iniciais da produção, referentes à obtenção dos óxidos de terras raras, enquanto que nas demais fases referentes à produção do ímã, o uso de insumos demonstrou ser pouco significativo, destacando-se apenas o NaOH por ser uma base forte que eleva a alcalinidade do meio ambiente e interfere na distribuição de nutrientes.

**Palavras-chave:** Inventário do ciclo de vida; ímãs permanentes; minério brasileiro.

## ABSTRACT

NdFeB permanent magnets require the use of Rare Earth Elements (REEs) because these elements exhibit physicochemical properties that are unique and essential for the development of some technologies, such as wind energy. However, the production of magnets, and consequently of REEs, is associated with many environmental problems, since it consumes large amounts of resources, as well as producing radioactive elements; therefore, Life Cycle Assessment (LCA) studies are necessary to determine the potential impacts generated by this production. The objective of the present study is to perform the Life Cycle Inventory (LCI) of the production of 1 kilogram of permanent magnets from a Brazilian ore, based on ISO 14040. The research methodology was based on data collected at the Mineral Technology Center (CETEM) in partnership with other Brazilian mineral research institutions, in addition to literature data. The results of the LCI showed a consumption of significant amounts of  $H_2SO_4$ ,

HCl and NH<sub>4</sub>OH in the initial stages of production related to the production of rare earth oxides, whereas in the other phases related to the magnets production, the use of inputs proved to be insignificant; one highlights only NaOH as a strong base that raises the alkalinity of the environment and interferes on the nutrients distribution.

**Keywords:** Life cycle inventory; permanent magnets; Brazilian ore.

## 1. INTRODUÇÃO

Os ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B ou simplesmente NdFeB) são compostos por cerca de 31-32% em peso de Elementos de Terras Raras (ETRs), principalmente Neodímio (Nd) e Praseodímio (Pr). Esses elementos são fundamentais para a produção do ímã e refletem o consumo e produção do mesmo ao redor do mundo: as propriedades únicas dos ETRs levaram ao surgimento de diversas tecnologias e à consequente dependência mundial desses recursos minerais (Yang et al., 2017).

Os ímãs de NdFeB são considerados os melhores ímãs disponíveis desde a sua introdução no mercado em 1984, pois, quando comparado a outros ímãs permanentes como o Alnico e Ferrite, esses ímãs oferecem campos magnéticos substancialmente mais fortes por volume, o que os torna altamente eficientes e adequados para produtos de alto desempenho e outras aplicações que requerem projetos compactos. Por isso, eles são amplamente utilizados em turbinas eólicas, veículos híbridos e elétricos, aparelhos elétricos domésticos, discos rígidos de computadores e vários outros pequenos dispositivos eletrônicos de consumo (Jin et al., 2016).

Os ímãs permanentes NdFeB são indispensáveis para a sociedade tecnológica atual, e essa dependência só tende a aumentar. No entanto, a produção de ETRs e do ímã é dominada pela China e o risco desse monopólio já foi amplamente reconhecido. Em 2010, por exemplo, o Japão experimentou uma falta crítica de elementos de terras raras devido a um conflito geopolítico com a China. Atualmente, países como EUA, Japão e a União Europeia estudam os seus recursos minerais e estão desenvolvendo planos para responder a futuras faltas e interrupções nos seus fornecimentos (Jin et al., 2016).

Apesar da sua importância fundamental em várias indústrias, até o momento houve pouca ênfase na análise de sistemas ambientais da produção de ETRs. Além disso, uma vez que a maioria dos dispositivos elétricos e eletrônicos domésticos é atualmente triturada ao ser descartada, o seu conteúdo magnético, contendo principalmente ferro e neodímio, tende a acabar no fluxo de resíduos de metais ferrosos, que é muito diluído para uma recuperação de ETRs economicamente viável (Yang et al., 2017).

Dada a necessidade crítica de avaliações de sustentabilidade ambiental da produção de ímãs permanentes, o presente trabalho tem como objetivo realizar o inventário do ciclo de vida da produção de 1 quilo desses ímãs a partir de um minério brasileiro utilizando a metodologia da ACV, especificamente a fase II segundo a norma ISO 14040 (2009), a fim de avaliar os insumos mais utilizados e suas consequências para o meio ambiente.

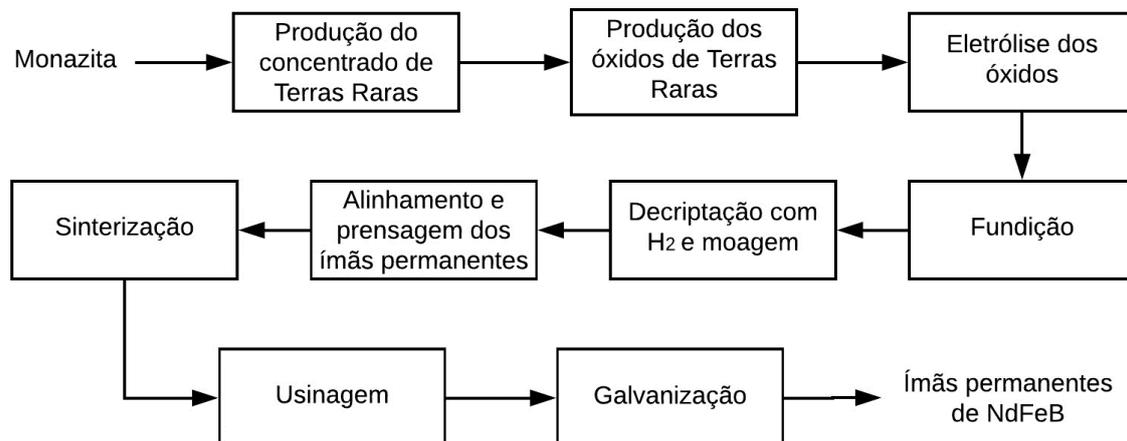
## 2. OBJETIVO

O objetivo do presente estudo é realizar o inventário do ciclo de vida (ICV) da produção de 1 quilo de ímãs permanentes a partir de um minério brasileiro, com o intuito de conhecer os maiores consumos de matéria-prima e as emissões do processo.

## 3. METODOLOGIA

Com base na ISO 14040 (2009) e de acordo com a metodologia da ACV, a unidade funcional definida é a produção de 1 quilo de ímãs permanentes de NdFeB com revestimento. Para efeito de cálculos, foi considerada que a obtenção da monazita utilizada na produção de ETRs ocorreu a partir do resíduo de beneficiamento do nióbio com as características de Araxá/Minas Gerais, ou seja, toda a fase referente à extração da monazita da mina foi descartada. Com o uso do banco de dados Ecoinvent 3.0, dos dados coletados no Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

(Shaw, 1953; Da Cunha & Wildhagem, 2016) e aliados ao relatório técnico fornecido pela Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG, 2016), criou-se o diagrama com as fases da produção conforme a Figura 1.



**Figura 1:** Diagrama das fases da produção de ímãs permanentes.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra o resultado do ICV para a produção de 1 quilo de ímãs permanentes.

**Tabela 1:** ICV da produção de ímãs permanentes a partir de um minério brasileiro.

Fase 1: Produção do concentrado de ETRs			
Entradas		Saídas	
Monazita	9,84 kg	Tório	393,60 g
Ácido Sulfúrico H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 93%	15,36 kg	Urânio	14,76 g
Amônia NH <sub>3</sub> 28%	1,986 kg	Sílica	295,20 g
Água	167,28 L		
Fase 2: Produção dos óxidos de terras raras			
Entradas		Saídas	
Concentrado de ETRs	30,84 L	Óxido de Lantânio	1 kg
Ácido Clorídrico HCl 37%	322,92 L	Óxido de Cério	1 kg
Hidróxido de Amônio NH <sub>4</sub> OH 25%	298,98 L	Óxido da Fração Média	1 kg
		Óxido da Fração Pesada	1 kg
Fase 3: Eletrólise dos óxidos			
Entradas		Saídas	
Óxidos de Neodímio (80%) e Praseodímio (20%)	1,249 kg	Monóxido/Dióxido de Carbono CO/CO <sub>2</sub>	7,9 g
NdPrF <sub>3</sub>	0,1 kg	Ácido Fluorídrico HF	1,2375 kg
Ácido Fluorídrico HF	0,01 kg	Fluoreto de Cálcio CaF <sub>2</sub>	0,05 kg
Grafite	0,3 kg	Sulfato de Cálcio CaSO <sub>4</sub>	6,7 g
Cal	44,45 g	(Nd,Pr)O fino	55,6 g

**Tabela 1:** ICV da produção de ímãs permanentes a partir de um minério brasileiro (Continuação).

<b>Fase 4: Fundição</b>			
Entradas		Saídas	
(Nd, Pr) metálico (30%)	0,3 kg	Argônio Ar	0,1 kg
Argônio Ar	0,1 kg	(Nd,Pr) metálico - emissão	0,5 g
Ferro Fe (69%)	0,69 kg		
Boreto de Ferro FeB (1%)	0,01 kg		
<b>Fase 5: Decriptação com H<sub>2</sub> e moagem</b>			
Entradas		Saídas	
(Nd,Pr)FeB	1 kg	Argônio Ar	0,1 kg
Argônio Ar	0,1 kg	Nitrogênio N <sub>2</sub>	0,0175 kg
Nitrogênio N <sub>2</sub>	0,0175 kg	Vapor d'água	0,04 kg
Hidrogênio H <sub>2</sub>	5 g	(Nd,Pr)FeB – emissão	0,5 g
<b>Fase 6: Alinhamento e prensagem</b>			
Entradas		Saídas	
(Nd,Pr)FeB fino	1 kg	Argônio Ar	0,1 kg
Argônio Ar	0,1 kg	Borracha Natural	5 g
		(Nd,Pr)FeB fino – emissão	0,5 g
<b>Fase 7: Sinterização</b>			
Entradas		Saídas	
(Nd,Pr)FeB pó compacto	1 kg	Argônio Ar	0,05 kg
Argônio Ar	0,05 kg	(Nd,Pr)FeB particulado fino – emissão	0,25 g
<b>Fase 8: Usinagem</b>			
Entradas		Saídas	
(Nd,Pr)FeB sinterizado	1 kg	Cavaco	30 g
Óleo	6 g	Diamante para corte	0,5 g
Água	127 g	Elemento filtrante	5 g
Diamante para corte	0,5 g	Fluido de corte da filtragem	0,6 g
<b>Fase 9: Galvanização</b>			
Entradas		Saídas	
(Nd,Pr)FeB usinado	1 kg	Lodo	0,655 kg
Água	3,5 kg	Água Residual	0,192 kg
Hidróxido de Sódio NaOH	0,896 kg	(Nd,Pr)FeB com revestimento (galvanizado)	1 kg
Sulfato de Níquel NiSO <sub>4</sub>	0,21 kg		
Cloreto de Níquel NiCl <sub>2</sub>	0,21 kg		
Ácido Bórico H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,105 kg		
Sulfato de Cobre CuSO <sub>4</sub>	0,0875 kg		
Ácido Sulfúrico H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,175 kg		

Ao analisarmos a Tabela 1, podemos notar que os maiores consumos de matéria-prima se referem às duas primeiras fases de produção do concentrado e dos óxidos de terras raras, em que se destacam  $H_2SO_4$ ,  $HCl$  e  $NH_4OH$ . Isso ocorre porque a extração dos óxidos a partir da monazita é extremamente intensiva e o volume de minério utilizado é elevado, o que exige grandes quantidades de insumos para que a obtenção dos óxidos seja possível. Além disso, nessas fases há a produção de elementos radioativos, o que pode causar grandes impactos ao ambiente e ao ser humano. Por sua vez, embora nas demais fases o Argônio também esteja bastante presente, esse gás é inerte e não oferece riscos ao meio ambiente, ao passo que os demais insumos aparecem em quantidades pouco significativas, destacando-se apenas o  $NaOH$  por ser uma base forte que em contato com o solo ou água provoca elevação do pH e a degradação do meio ambiente.

## 5. CONCLUSÕES

Realizou-se o ICV da produção de 1 quilo de ímãs permanentes a partir de um minério brasileiro, cujos resultados demonstraram o uso de grandes quantidades de  $H_2SO_4$ ,  $HCl$  e  $NH_4OH$  nas fases referentes à obtenção dos óxidos de terras raras, enquanto que nas fases referentes à produção do ímã o uso de insumos demonstrou ser pouco significativo, destacando-se apenas o  $NaOH$  por ser uma base forte que eleva a alcalinidade do meio ambiente e interfere na distribuição de nutrientes. Esse ICV mostrou ser de extrema relevância para esse tipo de estudo, pois poucos dados estão disponíveis na literatura e nas bases de dados de ACV para o caso brasileiro. Com o inventário, é possível realizar posteriores estudos a fim de evidenciar e avaliar os impactos ambientais causados por essa cadeia produtiva para a realidade do Brasil.

## 6. AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq, pela bolsa concedida e pelo apoio à pesquisa; aos meus orientadores e co-orientadores, que me ajudaram a desenvolver o presente trabalho; aos meus amigos e familiares, que me deram suporte e motivação durante o projeto; e a Deus, por ter permitido que o trabalho fosse concluído com sucesso.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estruturas. NBR ISO 14040, 2009.

CODEMIG – Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. Viabilização de um laboratório-fábrica de ímãs de terras raras no Brasil. **Relatório Técnico**, 241p, 2016.

DA CUNHA, J.W.S.D.; WILDHAGEN, G.R. da S. Elaboração de modelo de produção de elementos e óxidos de terras raras. **CW Consultoria Química e Ambiental LTDA – Relatório técnico**, 21p, 2016.

JIN, H.; AFIUNY, P.; MCINTYRE, T.; YIH, Y.; SUTHERLAND, J.W. Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Magnets: Virgin Production versus Magnet-to-Magnet Recycling. **Procedia CIRP** **48**, 2016, 45 – 50.

SHAW, K.G. A process for separating thorium compounds from monazite sands. **Retrospective Theses and Dissertations**, paper 12740, 1953.

YANG, Y.; WALTON, A.; SHERIDAN, R.; GÜTH, K.; GAUß, R.; GUTFLEISCH, O.; BUCHERT, M.; STEENARI, B.M.; GERVEN, T.V.; JONES, P. T.; BINNEMANS, Koen. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. **Journal of Sustainable Metallurgy**, 2017, 3:122–149.