

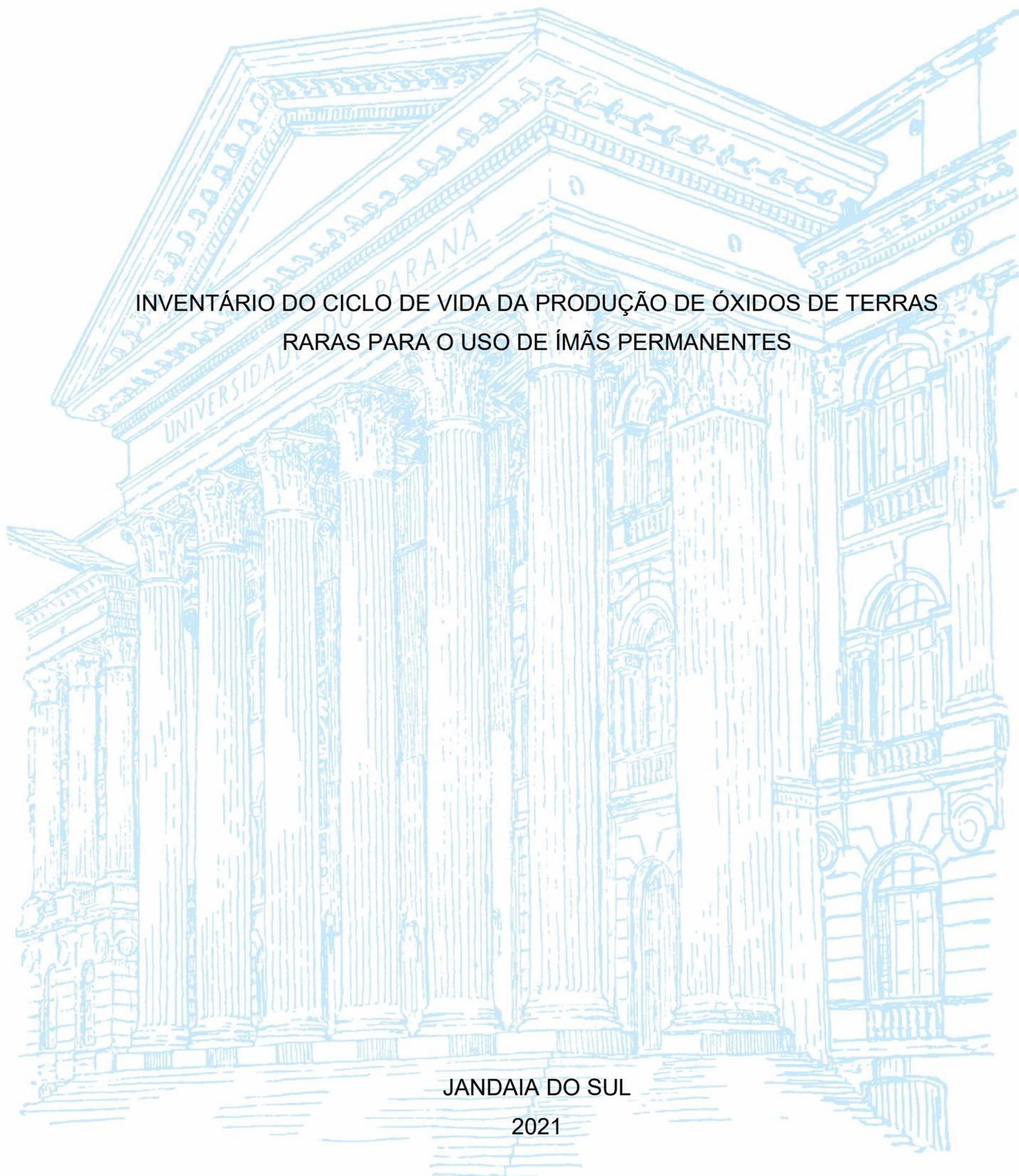
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THAMIRES MARTINHO PRADOS

INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ÓXIDOS DE TERRAS  
RARAS PARA O USO DE ÍMÃS PERMANENTES

JANDAIA DO SUL

2021



THAMIRES MARTINHO PRADOS

INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ÓXIDOS DE TERRAS  
RARAS PARA O USO DE ÍMÃS PERMANENTES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao curso de Graduação em Engenharia de Produção, Campus de Jandaia do Sul, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Giancarlo Alfonso Lovón Canchumani.

JANDAIA DO SUL

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

**PARECER Nº** 61 - THAMIRES MARTINHO PRADOS/2022/UFPR/R/JA/CCEP  
**PROCESSO Nº** 23075.079917/2019-87  
**INTERESSADO:** THAMIRES MARTINHO PRADOS

TERMO DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Título: INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS PARA O USO DE ÍMÃS PERMANENTES

Autor(a): THAMIRES MARTINHO PRADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau no curso de Engenharia de Produção, aprovado pela seguinte banca examinadora.

Dr. Giancarlo Alfonso Lovón Canchumani (Orientador)

Dr. André Luiz Gazoli de Oliveira

Dr. William Rodrigues dos Santos



Documento assinado eletronicamente por **WILLIAM RODRIGUES DOS SANTOS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/05/2022, às 14:33, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **ANDRE LUIZ GAZOLI DE OLIVEIRA, VICE-DIRETOR(A) DO CAMPUS AVANÇADO DE JANDAIA DO SUL - JA**, em 30/05/2022, às 14:35, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **GIANCARLO ALFONSO LOVON CANCHUMANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/05/2022, às 14:37, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **4559244** e o código CRC **73D93576**.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA JANDAIA DO SUL

Prados, Thamires Martinho

Inventário do ciclo de vida da produção de óxidos de terras raras para o uso de ímãs permanentes. / Thamires Martinho Prados. – Jandaia do Sul, 2021.

1 recurso on-line : PDF.

Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Paraná, Campus Jandaia do Sul, Graduação em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Giancarlo Alfonso Lovón Canchumani.

1. Elementos de terras raras. 2. Impactos ambientais. 3. Avaliação do Ciclo de Vida. I. Canchumani, Giancarlo Alfonso Lovón. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDD: 658.5

Bibliotecário: César A. Galvão F. Conde - CRB-9/1747

Dedico aos meus pais, por toda dedicação, carinho e incentivo que tive para a conclusão do curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Dedico primeiramente a Deus por ter me dado forças em todos os meus momentos.

Aos meus pais que sempre me apoiaram em todas as decisões que tomei e sempre tive o incentivo necessário para continuar.

Ao meu orientador Prof. Dr. Giancarlo Alfonso Lovón Canchumani por toda dedicação, por todo ensinamento e paciência que teve comigo ao passar do ano.

## RESUMO

Os ímãs permanentes de terras raras são utilizados cada vez mais em tecnologias limpas, energia, produtos eletrônicos, veículos elétricos, turbinas eólicas, aeroespacial, ímãs de trens de alta velocidade, entre outros. No entanto, a produção de elementos de terras raras, consome muitos insumos e energia, gerando impactos ambientais por causa da sua produção, devido aos resíduos e a concentração de elementos radioativos, por isso, é necessário a realização do estudo de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), para determinar os potenciais impactos gerados por essa produção. O objetivo do presente trabalho é avaliar o inventário do ciclo de vida da produção de óxidos de terras raras para subsidiar a avaliação do ciclo de vida do uso de ímãs permanentes, e apresentar um cenário da quantificação dos aspectos ambientais. A metodologia utilizada foi baseada na norma ISO 14040 e ISO 14044, e o método ReCiPe para avaliação dos impactos ambientais. Para tratamento de dados e avaliação de impacto foram utilizados o banco de dados Ecoinvent 3.8 e o Software Simapro 9.1.1.7. Como resultado do trabalho, pode-se concluir que os cenários de avaliações de impactos com os inventários desenvolvidos, as principais categorias de impacto são a toxicidade cancerígena humana e a formação de ozônio.

Palavras-chave: Elementos de terras raras. Impactos Ambientais. Avaliação do Ciclo de Vida.

## ABSTRACT

*Rare earth permanents are increasingly used in clean technologies, enerfy, electronics, electric vehicles, wind turbines, aerospace, high-speed train magnets, among others. However, the production of rare earth elements consumes a lot of inputs and energy, generating environmental impacts because of its production, due to the losses and concentration of radioactive elements, therefore, it is necessary to carry out the cycle assessment study (LCA), to determine the potential impacts generated by this production. The objective of the present work is to evaluate the life cycle inventory of the production of rare earth oxides to support the evaluation of the life cycle of the use of permanent magnets, and to present a scenario of the quantification of the environmental aspects. The methodology used was based on ISO 14040 and ISO 14044, and the ReCiPe method for assessing environmental impacts. For data processing and impact assessment, the Ecoinvent 3.8 database and the Simapro 9.1.1.7 software werw used. As a result of the work, it can be concluded that the impact assessment scenarios with the inventories developed, the mais impact categories are human carcinogenic toxicity and ozone formation.*

**Keywords:** Rare earth elements. Environmental Impacts. Life Cycle Assessment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - ESTRUTURA DA PESQUISA.....	17
Figura 2 - MODELO DE PESQUISA DA ACV .....	21
Figura 3 - PROCESSO DE EXTRAÇÃO DE ETRs, DA EXTRAÇÃO DO MINÉRIO À OBTENÇÃO DE LIGAS. ....	24
Figura 4 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DE Nd-Fe-B.....	24
Figura 5 - METODOLOGIA ACV .....	34
Figura 6 - PROCEDIMENTO PARA GERAÇÃO DO INVENTÁRIO .....	35
Figura 7 - SISTEMA DA PRODUÇÃO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS .....	41
Figura 8 - REDE ACV.....	46

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - COMPARAÇÃO .....	48
Gráfico 2 - NORMALIZAÇÃO .....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - QUADRO DE BIBLIOGRAFIA - ACV .....	27
Quadro 2 - QUADRO DE BIBLIOGRAFIA - ÍMÃS PERMANENTES.....	29
Quadro 3 - CARACTERIZAÇÃO .....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - INVENTÁRIO DE CONCENTRADO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS GLOBAL.....	36
Tabela 2 - INVENTÁRIO DA PRODUÇÃO DOS ÓXIDOS DE NEODÍMIO .....	38
Tabela 3 - RESULTADO DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE CONCENTRADOS DE TERRAS RARAS ADAPTADO COM A REALIDADE BRASILEIRA.....	42
Tabela 4 - INVENTÁRIO DO ÓXIDO DE NEODÍMIO A PARTIR DO CONCENTRADO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS NO BRASIL. ...	44

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	- Avaliação do ciclo de vida
AIA	- Avaliação do Impacto Ambiental
CETEM	- Centro de Tecnologia Mineral
ETR	- Elemento de Terras Raras
GEE	- Gases de Efeito Estufa
ICV	- Inventário do ciclo de vida
IDA	- Indicador de desempenho ambiental
ITR	- Ímãs de Terras Raras
PNDA	- Política Nacional do Meio Ambiente
NEPA	- National Environmental Policy Act
REGINA	- Rare Earth Global Industry and New Applications
TR	- Terras Raras

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA .....	14
1.3 OBJETIVO.....	15
1.3.1 Objetivo geral .....	15
1.3.2 Objetivos específicos.....	16
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA .....	16
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
2.1 GESTÃO AMBIENTAL .....	18
2.1.1 FERRAMENTAS DA GESTÃO AMBIENTAL .....	19
2.1.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	20
2.2 SETOR DE ÍMÃS PERMANENTES DE TERRAS RARAS .....	21
2.2.1 HISTÓRICO SOBRE TERRAS RARAS .....	21
2.2.2 HISTÓRICO SOBRE TERRAS RARAS .....	23
2.2.3 ACV LIGADA A ÍMÃS PERMANENTES DE TERRAS RARAS .....	25
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>33</b>
3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	33
3.2 METODOLOGIA ACV .....	33
3.2.1 OBJETIVO E ESCOPO .....	34
3.2.2 INVENTÁRIO .....	35
3.3 COLETA DE DADOS .....	39
<b>4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>40</b>
4.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO .....	40
4.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO.....	42
4.3 CENÁRIO DE AVALIAÇÃO.....	45
4.3.1 CARACTERIZAÇÃO .....	47
4.3.2 CARACTERIZAÇÃO .....	48
4.3.3 NORMALIZAÇÃO.....	49
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>52</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Sampaio (2017), os elementos de terras raras (ETR), são um grupo de 17 metais que apresentam propriedades físicas e químicas, que apresentam a transição para um novo paradigma tecnológico contidas no Brasil, está em estudo para ser utilizado em aplicações como ímãs permanentes, tecnologias limpas, energia, produtos eletrônicos, veículos elétricos, turbinas eólicas, aeroespacial, ímãs de trens de alta velocidade, entre outros.

Conforme Jin et al. (2018), a China representa 95% da produção global de terras raras e possui o monopólio (cerca de 90% das terras raras usadas nos EUA) e a indústria doméstica consome cerca de 60%. Na China, os elementos de terras raras são recuperados como um subproduto da mineração de ferro.

No Brasil, existe o setor de terras raras composto por 15 elementos dos lantanídeos, agrupando a eles o ítrio (Y) e o escândio (Sc). Porém foi observado que apenas a monazita, bastnasita, o xenotímio e as argilas iônicas tem concentrações significativas para serem exploradas (KOLTUN e THARUMARAJAH, 2014).

Os elementos de terras raras consomem muitos insumos e energia, causando assim grandes impactos ambientais decorrentes de sua produção, devido aos resíduos e as concentrações encontradas nos seus elementos, por possuir grande radioatividade. Possui baixa disponibilidade geológica, limitada substituíbilidade e baixo potencial de reciclagem (ZAIMES, 2014).

Para serem considerados elementos críticos, os ímãs de neodímio (Nd), ferro (Fe) e boro (B) são constituídos de aproximadamente 30 a 40% em peso de metais de terras raras (USGS, 2020).

No entanto, é necessário fazer avaliações da sustentabilidade ambiental da produção de ímãs permanentes. A metodologia que pode ser utilizada para a verificar o consumo de recursos e as emissões poluentes para o meio ambiente do material é a avaliação do ciclo de vida (ACV), baseada na norma ISO 14040 e ISO 14044.

O inventário do ciclo de vida (ICV) é a base do estudo de uma ACV, em que toda a energia e matérias-primas são descritas e quantificadas, assim como as emissões durante a vida do produto ou processo. De acordo com Koltun e Tharumarajah (2014), com o inventário é possível conhecer onde estão as maiores

emissões e consumos de matéria-prima e assim determinar proporcionalmente o impacto ambiental causado por cada um deles.

Para o Brasil, detentor da terceira maior reserva de terras raras, foi utilizado a produção de mil toneladas e como resultado foi obtido estatisticamente a representação de 0,4% da produção mundial (USGS, 2021).

Segundo Wang et al., (2019), houve poucas pesquisas sobre o ICV e a avaliação dos impactos da produção de ETRs, principalmente sobre os ímãs permanentes.

De acordo com estudos de Raspini (2021), o ímã de neodímio, ferro e boro, está em desenvolvimento, procurando assim considerar estratégias circulares no pós-consumo, como o reuso e a remanufatura, assim como no uso e aplicações dos ímãs de terras raras.

## 1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

O Brasil encontra dificuldades para o estudo da produção de ímãs permanentes. Para encontrar possíveis soluções, está sendo introduzido a metodologia ACV, que tem por objetivo estudar todo o processo da produção dos elementos de terras raras, observando assim possíveis impactos com a sua produção, fazendo com que seja possível propor medidas mitigadoras para tornar a produção mais sustentável.

Este é um estudo novo que está sendo introduzido e ainda muito pouco explorado no Brasil, gerando assim grandes dificuldades em ter um acesso aos bancos de dados.

Quais são os impactos ambientais identificados nas etapas da produção de ímãs permanentes a partir de um minério brasileiro?

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo estudos de Sampaio (2017), em relação ao Brasil, existem reservas minerais de terras raras, porém não tem como competir com a China, com produção em larga escala e com preços equivalentes, isso faz com que estudos sobre a sua produção esteja carente de dados sólidos que reflitam as características minerais do Brasil.

Ainda sobre Sampaio (2017), a produção de ligas metálicas requer o uso de ETRs, pois nesses elementos são encontrados propriedades primordiais para conseguir desenvolver diversas tecnologias, tais como a produção de ímãs permanentes quando utilizados por exemplo em turbinas eólicas.

Porém é necessária atenção, os ETRs são matérias primas críticas, com alto risco de suprimento, por possuírem uma baixa substituíbilidade e um potencial de reciclagem baixo. Numa visão global, a China é detentora de mais de 90% da produção global de ETRs, mas o Brasil possui reservas exploráveis, o que introduz o país nesse mercado, assim faz com que seja necessário realizar pesquisas e introduzir tecnologias para começar a produção de ligas metálicas e de ímãs permanentes (ADIBI, 2019).

Conforme Koltun e Tharumarajah (2014), a China tem o monopólio dos ETRs, porém essa perspectiva pode ser alterada, pois o governo chinês introduziu redução de quotas de exportação desde 2004/2005 por razões de preocupação ambiental e de conservação de recursos.

Com a China dominando pode ser um risco para o fornecimento desses elementos para os fabricantes de energia renovável (JIN, 2018).

Visando com que o Brasil possa ter uma produção de ímãs permanentes em larga escala e com preços acessíveis, vários estudos, como o projeto REGINA (*Rare Earth Global Industry and New Applications*), estão sendo feitos para conseguir atingir esse objetivo. Inserindo assim o país em um mercado com enorme potencial econômico e com desenvolvimento de pesquisas e tecnologias para a produção.

Tornando-se assim a chave para a produção de novos produtos de alta tecnologia como a produção de energia eólica, produtos eletrônicos, veículos elétricos, a parte aeroespacial, ímãs de trens de alta velocidade, motores, entre outros.

### 1.3 OBJETIVO

#### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar o inventário do ciclo de vida da produção de óxidos de terras raras para subsidiar a avaliação do ciclo de vida do uso de ímãs permanentes.

### 1.3.2 Objetivos específicos

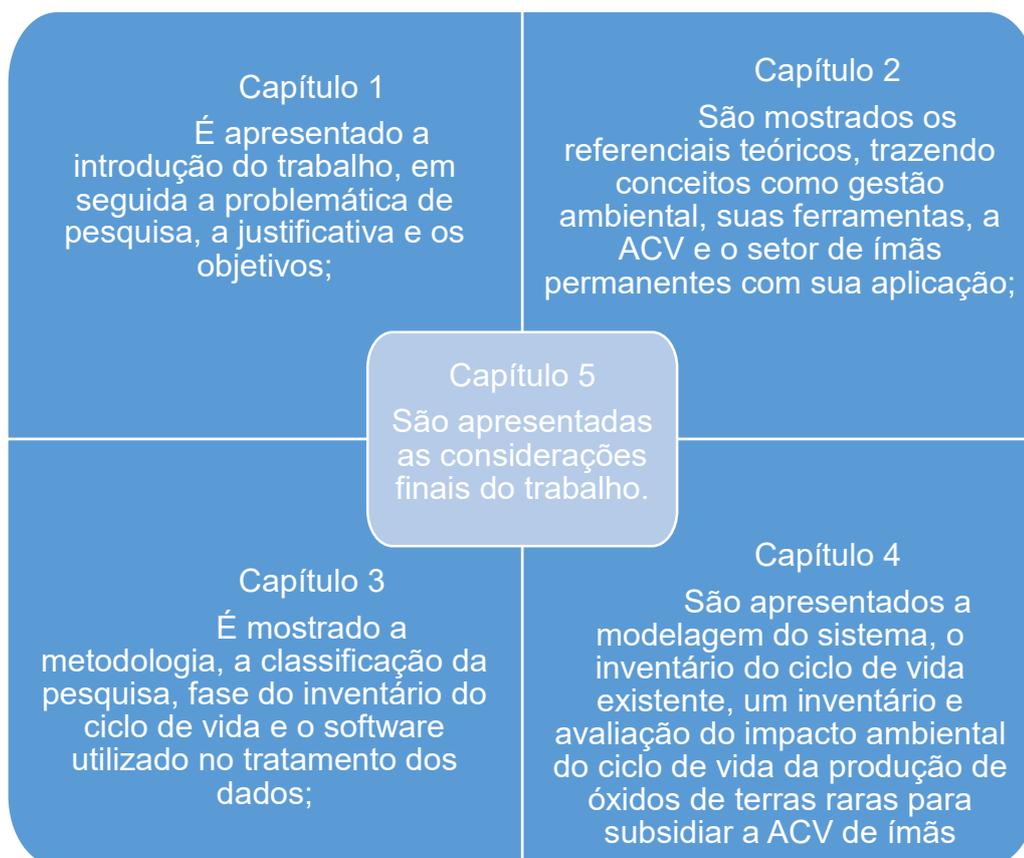
Para conseguir alcançar o objetivo geral deste trabalho serão realizados quatro objetivos específicos:

- Mapear o processo produtivo dos óxidos de terras raras utilizado em ímãs permanentes;
- Levantamento dos principais inventários do ciclo de vida através do banco de dados EcolInvent;
- Modelagem do sistema de óxidos de terras raras para produção de ímãs permanentes;
- Elaborar um inventário do ciclo de vida da produção dos óxidos de terras raras para a produção de ímãs permanentes com a realidade brasileira;
- Avaliar o cenário dos impactos ambientais da produção de óxidos de terras raras.

### 1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa é composta por cinco capítulos, na Figura 1 a seguir é apresentada a composição de cada um:

Figura 1 - ESTRUTURA DA PESQUISA



FONTE: A autora (2022).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 GESTÃO AMBIENTAL

A gestão ambiental é formada por procedimentos e atividades que possuem o objetivo de unir o desenvolvimento com a qualidade ambiental, possuindo o papel de punir quem polui e ainda por cima preservar os recursos naturais, buscando a redução dos danos ou problemas causados pelas ações antrópicas (SOUZA, 2000).

Conforme a Confederação Federal Brasileira, a gestão ambiental garante um meio ambiente ecologicamente equilibrado a população (Brasil, 1988).

A avaliação do impacto ambiental (AIA) surgiu no National Environmental Policy Act (Nepa) nos Estados Unidos, em 1969, criando projetos que levaram em consideração os impactos sobre o meio ambiente na tomada de decisão. Em 1981, no Brasil, foi instituída a política nacional do meio ambiente (PNMA) e assim consolidaram a avaliação do impacto ambiental (AIA), que visa verificar as atividades que quando instaladas, possam causar degradação ao meio ambiente (SÁNCHEZ, 2013).

No Brasil, o documento de maior importância para a gestão ambiental é o PNMA, instituída pela Lei 6.938 de 1981. Tem por objetivo “a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia a vida, visando assegurar, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana” (BRASIL, 1981).

Para Floriano (2007), a gestão ambiental pública deve ter como o objetivo a ruptura de conflitos sociais que englobam questões ambientais, a fim de obter a conservação dos recursos para as próximas gerações.

Segundo Maimon (1996) estudos feitos revelam as empresas que adequam seus modelos para medidas relevantes à gestão ambiental com fins institucionais tem prioridades nos próximos passos a gestão e ao investimento nas empresas brasileiras.

Conforme Floriano (2007) para a gestão ambiental empresarial são feitas normas elaboradas, contendo escopo para uma melhoria continua do desempenho ambiental, de forma a suprir necessidades, como também interesses da sociedade em relação à proteção do meio ambiente.

Conforme Sanches (2011), o modelo de gestão ambiental empresarial mais propagado no Brasil é proposto pelas normas da série ISO 14000, que padronizam procedimentos para a implantação da gestão ambiental.

De acordo com US Geological Survey (2018) o mundo vem passando por diferentes mudanças climáticas e isso acaba gerando enormes desafios para a humanidade, uma proposta de melhoria, seria a redução da emissão de gases efeito estufa e aumentar a participação de tecnologias de energia renovável.

Conforme Ali (2014), mesmo não havendo estudos suficientes sobre a mineração de terras raras e suas consequências, observou-se os riscos sociais à saúde causados pela eliminação de tório durante a mineração.

Como a China é o maior produtor mundial de terras raras, os problemas ambientais causados pela produção, tem sido amplamente discutido, e como resultado obtiveram que a produção de terras raras resulta em eutrofização e acidificação, erosão do solo, emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (WENG, 2016).

### 2.1.1 FERRAMENTAS DA GESTÃO AMBIENTAL

Para Mitchell (2004), um indicador é uma ferramenta que para distinguir diversas informações, obtendo os aspectos analisados.

A NBR ISO 14031 sugere dois indicadores na avaliação ambiental, um sendo o indicador de condição ambiental (ICA) e o indicador de desempenho ambiental (IDA).

De acordo com Sanches (2011) os dois instrumentos da gestão ambiental apresentam focos complementares, uma vez que AIA é um instrumento macro, como o foco em planejamento do empreendimento e enquanto as normas possuem o foco mais operacional, aplicadas na fase de operação, com relação ao meio externo.

Estudos feitos por Sanches (2011), os instrumentos de Zoneamento Ambiental, Estudos de Impacto Ambiental e Licenciamento Ambiental para melhor análise do meio ambiente, devem ser utilizadas junto com as ferramentas da ACV.

Essa constatação é confirmada por Graedel (2003), que alega que o sucesso do processo global de gestão ambiental está na execução integrada dessas ferramentas, e não na substituição de uma pela outra.

Uma das ferramentas utilizadas para quantificar e avaliar os impactos ambientais é a ACV que estuda toda a vida do objeto, propondo assim possíveis melhorias de sustentabilidade do processo ou produto (BLENGINI, 2009).

De acordo com Vahidi (2016), por mais que a ACV tenha sido uma abordagem mais abrangente, ela é escassa e não possui inventários específicos.

Segundo Michel (2016) o inventário do ciclo de vida (ICV) é a base do estudo de uma ACV, em que toda a energia e matéria-prima são descritas e quantificadas, podendo ser observada as emissões durante toda a vida do produto ou processo.

Conforme Koltun e Tharumarajah (2014), com o ICV é possível determinar a proporção do impacto ambiental nas matérias-primas e também determinar os coprodutos do processo e analisar o melhor destino para tais, a fim de proporcionar a menor geração de resíduos e efluentes possíveis.

### 2.1.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

De acordo com Vahidi et al., (2016) a avaliação do ciclo de vida é baseada nas normas ISO 14040 (2009) e ISO 14044 (2006), na qual é necessário seguir algumas etapas para sua obtenção:

- 1) Nesta etapa temos a definição de objetivo e escopo, para determinar a intenção de aplicação, o público alvo e a justificativa de condução de cada processo, bem como os limites do sistema da avaliação em questão;

- 2) Seguido para a análise do inventário do ciclo de vida, para a quantificação das entradas e saídas de materiais e/ou energia que são necessários para as várias etapas do processo e os seus resultados correspondentes;

- 3) Conforme a avaliação dos resultados da ACV e seus impactos sobre diferentes parâmetros ambientais para obter uma aproximação quantitativa dos impactos ambientais;

- 4) Por último, temos a interpretação para avaliar e resumir os resultados obtidos a partir dos três primeiros passos a fim de chegar a uma conclusão significativa, bem como determinar as lacunas no estudo.

Para melhor compreensão das etapas da avaliação do ciclo de vida, na Figura 2 ABNT ISO 14040 (2009) tem a estrutura e as aplicações diretas.

Figura 2 - MODELO DE PESQUISA DA ACV



FONTE: ABNT ISO 14040 (2009).

## 2.2 SETOR DE ÍMÃS PERMANENTES DE TERRAS RARAS

### 2.2.1 HISTÓRICO SOBRE TERRAS RARAS

Conforme estudos feitos por Sousa Filho e Serra (2014), o primeiro histórico sobre as terras raras (TR) foi em 1751, através de um sueco chamado Axel Frederik Cronstedt que descobriu um novo mineral chamado de cerita. Para a época acreditou que se tratava de um silicato de cálcio e ferro, pois a TR era desconhecida, confundida com o cálcio. No Brasil, o início da exploração foi em 1885, com a retirada da monazita das praias do Prado, na Bahia. Dos principais minerais que contêm TR, a bastnasita, é o único minério que é primeiramente tratado para a obtenção de TR. A monazita e xenotima são subprodutos das atividades de mineração, e apenas a monazita é de interesse comercial para o Brasil, pois apresentam em maiores quantidades. A China investiu em todas as fases do processo, desde a extração até a obtenção de compostos com elevada pureza elementar (>99%), dominando assim a produção de TR, e sem controle algum da parte ambiental (SOUSA FILHO E SERRA, 2014). Segundo Jin et al., (2018), são comercializados mais de 95% de compostos de TR, sobretudo na forma de metais e óxidos, fazendo com que houvesse alta nos preços, cotas para exportação e favorecendo assim as multinacionais e agregando valor às TR. O aumento da demanda e da incerteza do fornecimento da China aos demais consumidores, fez com que países como Japão, Estados Unidos e Brasil, tentassem acordos mais favoráveis e assim iniciassem gestões internas para retomar a produção de TR. No Brasil, recentemente as TR despertaram o interesse governamental, pela

vulnerabilidade econômica que a ausência dos recursos podem trazer. A percepção de tecnologias limpas (como petróleo e comunicação) são limitadas pela disponibilidade de TR, fazendo com que houvesse iniciativas de diferentes setores.

Os ímãs de terras raras (ITRs), são comumente conhecidos como ímãs permanentes, surgiram no final da década de 1960 (Coey, 2014), tornando possível desenvolver tecnologias de maior eficiência energética, mais leves e menores (JIN, 2018).

Em 1983, a terceira geração de ímãs permanentes surgiu com base na liga Nd-Fe-B (Neodímio, Ferro e Boro) (LALANA, 2018).

Os ímãs permanentes são melhores que os eletroímãs, pois uma vez que seus campos magnéticos são mantidos de forma contínua, sem a necessidade de energia elétrica, devido às correntes elétricas quantizadas incessantes quando associadas aos movimentos orbitais e de rotação das cargas eletrônicas (CALLISTER, 2012).

São produzidos em três cadeias de abastecimento principais de elementos de terras raras (ETR). A China representa 85% da produção de REE ao redor do mundo, com Bayan Obo sendo o maior depósito chinês, em segundo lugar fica a Austrália com apenas 8% da produção mundial, sendo o maior do mundo ocidental, com o depósito MountWeld e em terceiro lugar vem os Estados Unidos com 3% da produção mundial (GAMBOGI, 2016).

De acordo com estudos feitos por Amaral (2014), dados feitos pela IMCOA (*Industrial Minerals Company of Austrália Pty Ltd.*) em 2010 foram consumidas cerca de 26 mil toneladas de óxidos de terras raras para a produção de ímãs.

No ano de 2016 o mercado de ímãs permanentes movimentou U\$14,9 bilhões, para 2021 a expectativa é que o valor aumente para U\$22,67 bilhões, tendo a América do Sul a área com maior taxa de crescimento (CONSTANTINIDES, 2016).

Conforme estudos, o Brasil precisa de uma estratégia para implementar a cadeia produtiva de ímãs permanentes. As reservas brasileiras de Terras- Raras representam menos de 1% do total mundial, somando 40 mil toneladas de Terras- Raras (Weschenfelder, 2012).

Segundo Amaral (2014), para o Brasil é fundamental ter o mercado de ímãs de terras raras, pois o produto é utilizado em carros elétricos e geradores de energia eólica, afim de atingir a mesma potência com geradores ou motores em volume e peso bem menores que o normal.

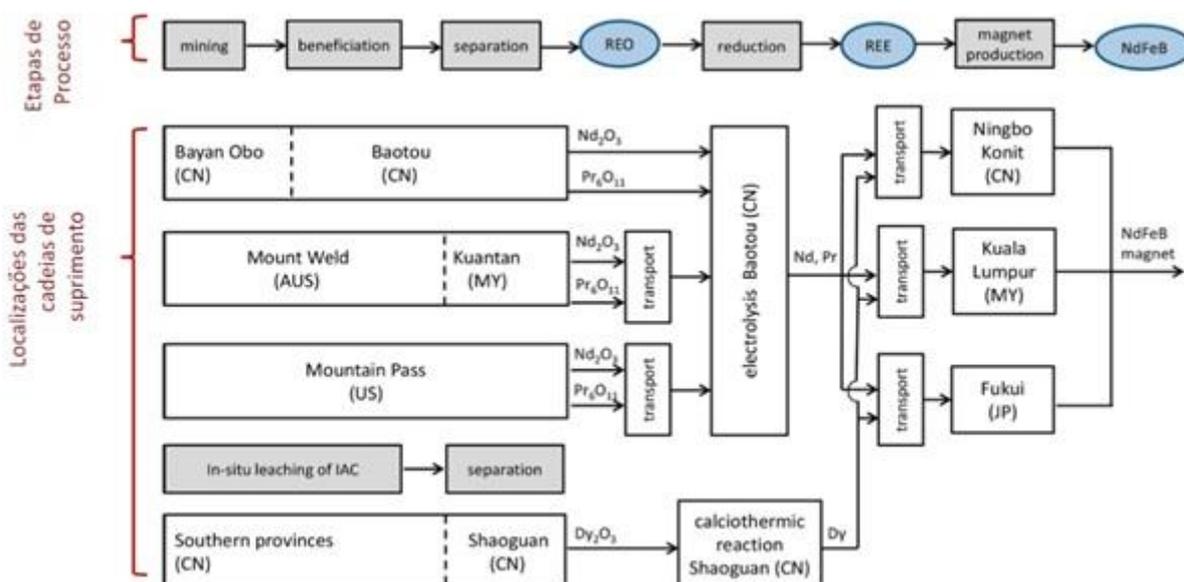
## 2.2.2 HISTÓRICO SOBRE TERRAS RARAS

A produção de ímãs são processos que requerem muito tempo, estudos feitos pela PNUD (2016) mostram que a mineração causa degradação ao meio ambiente quando não realizada de maneira adequada.

As práticas de lavras predatórias não atendem ao aproveitamento integral de uma jazida, acabam excluindo subprodutos, rejeitos e resíduos, normalmente ETRs são obtidos como subprodutos ou coprodutos, como no caso do Brasil (LAPIDO, 2013).

Estudos feitos por Amaral (2014), foi observado conforme a FIGURA 3 abaixo, o processo de obtenção dos elementos de terras raras, incluindo o neodímio. Primeiramente é realizado o processo de extração do minério por procedimentos comuns de mineração. O processo é determinado com o tipo de mineral, disposição física e os outros minerais que estão acoplados. Assim cada minério possui um tipo de extração que o torna viável. Em seguida, na hidro metalurgia, o concentrado é lixiviado e as TR passam da fase sólida para o licor em forma de íons. Logo após receber o concentrado de óxidos lantanídios, deve separar os TR que são desproporcionais. Assim os TR são precipitados como hidróxidos, convertidos à óxidos e finalmente assumem a forma metálica. As TR são associadas a outros metais para produzir as ligas contendo terras-raras.

Figura 3 - PROCESSO DE EXTRAÇÃO DE ETRs, DA EXTRAÇÃO DO MINÉRIO À OBTENÇÃO DE LIGAS.



FONTE: ADAPTADO MARX (2017).

De acordo com estudos, a maioria dos ímãs permanentes de Nd-Fe-B são produzidos pela rota metalúrgica do pó, como apresentado na Figura 4, descrevendo as etapas, conforme (CERTI, 2017).

Figura 4 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DE Nd-Fe-B



FONTE: ADAPTADO CERTI (2017).

Conforme Certi (2017) a primeira etapa é a fabricação de ligas, pode ocorrer pelo método convencional de vazamento em molde metálico ou por técnicas de solidificação, em seguida os flakes produzidos são fragmentados por um triturador.

Logo após ocorre o processamento da liga via decriptação por hidrogênio, que tem por objetivo fragilizar a liga, diminuindo assim o tempo na moagem, gerando as trincas que formam uma fragmentação frágil do material.

Ainda sobre os estudos do Certi (2017), observa-se que as ligas fragmentadas grosseiramente seguem para o processo de moagem mecânica, a fim de obter as partículas monocristalinas. Passam assim por moinhos de jatos para promover o choque entre as partículas, reduzindo assim seu tamanho. Depois ocorre a etapa de compactação com aplicação do campo magnético, após essa etapa são realizadas operações de sinterização e de tratamento térmico, em seguida passa pelo processo de usinagem, necessário para dar finalidade aos ímãs. Como processo final tem a etapa de revestimento e magnetização, que tem por finalidade proteger os ímãs da corrosão.

Nesta etapa de mineração resulta em impactos ambientais significativos, para Diehl et al., (2018), 90% da energia da produção dos ímãs permanentes está na mineração, beneficiamento, extração e separação dos óxidos de terras raras. Tem uma taxa de perda de 50% com rejeitos.

### 2.2.3 ACV LIGADA A ÍMÃS PERMANENTES DE TERRAS RARAS

De acordo com estudos feitos por Marx et al., (2018), os efeitos causados para a produção de 1 kg de ímã são realizados através de uma ACV. O fornecimento de neodímio, praseodímio e disprosio são as piores categorias, pois provocam muitos danos ambientais, sempre tendo destaque para o neodímio como principal causador. A pior qualidade é a ecotoxicidade terrestre, causada na maioria das vezes por agrotóxicos, tem também toxicidade humana, devido a eletrólise e a eutrofização da água doce, sendo causada essa última por emissões de fosfato.

Segundo estudos feitos por Sampaio (2019), em relação ao ICV houve impactos ambientais durante as entradas e as saídas de energia e insumos, tendo o óxido de neodímio e praseodímio com o maior grau significativo em relação ao impacto causado ao meio ambiente. Com isso gera a produção de elementos radioativos, o que aumenta o impacto dos óxidos, na produção de liga metálica teve impacto durante a categoria Formação de Oxidantes Fotoquímicos, devido ao uso de metais e suas emissões.

Para Gwendolyn et al., (2020), foi comparado 1,0 kg de NdFeB com 2,04 kg de samário e cobalto (SmCo), com relação às emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), o SmCo causa 135 kg de CO<sub>2</sub>, enquanto o NdFeB gera 30 kg de emissão. Em relação à toxicidade humana é causado pela torrefação ácida quando se trata do NdFeB e impactado pelo revestimento em níquel quando trata-se da ecotoxicidade aquática e em ao SmCo tem-se a produção de cobalto que difere do NdFeB.

Conforme estudos feitos por Tao et al., (2019), as análises foram feitas em relação a mineração e como consequência obteve resultados para mudanças climáticas terrestres, acidificação, eutrofização matinha, oxidante fotoquímico, formação de material particulado, radiação ionizante e agricultura. O chumbo quando realizado os procedimentos de ACV mostrou grande impacto ambiental em relação a mudanças climáticas. As atividades de mineração causam acidificação terrestre, a barragem de rejeitos, produção de sulfato de cobre e a geração de eletricidade causam toxicidade, eutrofização e ecotoxicidade. A geração de eletricidade é a que resulta em maior impacto das mudanças climáticas.

No QUADRO 1 são apresentados artigos de ACV, aplicado ao setor de ímãs permanentes e de Terras Raras.

Quadro 1 - QUADRO DE BIBLIOGRAFIA - ACV

	<b>AUTOR</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>METODO</b>	<b>LUGAR</b>	<b>RESULTADOS</b>
<b>1</b>	Lima <i>et al.</i> (2017)	Avaliação do ciclo de vida- ACV da produção de elementos terras raras a partir de um minério brasileiro.	Apresentar o estudo de avaliação do ciclo de vida da produção de óxidos de terras raras a partir de um minério brasileiro.	ReCiPe	Brasil	Mostraram um consumo de quantidades significativas de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HCl e NH <sub>4</sub> OH, além da geração de resíduos radioativos de tório e urânio.
<b>2</b>	Lima <i>et al.</i> (2017)	Inventário do ciclo de vida- ICV da produção de ímãs permanentes a partir de um minério brasileiro.	Realizar o inventário do ciclo de vida (ICV) da produção de 1 quilo de ímãs permanentes a partir de um minério brasileiro.	Baseou-se em dados coletados no CETEM e metodologia da ACV.	Brasil	Mostraram um consumo de grandes quantidades de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HCl e NH <sub>4</sub> OH nas fases iniciais da produção, referentes à obtenção de óxidos de terras raras.
<b>3</b>	Sampaio, M.; Lima, F.; Canchumani, G. (2016)	Inventário do ciclo de vida da produção de óxidos de terras raras a partir de um minério brasileiro.	Realizar um inventário do ciclo de vida da produção de elementos de óxidos de terras raras a partir de um minério brasileiro.	Principais normas sobre Avaliação do Ciclo de Vida, plasmadas no texto da norma ISO 14040 e ISO 14044. Banco de dados Ecoinvent.	Brasil	Mostraram um consumo de grandes quantidades de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , HCl e NH <sub>4</sub> OH e a geração de resíduos de tório e urânio, elementos radioativos cujos potenciais de impacto ambiental podem afetar todo o ecossistema no local.
<b>4</b>	Koltun;P, Tharumarajah, A.(2014).	Impacto do ciclo de vida de elementos da Terra Rara.	Investigar o uso de energia de berço para portão, uso de água e impacto do aquecimento global de ETRs.	Eco indicador 99	Bayan Obo, China.	Propõe-se um novo método de alocação baseado em valor econômico para os múltiplos coprodutos de processo.
<b>5</b>	Tao et al. (2019)	Avaliação do ciclo de vida sobre mineração e beneficiamento de minério de chumbo na China.	Avaliar o impacto ambiental específico da mineração e beneficiamento de minério de chumbo-zinco	Avaliação do ciclo de vida (ACV). ReCiPe.	China.	A ecotoxicidade marinha foi identificada como a categoria de impacto ambiental mais predominante.

Continuação....

Continuação....

6	Bartie <i>et al.</i> (2021).	Os recursos, pegada energética e ambiental da economia circular fotovoltaica de silício: Avaliação e oportunidades.	Avaliar o recursos, resíduos e impactos ambientais, econômicos e sociais, estão associados ao crescimento da indústria que utilizam o silício como base.	Simulação de processos, análise de energia, redes neurais, impacto ambiental	União Europeia	A elaboração da indústria fotovoltaica seja impulsionada principalmente pelo custo, este estudo destaca que a economia circular sustentável requer uma lente mais ampla.
7	Marx <i>et al.</i> (2018).	Avaliação comparativa do ciclo de vida da produção de ímãs permanentes do NdFeB a partir de diferentes depósitos de terras raras.	Avaliar os impactos ambientais de NdFeB de diferentes depósitos de terras raras.	ACV	Bayan Obo (China), Mount Weld (Austrália), Mountain Pass (EUA).	O caso de Mountain Pass mostra a eficácia de medidas como evitar produtos químicos através da reciclagem de águas residuais salinas, produção de energia mais limpa .
8	Beylot <i>et al.</i> (2021)	Ligar-desligar a mineração em pequena escala: Desempenho ambiental em uma perspectiva de ciclo de vida.	Avaliar o desempenho ambiental da abordagem SOSO (ligar-desligar) em uma perspectiva de ciclo de vida.	Avaliação do ciclo de vida (ACV).	Europa	A simulação de processos e a utilização da ACV mostra um desenvolvimento promissor para a otimização da cadeia de processos modulares SOSO, com base em critérios ambientais do ciclo de vida e dependendo muito do local da mineração e dos processos.
9	Wang,X.; Ge,J.; Li,J. (2017)	Impactos de mercado das regulamentações ambientais na produção de terras raras: uma análise de equilíbrio geral computável para China.	Simular os impactos de mercado da melhoria da regulamentação ambiental na produção de terras raras na China.	Modelo de equilíbrio geral computável (CGE)	China	Um aumento na regulação ambiental da produção de terras raras teria um impacto negativo na macroeconomia.

FONTE: A autora (2021).

Quadro 2 - QUADRO DE BIBLIOGRAFIA - ÍMÃS PERMANENTES

	<b>Autor</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>LUGAR</b>	<b>RESULTADOS</b>
<b>1</b>	Werker <i>et al.</i> (2019).	Social ACV para ímãs permanentes de terras raras NdFeB.	Avaliar se há diferença nos riscos sociais para a cadeia de valor.	Avaliação do ciclo de vida social.	China, Malásia e Austrália.	Olhando para todas as categorias de impacto social para todas as partes interessadas, a cadeia de processamento dos EUA é a vencedora clara.
<b>2</b>	Raspini, Jéssica (2021).	Barreiras e facilitadores à implementação da economia circular: fortalecimento das cadeias de valor e suprimentos de ímãs de terras raras.	Analisar as principais barreiras e facilitadores à adoção da economia circular pelas cadeias nacionais de valor e suprimentos de ímãs de Nd-Fe-B.	Análise da literatura existente, levantamento e definição conceitual das barreiras e facilitadores da economia circular.	Brasil	Indicam três barreiras principais: 1) rentabilidade financeira de longo prazo; 2) defasagem nas leis e regulamentos; 3) cultura empresarial.
<b>3</b>	Amaral, Juliana (2014.)	Diagnóstico das tendências para o acesso a fontes alternativas de terras raras a partir de produtos acabados: reciclagem de ímãs permanentes	Elaboração de um diagnóstico das tendências para o acesso a fontes alternativas de terras raras sob o aspecto da indústria de ímãs permanentes, para a reciclagem desses produtos acabados.	Análise da literatura.	Brasil	Indica a necessidade de se idealizar um programa reunindo indústrias, universidades e institutos de pesquisa.
<b>4</b>	Giese, Ellen (2017).	Tendências europeias para o uso dos recursos de terras-raras.	Investigar e estabelecer a origem e a utilização dos recursos europeus de Terras-Raras.	Projetos EURARE, EREAN e SOS RARE		O maior desafio europeu é manter o pouco do conhecimento e das tecnologias da cadeia produtiva de Terras-Raras.

Continuação....

Continuação....

5	Bailey <i>et al.</i> (2021).	Inventário do Ciclo de Vida de ímãs Permanentes de samário-cobalto, em comparação com neodímio-ferro-boro conforme usado em veículos elétricos.	As decisões metodológicas tomadas para definir a ACV.	ACV		Os resultados da ACV comparativo para a produção de SmCo5 e para a produção de NdFeB são relatados.
6	Adibi, N.; Lafhaj, Z.; Payet, J. (2019).	Novos fatores de caracterização de avaliação de recursos para elementos de terras raras: aplicado em ímã permanente NdFeB estudo de caso.	Abordar a questão dos fatores de caracterização ausentes (CFs) para REEs na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).	Potencial de Depleção Abiótica (ADP) e ReCiPe.	Bayan Obo	Uma comparação dos CFs desenvolvidos com outros recursos confirma sua compatibilidade.
7	Weschenfelder <i>et al.</i> (2012).	Situação atual e perspectivas da produção de ímãs permanentes e reservas de terras raras: Brasil x Mundo.	Estudar os ímãs permanentes e o quão vantajoso seria utilizar em geração de energia.	P, D&I	Brasil	Primeiramente, é necessário investir em formas de transformar a extração e a fabricação de ímãs de Terras-Raras no Brasil.
8	Mutchen, Daniel (2021).	Estudo comparativo entre rotas de recuperação de elementos terras raras contidos em ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (NdFeB) de hard disk drives.	Determinar uma rota de reciclagem de ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro.	Desmagnetização térmica, moagem, classificação granulométrica, ANOVA	Brasil	Ambas as rotas de recuperação de elementos terras raras provenientes de ímãs de NdFeB de HDs de computadores foram capazes de gerar produtos passíveis de serem empregados na indústria de processamento destes metais.
9	Fernandes, Suélen. (2019).	Método para a avaliação da sustentabilidade ambiental da produção de ímãs de terras raras no Brasil: Um estudo no laboratório fábrica	Desenvolver um método para avaliar a sustentabilidade ambiental da produção de Ímãs de Terras Raras (ITR) no Brasil em fase de projeto.	GRI	Brasil	Os riscos associados aos elementos químicos ficam evidenciados na caracterização, em que 82% dos elementos de entrada são classificados como perigosos pela ANTT.
10	Freitas, Renata (2019).	Desenvolvimento de tecnologias de separação para a produção dos óxidos de terras-raras empregados na produção de ímãs permanentes.	Desenvolver tecnologias de separação de elementos terras-raras a fim de contribuir com a implementação e o desenvolvimento integral da cadeia produtiva sustentável de seus óxidos.	Separação do Cério por solubilização seletiva com ácido clorídricos no corte Nd/Sm.	Brasil	Com o estudo do corte Nd/Sm foi possível verificar uma maior extração de Sm com o aumento da concentração de P507 e foi possível de se obterem as curvas de LogD.

FONTE: A autora (2021).

Dentro do Quadro 1 e do Quadro 2 de levantamento bibliográfico foram destacados os cinco principais artigos que fundamentaram o presente trabalho.

O artigo de Sampaio et al., (2016) avaliou o ciclo de vida da produção de óxidos de terras raras a partir de um minério brasileiro, onde foi levado em consideração a produção desses óxidos no Brasil, utilizando a norma ISO 14040. O estudo apresenta os principais impactos causados ao longo desse processo, como mudanças climáticas para a saúde humana, mudanças climáticas para o ecossistema, a depleção de combustíveis fósseis. Foi evidenciado as gerações de resíduos radioativos de tório e urânio, altamente contaminantes, e também o uso de ácido clorídrico, onde contribuiu na maior parte dos impactos ambientais das categorias que foram analisadas, o ácido sulfúrico, contribuiu em menor proporção em quase todas as categorias e significativamente nas categorias de transformação da terra natural, ocupação da terra agrícola ecotoxicidade terrestre.

Para Koultun e Tharumarajah (2014), a pesquisa impacta no ciclo de vida de elementos de terras raras, faz uma ACV do berço ao portão do uso de energia, esgotamento de recursos e potencial de aquecimento global cujo resultado da produção de ETRs a partir da extração de minerais de terras raras, separação dos óxidos e redução final. Quando analisado o consumo de energia, os minerais monazita e bastnasita são os maiores consumidores, pois há separação adicional de tório, urânio e fósforo. Os impactos atribuídos aos óxidos de terras raras são influenciados pela concentração e o preço, quanto menor o percentual de concentração e quanto maior o preço, maior a participação impacto por kg. Foi observado que entre os óxidos o que possui o maior impacto é o óxido de escândio e logo em seguida o óxido de európio. A reciclagem é um tema muito abordado, pois consegue recuperar semelhantes. O impacto sobre o meio ambiente é preocupante, pois é grande a quantidade de rejeitos que são produzidos no beneficiamento e extração de concentrado de bastnasita e monazita. Os rejeitos, em particular a monazita, contêm radionuclídeos e a liberação deste para o meio ambiente por ar, água residuais e lixiviação da chuva, pode causar danos à saúde.

Para Marx et al., (2018) o artigo avaliação comparativa do ciclo de vida da produção de ímãs permanentes de terras raras NdFeB com base em diferentes depósitos de terras raras, o método de alocação foi baseado no preço de mercado de TR, porém com o mesmo material e energia necessário para produção. Na categoria de impacto de radiação ionizante, o fator de caracterização do tório foi convertido na

de urânio. A normalização ajuda a comparar diferentes categorias de impacto com diferentes unidades, utilizando métodos estatísticos e média global, com isso a maior contribuição vem da eco toxicidade, toxicidade humana e eutrofização. Como resultado foi obtido que a normalização demonstra superioridade da produção de TR no depósito de Mountain Pass em termos de efeitos ambientais, conforme os dados as categorias de toxicidade e eutrofização são as mais afetadas e foi apresentado a eficácia de medidas como evitar produtos químicos através da reciclagem de águas residuais salinas, produção de energia mais limpa.

Para Giese (2017) sobre a série, estudos e documentos, CETEM, tendências europeias para o uso de recursos de terras raras, uma vez que a exploração e produção de TR apresenta dificuldades geográficas econômicas e ambientais, o uso destes recursos tem sido objeto de estudo, principalmente por países desenvolvidos que consomem tecnologias de ponta, como a União Europeia. Pesquisas com foco na concentração, recuperação e separação de TR é de grande importância estratégica e econômica. O texto apresenta os avanços e perspectivas futuras da cadeia produtiva de TR na Europa, bem como a importância da reciclagem para obtenção de matérias primas dentro dos conceitos atuais da cadeia produtiva de TR.

Segundo Bailey et al., (2021) no inventário do ciclo de vida de ímãs permanentes de samário-cobalto (SmCo), comparado ao neodímio-ferro-boro (NdFeB) usado em veículos elétricos, apresentou resultados de potencial de toxicidade humana NdFeB são devido ao processo de torrefação ácida. Para SmCo, os contribuintes predominantes para o potencial de toxicidade humana são a produção de cobalto, a fase que mais contribui para o potencial de aquecimento global é o refino do metal cobalto. Para o indicador de ecotoxicidade aquática de água doce, o impacto para NdFeB é dominado pelo níquel, bem como pelas emissões de metais pesados na produção de cobalto. Tanto para SmCo quanto para NdFeB, os principais impactos relacionados à acidificação são devido ao dióxido de enxofre emitido na produção de ácido sulfúrico para a galvanoplastia.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

No presente trabalho pode ser observado que é de natureza exploratória, segundo Gil (2002), a pesquisa exploratória demonstra que os problemas não são devidamente conhecidos, com isso tem a necessidade de elaboração de hipóteses, ou possíveis sugestões futuras, tendo assim como objetivo principal melhorar as ideias propostas.

De acordo com Cauchick (2012), o modelo pode ser uma representação de uma situação ou realidade e construída de maneira que possa auxiliar o tratamento da situação de forma sistemática. Deve apresentar um nível aceitável de detalhamento e ao mesmo tempo de simplificação para ser considerado por métodos de análises e resolução.

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), a essência da gestão científica consistia na análise de exemplos de processos reais. A análise baseia-se em observações sistemáticas e mensurações de processos, de modo a obter ganhos em qualidade e produtividade.

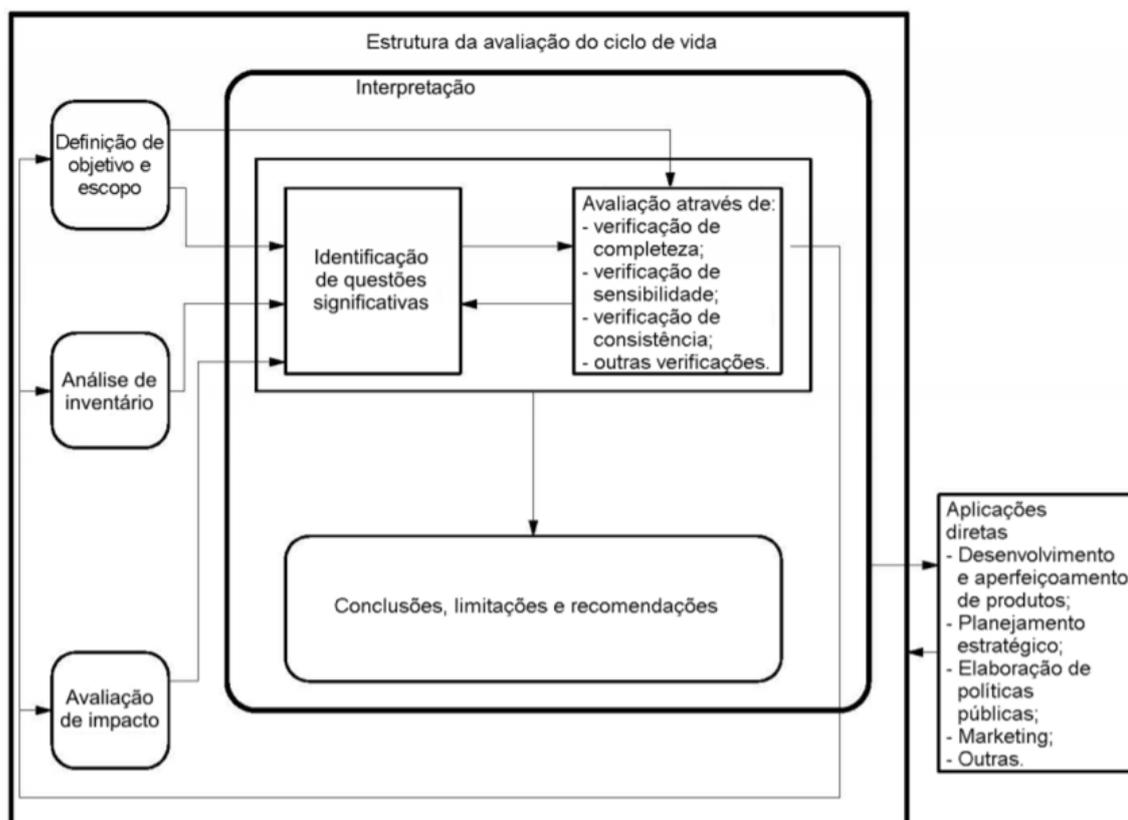
Conforme Cauchick (2012), o modelo de simulação assemelha as operações do sistema real à medida que este evolui no tempo, mas também serve para analisar o sistema em um instante de tempo exclusivo.

Em relação à abordagem do estudo é de cunho quali-quantitativo, pois é necessário coletar dados e observar os impactos causados em relação ao meio ambiente, além de utilizar o banco de dados Ecoinvent e tratamento dos dados no software SimaPro.

#### 3.2 METODOLOGIA ACV

A metodologia utilizada neste estudo foi com base nas normas da ISO 14040 (2009) e 14044 (2006), contendo o objetivo e o escopo na primeira etapa, logo em seguida a análise do inventário, feito isso a fase 1 está concluída, e assim prosseguirá para etapa da avaliação do impacto do ciclo de vida, no qual neste presente estudo não será considerado. Conforme a Figura 5 mostrará os passos para a metodologia ACV.

Figura 5 - METODOLOGIA ACV



FONTE: ABNT (2009).

### 3.2.1 OBJETIVO E ESCOPO

Segundo estudos feitos por Sampaio (2016) e conforme as estimativas feitas da norma ISO 14040 (2009), a metodologia foi dividida em duas fases:

Fase 1: Definição de objetivo: Ocorre a definição do escopo, onde há aplicação e definição da cadeia produtiva, tendo os limites de cada sistema. Vale ressaltar que a modelagem dos sistemas da produção de ETRs foi feita através do levantamento bibliográfico do presente trabalho e a utilização dos dados desenvolvidos pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).

O escopo serve para identificar as entradas e as saídas da produção de óxidos de terras raras a partir de um minério brasileiro. A unidade funcional definida para o relatório da pesquisa são 4 quilos de uma cesta de óxidos de terras raras e 2 quilos de uma fração média e pesada.

Fase 2: Análise do inventário do Ciclo de Vida: Foi desenvolvido um modelo do sistema de cada circuito da cadeia produtiva de ETRs conforme o definido na fase

anterior e a delimitação do sistema. A modelagem é uma representação gráfica dos fluxos do sistema técnico e as atividades de pesquisa.

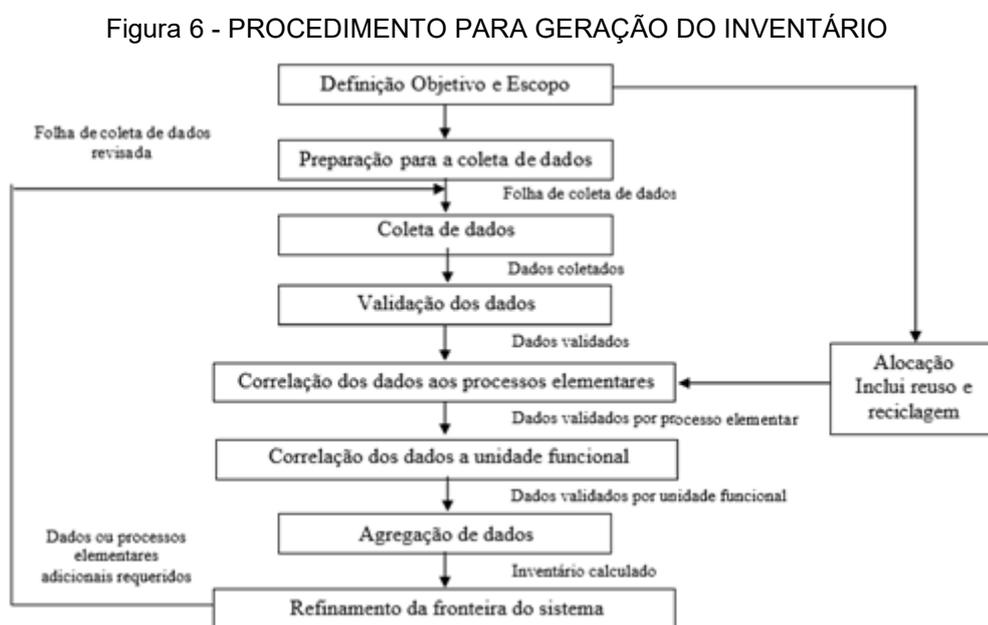
Para a descrição dos óxidos de terras raras foi utilizado como base a monazita contida no minério do nióbio da região de Araxá, o qual foi obtido através dos rejeitos de flotação gerados durante o processo de concentração de piro cloro. Com o auxílio do software SimaPro 9.1.1.7, do banco de dados EcolInvent e junto a dados coletados na literatura (CUNHA et al., 2016).

### 3.2.2 INVENTÁRIO

A análise do inventário é feita através de coletas de dados, que no caso do estudo será utilizado o banco de dados EcolInvent, para definir a entrada e a saída de produtos (ABNT, 2009).

Observa-se a geração de resíduos e os impactos relacionados ao meio ambiente.

A Figura 6 apresenta na forma de um fluxograma as etapas para realizar uma análise de inventário.



FONTE: ABNT (2009).

Com o fluxograma feito, é possível analisar cada processo, todas as entradas e as saídas de produtos.

Para a análise do inventário, foi feito um levantamento da literatura, do banco dos dados Ecolnvent e do relatório da planta, a validação dos dados ocorre através de reuniões com especialistas na área de mineração e especialistas em produção de óxidos, conforme o relatório do CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), assim foi possível apresentar os inventários base do presente estudo, como indica a Tabela 1

Para análises do inventário foram retirados dados dos inventários da China com a utilização do software SimaPro e convertidos para a realidade Brasileira.

Tabela 1 - INVENTÁRIO DE CONCENTRADO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS GLOBAL

<b>Entradas</b>		
<b>Minerals</b>	<b>Unid.</b>	<b>Quantidade</b>
Cerium	kg	0,63344
Europium	kg	0,00253
Gadolinium	kg	0,00887
Gangue	kg	12,8721
Iron	kg	6,96786
Lanthanum	kg	0,29138
Neodymium	kg	0,234373
Niobium	kg	0,01432
Praseodymium	kg	0,07855
Samarium	kg	0,01014
Scandium	kg	0,00117
Water, unespecified natural	m3	0,11238
Occupation,mineral extraxtion	m2a	0,00051
Transformation, from unespecified	m2	9,00E-06
Transformation, to mineral extraction	m2	9,00E-06
Blasting	kg	0,013197
Fatty acid	kg	0,010557
Fatty alcohol	kg	0,00176
Hard coal	kg	0,131967
Mina infrastructure	p	2,20E-11
Recultivation, iron mine	m2	4,49E-05
Sodium hydroxide, without water, 50% solution state	kg	0,001584
Sodium silicate, spray powder, 80%	kg	0,026393
Steel, chromium steel, 18/8, hot rolled	kg	0,003774

Diesel, burned in diesel-electric generating set	MJ	32,99176
Electricity, medium voltage	kWh	0,673032
<b>Saídas</b>		
Rare earth oxides	kg	1
Heat, waste	MJ	0,1354
Nitrogen oxides	kg	5,80E-05
Particulates, < 2.5 um	kg	3,80E-03
Particulates, > 10 um	kg	0,03721
Particulates, >2.5 um, and < 10um	kg	0,03721
Radium- 226	kBq	0,26393
Sulfur oxides	kg	8,70E-05
Thorium- 232	kBq	1,33551
Uranium- 238	kBq	0,00354
Radium- 226	kBq	0,01016
Thorium- 232	kBq	0,05147
Uranium- 238	kBq	0,00014
Rare earth tailings, from bastnaesite and monazite	kg	13,56177
Wastewater, average	m <sup>3</sup>	0,112416

FONTE: ADAPTADO SIMAPRO (2022).

Este conjunto de dados refere-se às atividades de mineração (mineração à céu aberto) e beneficiamento (processo de beneficiamento em duas etapas, incluindo moagem de bolas e separação magnética), a fim de produzir 1kg de concentrado de óxidos de terras raras, 50% beneficiado, da monazita extraída e minerais de bastnasita nas minas de Bayan Obo. Este conjunto de dados é baseado na CMLCAT (*Critical Materials Life Cycle Assessment Tool*), um software baseado no Excel que contém os dados do ICV para cada subprocesso. O concentrado de terras raras produzido passará então por torrefação ácida, lixiviação de água e conversão do cloro, extração de solvente e calcinação para produzir óxido de lantânio individual de alta pureza, óxido de cério, óxido de neodímio e um concentrado misto de samário-európio e gadolínio (SimaPro 2022). Para a produção de Óxidos de terras raras foi usado como base o inventário dos 3 depósitos, conforme a Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - INVENTÁRIO DA PRODUÇÃO DOS ÓXIDOS DE NEODÍMIO

		Mount Weld	Mountain Pass	Bayan Obo	Observações	Referências
<b>Entradas</b>						
Eletricidade	kWh	9.5		10.4	Demanda de energia, quantidades de eletrólitos, ânodos e cátodos são estimados da literatura.	Josefine Marx, Andrea Schreiber, Petra Zapp e Frank Walachowicz. (2018). Avaliação comparativa do ciclo de vida da produção de ímãs permanentes do NdFeB a partir de diferentes depósitos de terras raras. ACS Sustainable Chem. Eng. 2018, 6, 5858-5867, 10.
Fluoreto de neodímio	g	0.59		48		
Fluoreto de neodímio (reciclado)	g	0.5		0.3		
Fluoreto de lítio (reciclado de poeira)	g	0.65		0.37		
Óxido de neodímio	kg	1.13				
Tungstenio	g	2.7				
Grafite (ânodo e caldeirão)	g	135		170		
Tijolo à prova de fogo	kg	0.09				
Transporte, oceano	tkm	5.54	12.4	*	Calculado pelo <a href="http://www.searates.com">www.searates.com</a>	
Transporte, caminhão	tkm	0.23	0.62	0.19	Calculado pelo <a href="http://www.google.de/maps">www.google.de/maps</a>	
Transporte, trilhos	tkm	1.18		*	Calculado pelo <a href="http://www.google.de/maps">www.google.de/maps</a>	
<b>Saídas</b>						
Desperdício	g	152		217	Caldeirão, cátodo de tungstênio, ânodo de grafite	
Dióxido de carbono	kg	0.055			Baseado em Keller	
Monóxido de carbono	kg	0.211			Baseado em Keller	
Hexafluoretano	kg	1.4E-05		1.2E-05	Pressuposto: 10% do valor CF4 foram emitidos como C2F6	
Pó (PM 2.5)	kg	5.4E-04		0.052	Baseado em Cheng	
Tetrafluorometano	kg	1.35E-04		1.2E-04	Com base nas emissões de PCF da eletrólise de alumínio	
Ácido fluorídrico	kg	*		4.00E-05	Com base no balanço de massa	
Neodímio	kg	1	1	1		

FORNTE: ADAPTADO MARX (2018).

Foi feito um cenário de avaliação de impacto para relacionar os dados obtidos no inventário com o impacto ambiental. O método de avaliação de impacto de vida foi utilizado neste trabalho é o ReCiPe, onde há uma combinação de métodos e tem

origem Holandesa, foi desenvolvido em colaboração entre RIVM, Radboud University, CML e Pré- consultants (MENDES, 2015) (GOEDKOOOP, et al., 2008).

### 3.3 COLETA DE DADOS

Nesta fase de coleta de dados foi feito a partir de um projeto de planta de uma empresa e com a utilização do banco de dados EcolInvent, junto com o software SimaPro para conseguir a elaboração do inventário do ciclo de vida de óxidos de terras raras para o uso de ímãs permanentes.

O EcolInvent une a compilação, vinculação e distribuição de dados do ICV, mas também administra o banco de dados. Sua atividade principal é a publicação do banco de dados EcolInvent, que pode ser utilizado mundialmente com base de dados em ACV. Há atividades de liderança e participação de projetos e iniciativas de gestão de dados ao redor do mundo. Atualmente são mais de 18.000 conjuntos de dados, modelando atividades ou processos humanos. O conjunto de dados possuem informações sobre o processo industrial ou agrícola que modela, medindo os recursos naturais retirados do meio ambiente, as emissões liberadas para a água, solo e ar, além de produtos exigidos por outros processos, como no caso da eletricidade, os produtos, coprodutos e resíduos produzidos (ECOINVENT, 2022).

Tendo como base a definição da unidade funcional a produção de 1 kg de óxidos de terras raras.

## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

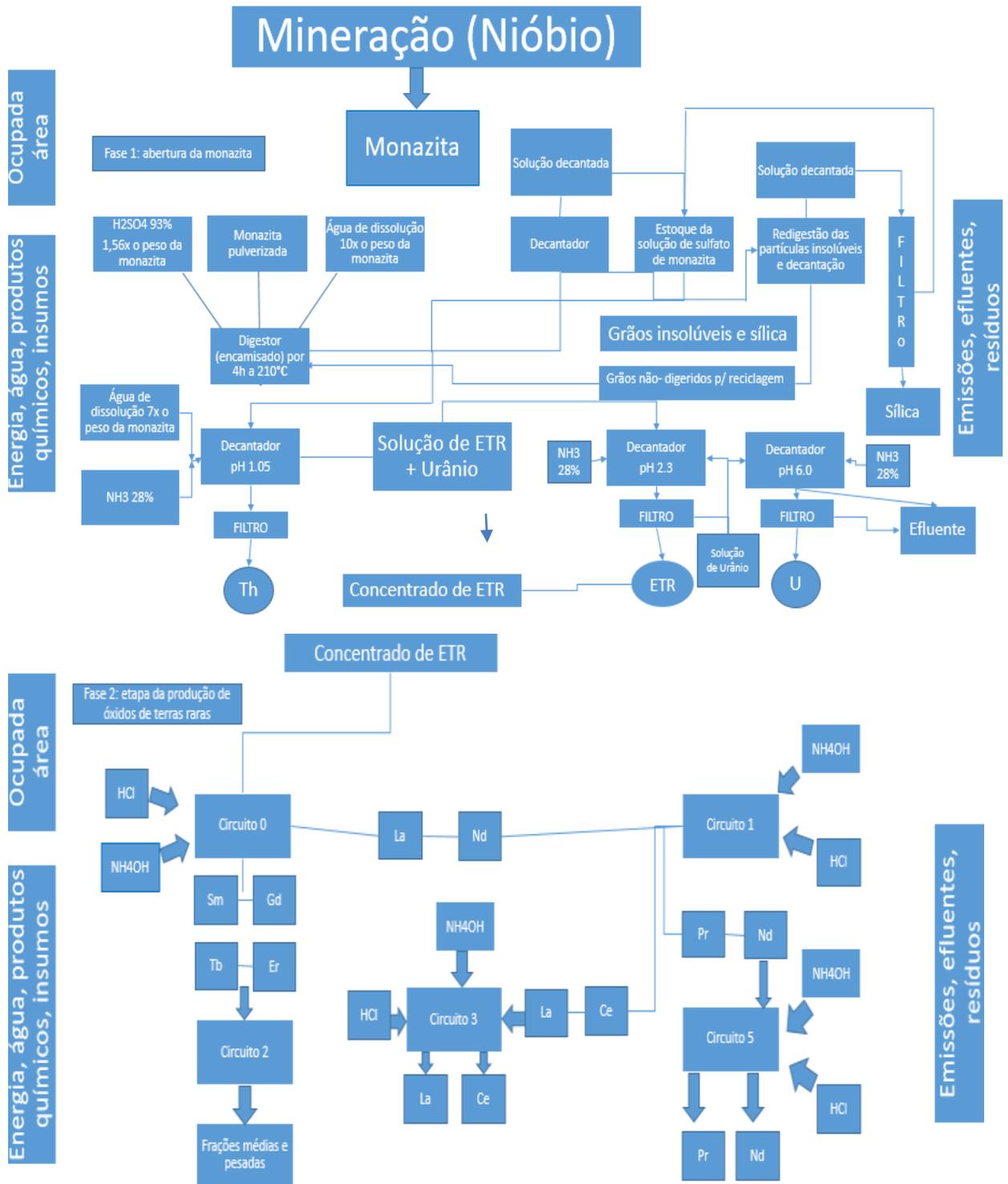
### 4.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO

O objetivo do estudo é avaliar o ciclo de vida da produção de óxidos de terras raras a partir de um minério brasileiro, especificamente a fase do inventário do ciclo de vida, dimensionando assim os impactos ambientais causado ao longo desse processo.

A partir do banco de dados EcoInvent e junto a dados coletados na literatura criou-se o modelo do sistema da produção de óxidos de terras raras e suas interações, de acordo com a Figura 7.

O sistema de produção de óxidos de terras raras considera duas fases. A abertura do minério e produção de óxidos de terras raras. No sistema apresentado na abaixo, pode observar que a fase 1, a entrada da monazita advinda do subproduto da fabricação da produção de Nióbio. Nesta fase a entrada da monazita passa pela abertura do minério, considerando as entradas de insumo, como água e energia e as saídas, fica concentrada de elementos de terras raras (ETR), como tório e o urânio, além dos efluentes. Enquanto na fase 2, apresentam 5 circuitos para a produção de óxidos de terras raras, com entrada de energia, água e produtos químicos e saída dos produtos como cério, lantânio, prasodímio e neodímio, além de dois subprodutos de óxidos de frações médias e pesadas.

Figura 7 - SISTEMA DA PRODUÇÃO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS



FONTE: ADAPTADO SAMPAIO (2016).

## 4.2 ANÁLISE DO INVENTÁRIO

Com os estudos feitos ao longo dessa coleta, tem como resultado o inventário da Tabela 3 abaixo, em relação a 1kg de óxidos de terras raras:

Tabela 3 - RESULTADO DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE CONCENTRADOS DE TERRAS RARAS ADAPTADO COM A REALIDADE BRASILEIRA.

<b>Entradas</b>			<b>Inventários adaptados</b>
Cério	kg	0,63344	
Európio	kg	0,00253	
Gadolínio	kg	0,00887	
Ganga	kg	12,8721	
Ferro	kg	6,96786	
Lantânio	kg	0,29138	
Neodímio	kg	0,234373	
Nióbio	kg	0,01432	
Praseodímio	kg	0,07855	
Samário	kg	0,01014	
Escândio	kg	0,00117	
Água	m3	0,11238	
Ocupação, local de extração	m2a	0,00051	
Transformação	m2	9,00E-06	
Transformação, para extração mineral	m2	9,00E-06	
Explosivos	kg	0,013197	Para os explosivos houve modificação de ao redor do mundo, para o global, logo em seguida foi modificado para o Chinês e assim foi substituído por um inventário com a realidade brasileira.
Ácido graxo	kg	0,010557	Para o ácido graxo foram feitas 3 mudanças dentro desse inventário, junto com subprodutos ao redor do mundo e global, foram feitas adequações necessárias para atender parâmetros da realidade brasileira.
Álcool	kg	0,00176	No álcool foram selecionados 3 subprocessos com inventários globais, o qual foi substituído com a realidade brasileira.
Carvão Duro	kg	0,131967	No carvão duro foram selecionados 3 subprocessos com inventários globais, o qual foi substituído com a realidade brasileira.
Infraestrutura da mina	p	2,20E-11	
Recultivo, mina de ferro	m2	4,49E-05	
Hidróxido de sódio, sem água, no estado de solução a 50%	kg	0,001584	

Silicato de sódio, pó para pulverização, 80%	kg	0,026393	O silicato de sódio, pó para pulverização, 80% ao redor do mundo foi modificado para adequar a realidade brasileira.
Aço, aço cromo 18/8, laminado a quente	kg	0,003774	O aço, aço cromo 18/8 foram realizadas mudanças do global para o brasileiro.
Diesel, queimado em grupo gerador diesel-elétrico, 10MW	MJ	32,99176	O diesel foi modificado do global para adaptações que se enquadram com a realidade brasileira.
Eletricidade, média tensão	kWh	0,673032	A eletricidade foi alterada da China para a do Brasil.
<b>Saídas</b>			
Concentrado de terras raras	kg	1	
Calor, desperdício	MJ	0,1354	
Óxidos de nitrogênio	kg	5,80E-05	
Partículas, < 2.5 um	kg	3,80E-03	
Partículas, > 10 um	kg	0,03721	
Partículas, >2.5 um, and < 10um	kg	0,03721	
Rádio- 226	kBq	0,26393	
Dióxido de enxofre	kg	8,70E-05	
Tório- 232	kBq	1,33551	
Urânio- 238	kBq	0,00354	
Rádio- 226	kBq	0,01016	
Tório- 232	kBq	0,05147	
Urânio- 238	kBq	0,00014	
Rejeitos de terras raras, de bastnasita e monazita	kg	13,56177	
Águas residuais, médias	m3	0,112416	

FONTE: A autora (2022).

Como base nos levantamentos de dados para a extração do óxido de neodímio, apresentado na Tabela 4 abaixo, tem a relação do seguinte inventário:

Tabela 4 - INVENTÁRIO DO ÓXIDO DE NEODÍMIO A PARTIR DO CONCENTRADO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS NO BRASIL.

<b>Entradas</b>		
Bicarbonato de amônioato	kg	0,441234
Hidróxido de bário	kg	0,141695
Fábrica química, orgânicos	p	1,27E-08
Dtpa, ácido dietilenotriaminapentaacético	kg	0,027685
Ésteres de ácido versático	kg	0,000785
Álcool	kg	0,000785
Ácido clorídrico, água com água, em 30% estado de solução	kg	4,072298
Querosene	kg	0,06292
Óxido de magnésio	kg	0,898927
Gás natural, alta pressão	m3	2,700253
Gás natural, não processado, na extração	m3	2,497583
Concentrado de óxido de terra rara, 50% REO, operação e beneficiamento de elementos de terras raras, bastnasita e minério de monazita	kg	4,494652
Carbonato de sódio, denso	kg	0,856534
Carbonato de sódio, claro, cristalino e heptahidratado	kg	0,856534
Hidróxido de sódio, sem água, em estado de solução de 50%	kg	1,643792
Ácido sulfúrico	kg	4,598053
Transporte, trem de carga	tkm	0,464835
Transporte, caminhão de carga, tonelada métrica	tkm	0,209362
Trimetilamina	kg	0,001103
Eletricidade, média tensão	kWh	1,597547
<b>Saídas</b>		
Calor, distrito ou industrial, além do gás natural	MJ	47,03616
Dióxido de carbono, fóssil	kg	4,93177
Cloreto de hidrogênio	kg	3,88E-05
Fluoreto de hidrogênio	kg	8,90E-06
Óxidos de nitrogênio	kg	0,004137
Partículas, >10 um	kg	0,000402
Dióxido de enxofre	kg	0,000186
Ácido sulfúrico	kg	4,58E-06
Demanda biológica de oxigênio	kg	0,000554
Demanda química de oxigênio	kg	0,000923
Carbono orgânico dissolvido	kg	3,42E-04
Nitrogênio, atmosférico	kg	7,61E-05
Sólidos suspensos	kg	0,00033
Carbono orgânico total	kg	0,000342

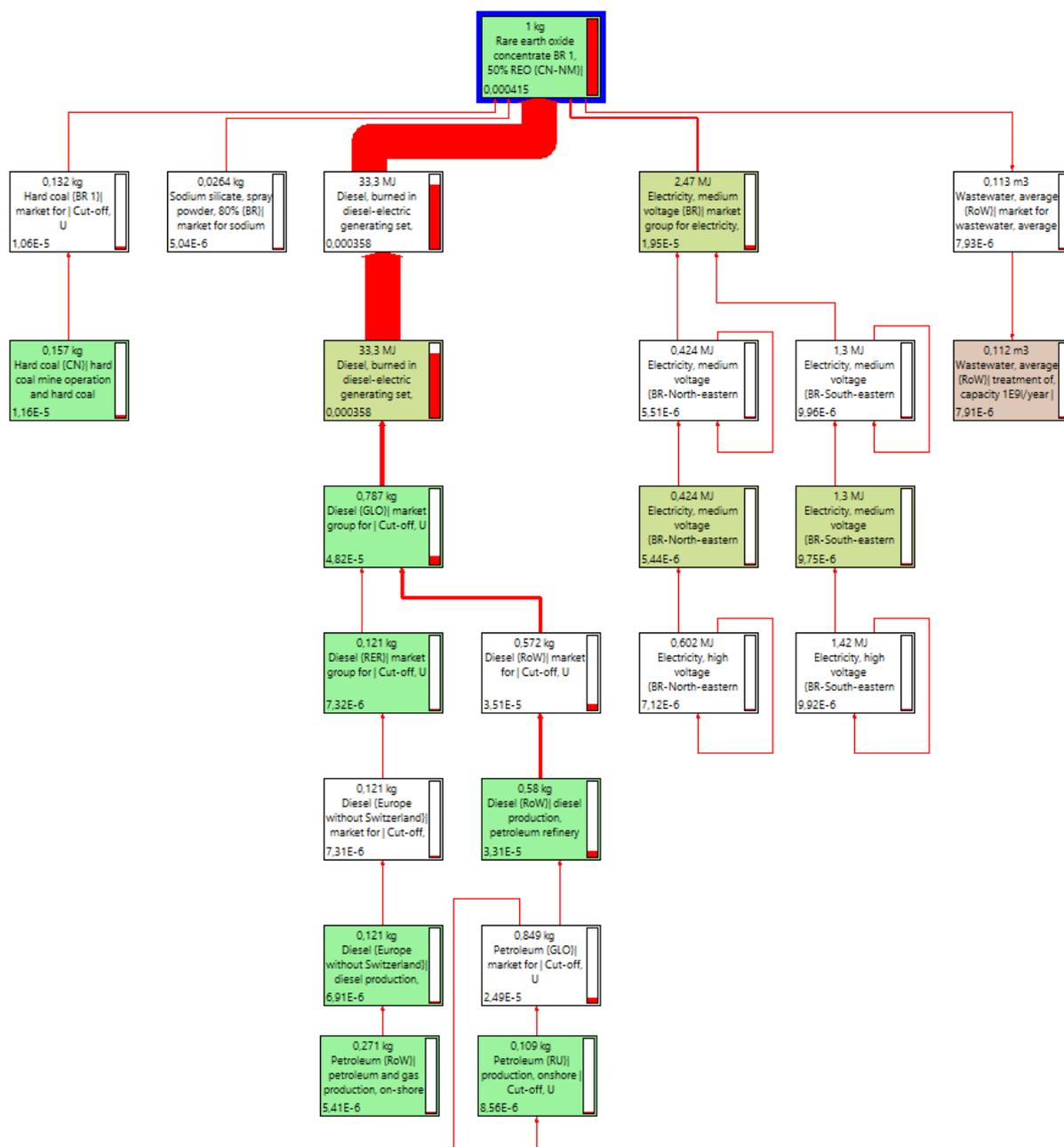
FONTE: A autora (2022).

Este conjunto de dados refere-se à adaptação de uma produção chinesa com inventários da eletricidade brasileira, aos processos de extração e refino aplicados nos concentrados de óxidos de terras raras produzido, 50% beneficiado (como subprodutos das atividades de mineração de Bayan Obo) para produzir óxido de lantânio individual de alta pureza, óxido de cério, óxido de neodímio e um concentrado misto de samário-európio e gadolínio. A base dos dados do EcoInvent referentes as atividades de extração e refino ocorrem em uma instalação de processamento na região de Baotou, na Mongólia Interior, e incluem torrefação ácida, lixiviação de água e conversão de cloreto, extração de solvente e calcinação.

### 4.3 CENÁRIO DE AVALIAÇÃO

Com os resultados do presente estudos foi criada uma árvore onde indica os minerais e os processos que causam mais danos ao meio ambiente, conforme a Figura 8 abaixo:

Figura 8 - REDE ACV



FONTE: ADAPTADO DO SIMAPRO (2022).

Com essa rede, pode ser observado o fluxo dos produtos que geram impactos ao meio ambiente, as linhas vermelhas representam os fluxos que ligam a diferentes produtos, quanto mais espessa a linha, maior a geração de impacto danosos ao meio ambiente. Assim analisando a Figura 8 como um todo, foi observado que na primeira linha são os produtos que mais geram impactos ao meio ambiente, em seguida, são os que mais causam impacto nesses produtos e assim sucessivamente.

Como resultado temos que o diesel, em primeiro lugar, por apresentar uma linha vermelha bem espessa, causa mais danos ao meio ambiente, em seguida temos a eletricidade, e os demais são carvão duro, silicato de sódio e águas residuais.

#### 4.3.1 CARACTERIZAÇÃO

A caracterização, nada mais é que a representação do impacto que foi gerado, o Quadro 3 abaixo apresenta as categorias e seus seguintes valores.

Quadro 3 - CARACTERIZAÇÃO

<b>Categoria</b>	<b>Unidade</b>	<b>Total</b>	<b>Unidade</b>
Toxicidade cancerígena humana	DAILY*	0,008855	kg
Formação de ozônio (ecossistemas terrestres)	DAILY*	0,003046	kg
Formação de ozônio (saúde humana)	espécie.ano	0,002602	kg
Eco toxicidade água doce	espécie.ano	0,001241	kg
Eutrofização de água doce	espécie.ano	0,001224	kg
Escassez de recursos fósseis	(\$) USD*	0,001083	kg
Eco toxicidade água marinha	espécie.ano	0,000999	kg
Formação de material particulado fino	DAILY*	0,000695	kg
Acidificação terrestre	espécie.ano	0,000654	kg
Aquecimento global	DAILY*	0,000415	kg
Eco toxicidade terrestre	espécie.ano	0,000405	kg
Eutrofização da água marinha	espécie.ano	0,000162	kg
Consumo de água	espécie.ano	0,000119	m3
Radiação ionizante	DAILY*	0,000102	kBq
Destruição do ozônio estratosférico	DAILY*	6,19E-05	kg
Toxicidade humana não cancerígena	DAILY*	2,77E-05	kg
Uso da terra	espécie.ano	1,77E-05	m2a
Escassez de recursos minerais	(\$) USD*	4,25E-06	kg

FONTE: ADAPTADO DO SIMAPRO (2022).

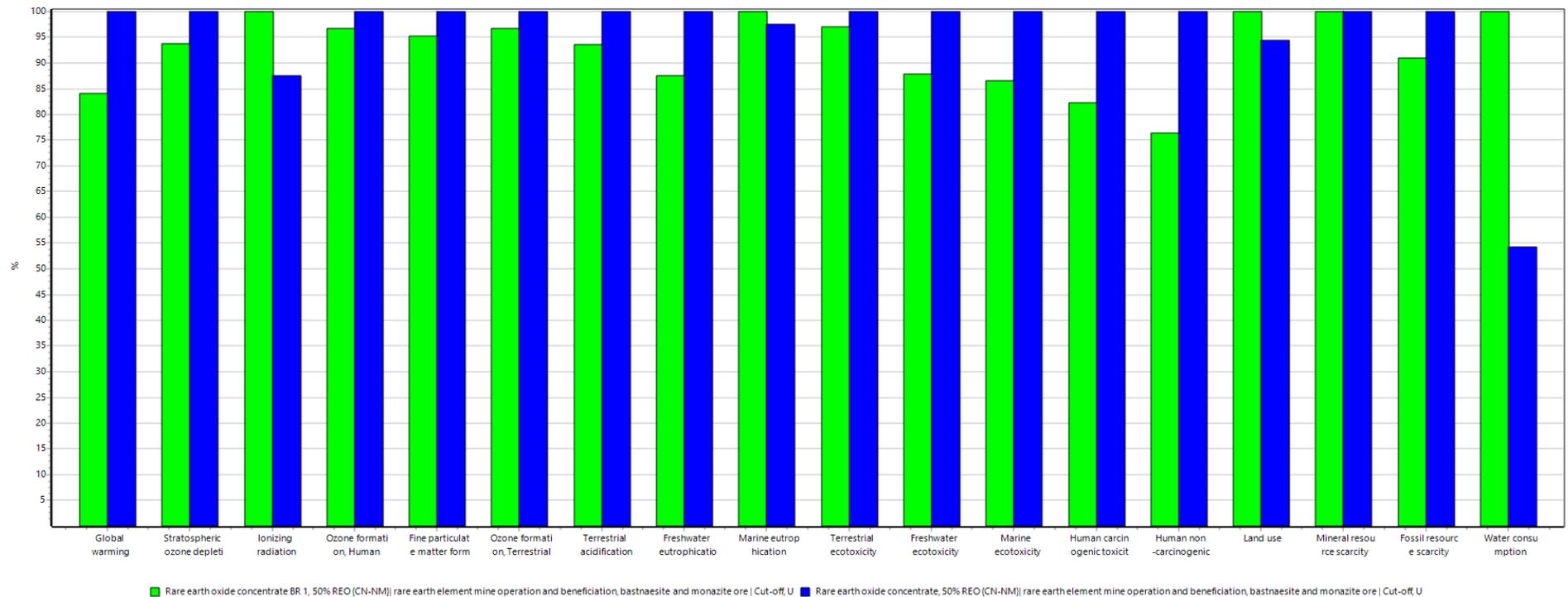
DALY\*- DISABILITY ADJUSTED LIFE YEARS- ANOS DE VIDA PERDIDOS AJUSTADO POR INCAPACIDADE  
 (\$)USD\*- VALOR DA UNIDADE DE RECURSOS

O Quadro 3 mostra quais são os principais danos ambientais e suas devidas contribuições, em relação as categorias apresentadas, as que apresentam maior taxa de impacto em relação ao meio ambiente é a toxicidade cancerígena humana e a formação de ozônio para ecossistemas terrestres e a formação de ozônio em relação a saúde humana, com isso deve-se dar prioridade para buscas de melhorias em tais categorias.

### 4.3.2 CARACTERIZAÇÃO

Nesta parte do estudo, foi feita uma comparação dos principais danos causado ao meio ambiente, onde temos a China representado em azul e o Brasil com as colunas em verde, a Gráfico 1 a seguir mostra a relação comparativa.

Gráfico 1 - COMPARAÇÃO



A comparar 1 kg 'Rare earth oxide concentrate BR 1, 50% REO (CN-NM)| rare earth element mine operation and beneficiation, bastnaesite and monazite ore | Cut-off, U' com 1 kg 'Rare earth oxide concentrate, 50% REO (CN-NM)| rare earth element mine operation and beneficiation, bastnaesite and monazite ore | Cut-off, U'; Método: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.06 / World (2010).

FONTE: A autora (2022).

O Gráfico 1 representa o equivalente a 100% para a comparação, assim foi possível observar que a China possui muito mais categorias com maior impacto ao meio ambiente do que o Brasil.

As categorias que mais geram impacto no Brasil são a radiação ionizante, eutrofização marinha, uso de terras, recursos minerais e consumo de água.

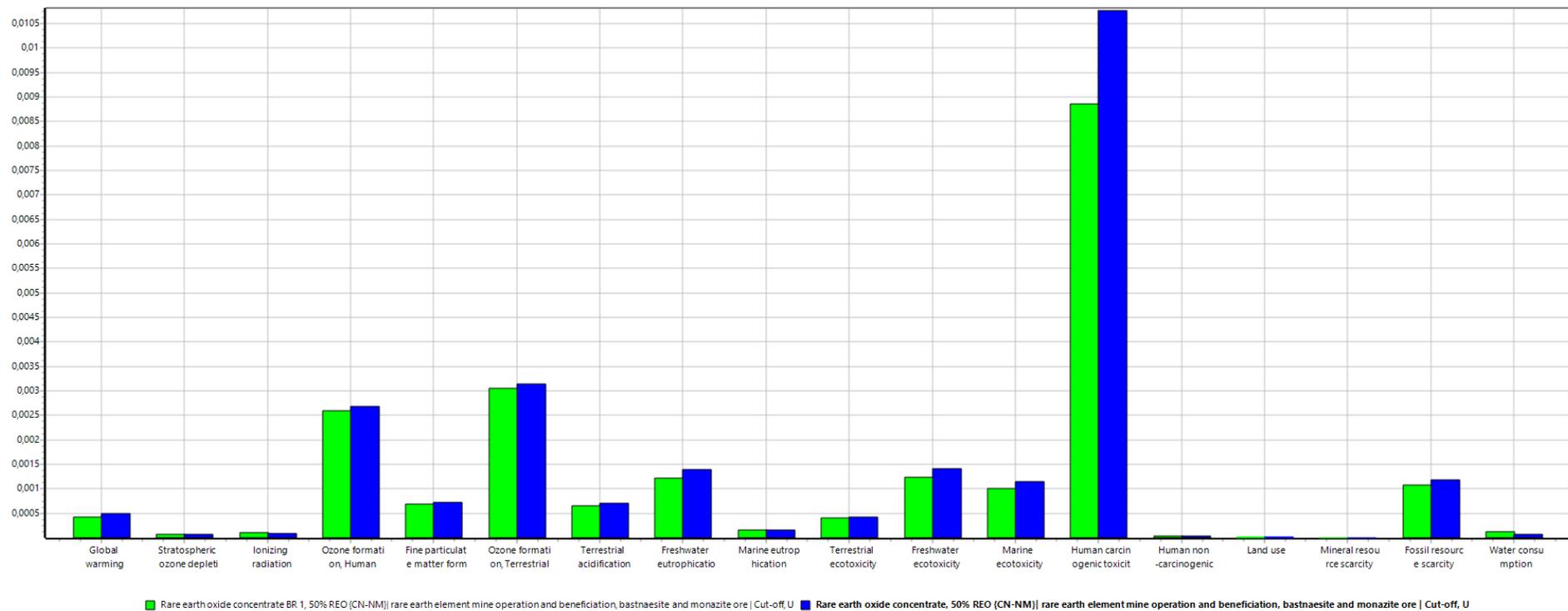
#### 4.3.3 NORMALIZAÇÃO

A normalização tem como objetivo principal analisar a significância dos resultados dos indicadores das categorias. A ISO 14044 confirma a proposta ao definir a normalização do ACV como cálculo da magnitude dos resultados (ABNT, 2009).

Para Lindeijer (1996), a normalização relaciona a carga ambiental de um produto ao total à sua volta.

Na normalização, são adaptados diferentes insumos, com categorias variadas, podendo observar o impacto de cada insumo em relação ao meio ambiente, quanto maior a coluna apresentada no gráfico, maior será o impacto causado ao meio ambiente.

Gráfico 2 - NORMALIZAÇÃO



A comparar 1 kg 'Rare earth oxide concentrate BR 1, 50% REO [CN-NM]] rare earth element mine operation and beneficiation, bastnaesite and monazite ore | Cut-off, U' com 1 kg 'Rare earth oxide concentrate, 50% REO [CN-NM]] rare earth element mine operation and beneficiation, bastnaesite and monazite ore | Cut-off, U'; Método: ReCIpe 2016 Midpoint (H) V1.06 / World (2010).

FONTE: A autora (2022).

Assim foi possível observar no Gráfico 2 a comparação entre o inventário da China, obtido no banco de dados do EcoInvent e o inventário do presente estudo em relação ao Brasil. Pode ser observado que o Brasil gera menos impacto em todas as categorias apresentadas, podendo destacar as categorias de maior impacto como o cancerígeno humano, logo em seguida a formação da camada de ozônio, devendo dar prioridade e buscando sempre novas maneiras para diminuir o grau de impacto desses insumos ao meio ambiente.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve por objetivo foi elaborar o inventário do ciclo de vida da produção de óxidos de terras raras e apresentar um cenário com a quantificação dos impactos ambientais, para subsidiar a avaliação dos impactos do ciclo de vida da produção de ímãs permanentes com as características da realidade brasileira.

O trabalho realizou uma modelagem do sistema e assim foi apresentado a abertura do minério e a produção dos óxidos, com as características da realidade brasileira.

Na segunda fase foi elaborado um inventário, a partir de dados secundários, do banco de dados EcoInvent, assim foi possível adaptar um inventário brasileiro a partir de um inventário com a realidade global, podendo dar subsídios aos inventários subsequentes como ao dos ímãs permanentes.

Foram feitos cenários de avaliações de impactos com os inventários desenvolvidos, através da metodologia ReCiPe, como podemos ver nos resultados, as principais categorias de impacto são a toxicidade cancerígena humana e a formação de ozônio.

Em seguida foi realizada uma análise comparativa da produção dos óxidos de terras raras da China com o inventário que foi desenvolvido no presente trabalho, onde foi observado que a maioria das categorias o Brasil possuiu menos impactos, as categorias com mais impacto foi a de radiação ionizante, eutrofização marinha, uso de terras, recursos minerais e consumo de água.

Esse projeto da subsídios outras ACVs para a produção de ímãs permanentes que ainda não há no Brasil, mas está em processo de desenvolvimento, como este estudo faz parte do projeto REGINA, que subsidia a produção dos impactos gerados na produção de ímãs permanentes.

Sendo assim, como trabalhos futuro fica a sugestão de elaboração de uma avaliação de impacto em todo o ciclo de vida dos ímãs permanentes e uma avaliação de sensibilidade dos dados obtidos a partir de uma produção com a realidade brasileira.

## REFERÊNCIAS

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

\_\_\_\_\_(2004d) **NBR ISO 14031**: Gestão ambiental – Avaliação de desempenho ambiental – Diretrizes. ABNT, 1ª ed, Rio de Janeiro, Brasil: 38p.

\_\_\_\_\_(2009 b) **NBR ISO 14044**: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Brasil. ABNT. 46p.

ADIBI, N.; LAFHAJ, Z.; PAYET, J. New resource assessment characterization factors for rare earth elements: applied in NdFeB permanent magnet case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 24: 712-724, 2019.

AMARAL, Juliana. DIAGNÓSTICO DAS TENDÊNCIAS PARA O ACESSO A FONTES ALTERNATIVAS DE TERRAS RARAS A PARTIR DE PRODUTOS ACABADOS: RECICLAGEM ÍMÃS PERMANENTES. 2014. Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Metalúrgica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

ALI, SH, 2014. Social and environmental impact of the rare earth industries. **Social and environmental impact of the rare earth industries**. 3(1): 123-134.

BARTIE, N. J. The resources, exergetic and environmental footprint of the silicon photovoltaic circular economy: Assessment and opportunities. **The resources, exergetic and environmental footprint of the silicon photovoltaic circular economy: Assessment and opportunities** p. 24, mar.; 2021.

BEYLOT. A. Switch on-switch off small-scale mining: Environmental performance in a life cycle perspective. **Switch on-switch off small-scale mining: Environmental performance in a life cycle perspective**. p.11, 2021.

Blengini GA. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy. *Building and Environment*. 2009;(4);319-330.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil, de 05 de outubro de 1998**. Disponível em [www.planalto.gov.br](http://www.planalto.gov.br). Acesso em 12/05/2010.

\_\_\_\_\_. **Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em [www.planalto.gov.br](http://www.planalto.gov.br). Acesso em 12/05/2010.

CALLISTER, W. D. Jr.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012. p. 807.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE (2013). Usos e aplicações de Terras Raras no Brasil: 2012-2030. Brasília. 2013. 254 p.; li, 24 cm. ISBN 978-85-60755-64-6.

Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras – CERTI. Viabilização de um laboratório- fábrica de ímãs de terras raras no Brasil: relatório técnico final do projeto executivo de engenharia do LabFabITR. Florianópolis, 2017.

CONSTANTINIDES, S. **Market Outlook for Ferrite, Rare Earth and other Permant Magnets**. The International Forum on Magnetic Applications, Technologies & Materials. Jacksonville: 2016. Disponível em: < <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/10/Magnetics-2016-Market-Outlook-Constantinides-160119-opt8.pdf>>. Acesso em: 18 de mar. 2020.

COEY, J. M. D.. Pemanet. Wiley Encyclopedia of Electrical Ans Electronics Engineering, [s.l.], p. 1-20, 16 set. 2014. John Wiley & Sons, Inc..Magnets

DIEHL, O.; SCHONFELDT, M.; BROUWER, E.; DIRKS, A.; RACHUT, K.; BUCKOW, A.; GAUS, 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.

Ecoinvent Database. [Site institucional]. Disponível em: <http://www.ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>. Acesso em: 22 abril 2022.

Fernandes, Suelen. Método para a avaliação da sustentabilidade ambiental da produção de ímãs de terras raras no Brasil: Um estudo no laboratório fábrica. **Método para a avaliação da sustentabilidade ambiental da produção de ímãs de terras raras no Brasil: Um estudo no laboratório fábrica**. Santa Catarina, 2019, p. 108, junho de 2019. Acesso em: 22 nov de 2021.

FLORIANO, E.P. **Políticas de Gestão Ambiental**. 3ª Ed. Revisada. Departamento de Ciências Florestais, da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2007.

FREITAS, Renata. Desenvolvimento de tecnologias de separação para produção dos óxidos de terras raras empregados na produção de ímãs permanentes. **Desenvolvimento de tecnologias de separação para produção dos óxidos de terras raras empregados na produção de ímãs permanentes**. CETEM, 2019, p.7, outubro de 2019.

Gambogi, J. 2016. 2013 minerals yearbook—Rare earths [advanced re lease]. Reston VA, USA: US Department of the Interior, US Geological Survey.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. p. 176.

GIESE, Ellen. TENDÊNCIAS EUROPEIAS PARA O USO DOS RECURSOS DE TERRAS RARAS. p.30. 2017. São José do Rio Preto- SP. CETEM- Rio de Janeiro, 2017.

GOEDKOOP M.; HEIJUNGS R.; DE SCHRYVER A.; STRUIJS J.; VAN ZELM R. ReCiPe 2008/Report I: Characterization. Holanda Ministerie Van VROM, Den Haag, Disponível em:

[https://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe\\_characterisation.pdf](https://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf). Acesso em 25 nov. 2020.

GRAEDEL, T. R. Industrial Ecology. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2ª ed., 2003.

GWENDOLYN, B. et al. Life cycle inventory of permanent samarium-cobalt magnets compared to neodymium-iron-boron used in electric vehicles.. Life cycle inventory of permanent samarium-cobalt magnets compared to neodymium-iron-boron used in electric vehicles, ano 1, p. 13, nov.;24, 2020. Disponível em: < [www.elsevier.com/locate/jclepro](http://www.elsevier.com/locate/jclepro) >. Acesso em: 22 nov. 2021.

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).

Koltun P, Tharumarajah A. Life Cycle Impact of Rare Earth Elements. ISRN Metallurgy [internet] 2014; [citado 2016 Dec 2]; 2014: 10p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/907536>.

LALANA, E. H. Imanes Permanentes y su Producción por Pulvimetalurgia. Revista de Metalurgia, v. 54, n.2, p.121, 6 jun., 2018. Editorial CSIC.

Lapido- Loureiro, Francisco Eduardo. O Brasil e a reaglobalização da indústria das terras raras. Rio de Janeiro: CETEM / MCTI, 2013. 216 p. ISBN 978-85-8261-001-5.

LINDEIJER, E. (1996). Normalization and valuation. In: Towards a methodology for Life Cycle Impact Assessment. Brussels, Belgium. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC- Europe).

MAIMON, D. Passaporte Verde: Gestão Ambiental e Competitividade. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1996.

MARX, J. et al. Comparative life cycle evaluation of permanent NdFeB magnet production of different rare earth deposits. **Comparative life cycle evaluation of permanent NdFeB magnet production of different rare earth deposits**, ano 3, p. 22, 2018. Disponível em: <[pubs.acs.org/journal/ascecg](http://pubs.acs.org/journal/ascecg)>. Acesso em: 22 nov. 2021.

MARX, J.; WERKER, J.; WULF, C.; ZAPP, P.; SCHREIBER, A.; Social LCA for rare earth NdFeB permanent magnets. **Social LCA for rare earth NdFeB permanent magnets**. p.16, 2019.

MENDES, N. C. Et al. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos**. Production, [S.l.], v.26, n. 1, p. 160-175, nov. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.153213>.

MITCHELL, G. Problems and Fundamentals of sustainable development indicators. Disponível em: <http://www.lec.leeds.ac.uk/people/gordon.html>. Acesso em 31 out. 2006.

MUTCHEN, Daniel. Estudo comparativo entre rotas de recuperação de elementos de terras raras contidos em ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (NdFeB) de hard disk drives. **Estudo comparativo entre rotas de recuperação de elementos de terras raras contidos em ímãs permanentes de neodímio-ferro-boro (NdFeB) de hard disk drives**. Rio Grande do Sul, 2021, p.137.

Paulo C. de Sousa Filho, e Osvaldo A. Serra. Terras Raras no Brasil: Histórico Produção e Perspectiva. 2014, p. 12.

RASPINI, Jéssica Prats. BARREIRAS E FACILITADORES À IMPLEMENTAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR: FORTALECIMENTO DAS CADEIAS DE VALOR E SUPRIMENTOS DE ÍMÃS DE TERRAS RARAS. 2021. 155 p. Dissertação (Pós Graduação) - Obtenção de mestre em engenharia de produção, [S. l.], 2021.

SAMPAIO, M.S. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV DA PRODUÇÃO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS A PARTIR DE UM MINÉRIO BRASILEIRO. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV DA PRODUÇÃO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS A PARTIR DE UM MINÉRIO BRASILEIRO**, 2017, p. 5, janeiro de 2016 a junho de 2017. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2014/1/Michel%20Serra%20Sampaio.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2021.

SAMPAIO, M.S. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV DA PRODUÇÃO DE LIGAS DE (Nd,Pr) - Fe-B A PARTIR DE UM MINÉRIO BRASILEIRO. **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA – ACV DA PRODUÇÃO DE LIGAS DE (Nd,Pr)-Fe-B A PARTIR DE UM MINÉRIO BRASILEIRO**, Rio de Janeiro, ano 2019, p. 5, 2019.

SAMPAIO, M.S. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS A PARTIR DE UM MINÉRIO BRASILEIRO. **INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE ÓXIDOS DE TERRAS RARAS A PARTIR DE UM MINÉRIO BRASILEIRO**. Rio de Janeiro, 2016, p. 5, julho de 2016.

SAMPAIO, M.S. INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA- ICV DA PRODUÇÃO DE ÍMÃS PERMANENTES A PARTIR DE UM MINÉRIO BRASILEIRO. **INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA- ICV DA PRODUÇÃO DE ÍMÃS PERMANENTES A PARTIR DE UM MINÉRIO BRASILEIRO**. Rio de Janeiro, 2017, p. 5, julho de 2016.

SANCHES, R. **A Avaliação de Impacto Ambiental e as Normas de Gestão Ambiental da Série ISO 14000: características técnicas, comparações e subsídios à integração**. 2011, p. 274. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SÁNCHEZ, L.H. Avaliação de impacto ambiental e seu papel na gestão de empreendimentos. In: **VILELA JÚNIOR, A. e DEMAJOROVIC, J.** Modelos e ferramentas de gestão ambiental: desafios e perspectivas para as organizações. São Paulo: Editora SENAC, 2006.

SÁNCHEZ, L.E. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos. Oficina de Textos, São Paulo: s.n., 2013.

TAO, M. et al. Life cycle assessment on lead zinc ore mining and beneficiation in China. **Life cycle assessment on lead zinc ore mining and beneficiation in China**. p. 13, jul.; 2019. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/jclepro](http://www.elsevier.com/locate/jclepro)>. Acesso em: 22 nov. 2021.

US GEOLOGICAL SURVEY 2018. Mineral Commodity Summaries 2018. US Geological Survey Reston

US GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries. Rare Earths. 2020. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-rare-earths.pdf>>. Acesso em: 24 mai. 2020.

US GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries. Rare Earths. 2021. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-rare-earths.pdf>>. Acesso em: 22 jan. 2021.

VAHIDI, E. An initial life cycle assessment of rare earth oxides production from ion-adsorption clays. *Resources, Conservation and Recycling*, v 113, p1-11, 2016.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. *International Journal of Operations & Production Management*, Bingley, v. 22, n. 2, p. 195-219, 2002.

WANG, X.; GE, J.; LI, J.; HAN, A.; Switch on-switch off small-scale mining: Environmental performance in a life cycle perspective, 2017, p.7.

WANG, L.; JIAO, G.H.; LU, H.S.; WANG, Q.Q. Comparative Life Cycle Assessment of the Production of NdFeB Rare Earth Permanent Magnets based on different Rare Earth Deposits. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(2):4343-4359.

Weng, Z.H., Haque, N., Mudd, G.M., Jowitt, S.M., 2016. Assessing the energy requirements and global warming potential of the production of rare earth elements. *J. Clean. Prod.* 139, 1282-1297.

WESCHENFELDER, F.R.A et al. SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS DA PRODUÇÃO DE ÍMÃS PERMANENTES E RESERVAS DE TERRAS RARAS: BRASIL × MUNDO. **SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS DA PRODUÇÃO DE ÍMÃS PERMANENTES E RESERVAS DE TERRAS RARAS: BRASIL × MUNDO**, ano 9, p. 7, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2012.037>>. Acesso em: 7 mar. 2012.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 200 p.

Zaimes GG, Hubler BJ, Wang S, Khanna V. Environmental Life Cycle Perspective on Rare Earth Oxide Production. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 2015; 3 (2); 237–244.