



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

SUÉLEN FERNANDES

**MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE
AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE ÍMÃS DE TERRAS RARAS NO
BRASIL: UM ESTUDO NO LABORATÓRIO FÁBRICA**

FLORIANÓPOLIS

2019

Suélen Fernandes

**MÉTODO PARA A AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE
AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE ÍMÃS DE TERRAS RARAS NO
BRASIL: UM ESTUDO NO LABORATÓRIO FÁBRICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. ^a Dr.^a Lucila Maria de Souza Campos

Coorientador: Prof. Dr. Orestes Estevam Alarcon

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Fernades, Suélen

Método Para A Avaliação Da Sustentabilidade Ambiental Da
Produção De Ímãs De Terras Raras No Brasil: Um Estudo No
Laboratório Fábrica / Suélen Fernades ; orientadora, Lucila
Maria de Souza Campos, coorientador, Orestes Estevam
Alarcon, 2019.

108 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Ímãs de Terras Raras. 3.
Sustentabilidade Ambiental. 4. Global Reporting
Initiative. 5. 108. I. Maria de Souza Campos, Lucila. II.
Estevam Alarcon, Orestes. III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção. IV. Título.

Suélen Fernandes

Método para a avaliação da sustentabilidade ambiental da produção de ímãs de terras raras no Brasil: um estudo no Laboratório Fábrica

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Marina Bouzon, Dr (a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Paulo Wendhausen, Dr
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Prof. Dr.(a) Lucila Maria de Souza Campos
Coordenador(a) do Programa

Prof. Dr.(a) Lucila Maria de Souza Campos
Orientador(a)

Florianópolis, 13 de junho de 2019.

Este trabalho é dedicado a meu marido e filhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, meu marido e filhos por toda compreensão e apoio durante esta jornada.

Agradeço minha orientadora professora Lucila Maria de Souza Campos e meu coorientador Orestes Estevam Alarcon, pela oportunidade de aprendizado, por todos os conselhos e direcionamentos visando a qualidade da pesquisa.

Meu muito obrigada a equipe dos laboratórios LGAA e SIBRATEC, por todo o compartilhamento de informações, contribuições e apoio. Um agradecimento especial a Camila por sempre prontamente me auxiliar na elaboração desta pesquisa. Meu muito obrigada a Renata, Henrique, Janete e Marielle. Muito obrigada por toda a parceria e tornar esta caminhada mais leve!

Agradeço a equipe do laboratório MAGMA por prontamente me atender e tirar minhas dúvidas para elaboração do trabalho. A equipe do LABFABITR/CODEMIG por todo o material disponibilizado e contribuições. Inserir os agradecimentos aos colaboradores à execução do trabalho.

RESUMO

Os Ímãs de Terras Raras (ITR), utilizados em turbinas eólicas e motores elétricos, são imprescindíveis para a produção de energias limpas e o controle de emissões. No entanto, os riscos ambientais e as incertezas quanto à garantia de fornecimento de elementos de terras raras (ETR), essenciais para a produção de ITR, resultam na necessidade de estratégias rumo a uma cadeia produtiva mais sustentável. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um método para avaliar a sustentabilidade ambiental da produção de ímãs de terras raras no Brasil, em fase de projeto, integrando as diretrizes ambientais do *Global Reporting Initiative* (GRI) ao fluxo produtivo. Inicialmente foi realizada a seleção dos indicadores ambientais tendo como base as diretrizes GRI, a literatura e os relatórios de sustentabilidade GRI. Na sequência, o método foi estruturado, estabelecendo-se relação entre a caracterização do fluxo produtivo e cada etapa do processo relacionada aos indicadores ambientais selecionados na fase anterior. Para facilitar a interpretação dos dados e a comparação entre indicadores, os dados foram então normalizados em CO₂ por meio da ferramenta *Eco Audit*®, disponível no *software CES Selector*®, onde foram determinados os fatores de emissões, os quais foram validados para produção nacional, por meio da análise e coleta de dados de inventários de CO₂ e relatórios de sustentabilidade. O método foi então aplicado ao contexto do LABFABITR e posteriormente a abordagem metodológica proposta foi avaliada por pesquisadores de ITR e gestores do LABFAITR. Por fim, para auxiliar na formulação de estratégias visando a melhoria ambiental, foram considerados cenários hipotéticos da produção de ITR, a fim de possibilitar a avaliação do cenário atual em relação ao ideal. Os resultados indicaram que as emissões para a produção de 8 toneladas de ITR/ano são estimadas em 51 toneladas de CO_{2equivalente}/ano, em que 79% das emissões são provenientes da energia utilizada. Também foi evidenciado que 31% dos elementos envolvidos na produção de ITR são classificados como perigosos. A geração de resíduos é estimada em 6,5 toneladas/ano onde 0,4 toneladas/ano de rejeitos de ETR (NdPr e NdFeB). Os processos de redução eletrolítica e revestimento apresentaram maior impacto, sendo estes os prioritários frente a ações de melhoria. Além disso, o cenário hipotético ideal, em termos de emissões de CO₂, configura o fornecimento 100% nacional combinando ao uso do transporte ferroviário ao hidroviário, com uso de energia elétrica de fonte solar. Finalmente conclui-se que o método proposto apresenta contribuições para a construção da cadeia produtiva sustentável de ITR.

Palavras-chave: Ímãs de Terras Raras. Sustentabilidade Ambiental. *Global Reporting Initiative*.

ABSTRACT

Rare Earth Magnets (REM) are essential for clean energies and emission control due to its application in wind turbines and electric motors. However, environmental risks and uncertainties regarding the supply of rare earth elements require new strategies towards a more sustainable production chain. The objective of this study is to propose a method to assess the environmental sustainability of REM production in Brazil, in the project phase, integrating the Global Reporting Initiative (GRI) environmental guidelines into the production flow. Initially, the selection of environmental indicators was carried out based on GRI guidelines, literature and reports. In the next step the method was structured connecting the production flow with the environmental indicators selected in the previous phase. In order to favor the interpretation of the data and the comparison among indicators, data were then normalized into CO₂ using the Eco Audit® tool, available in the CES Selector software. The emission factors were then determined, which were validated for domestic production, through the analysis and collection of CO₂ inventory data and sustainability reports. The method was then applied to the context of LABFABITR and later researchers and managers of LABFABITR evaluated the proposed methodological approach. Finally, to help formulate strategies for environmental improvement, hypothetical scenarios of REM production were proposed, in order to allow the evaluation of the current scenario in relation to the ideal one. Results show that for the production of 8 tons of REM/year are emitted the amount of 51 tons of CO₂ equivalent/year, where 79% of these emissions are from energy production. It was also evidenced that 31% of the elements involved in the production of ITR are classified as hazardous. The generation of these waste is estimated at 6.5 tons/year. In addition, 0,4 tons/year of REE waste (NdPr and NdFeB) were identified. The processes of electrolytic reduction and coating presented the higher impact, being these the priority ones for improvement actions. In addition, the ideal scenario, in terms of CO₂ emissions, is configured by 100% of national supply, combining the use of rail and waterway transport with solar energy. Finally, it is concluded that the proposed method presents contributions for the construction of the sustainable productive chain of REM.

Keywords: Rare Earth Magnets. Environmental Sustainability. *Global Reporting Initiative.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ocorrência de ETR no Brasil.....	23
Figura 2 – Cadeia industrial de terras raras no Brasil Projeto ETR-BR.....	24
Figura 3 – Beneficiamento de Terras Raras.	25
Figura 4 – Processo produtivo básico completo.....	25
Figura 5 – Diretrizes GRI da Sustentabilidade.....	29
Figura 6 – Etapas Metodológicas.	37
Figura 7 – Etapas da Pesquisa.	38
Figura 8 - Etapas de inclusão para coleta de dados dos RS do setor metalúrgico.....	41
Figura 9 – Matriz de relação indicador X processo.....	42
Figura 10 – Indicadores ambientais selecionados dos seis aspectos ambientais selecionados na pré-proposta.....	48
Figura 11 – Fatores e etapas consideradas nos distintos indicadores e suas relações.....	50
Figura 12 – Tipos de emissões e composição dos escopos.	52
Figura 13 – Distribuição geográfica dos fornecedores LABFABITR.	59
Figura 14 – Seleção dos fornecedores.....	60
Figura 15 – Avaliação ambiental preliminar do LABFABITR.....	61
Figura 16 – Categoria de Riscos por elementos.....	64
Figura 17 – Diagnostico ambiental do LABFAITR, modelo consolidado.....	67
Figura 18 – Composição percentual das estimativas de emissões (CO ₂ /kgITR), para os diferentes aspectos por processo.....	68
Figura 19 – Estimativa de geração de resíduos por processo por kg de ITR.	69
Figura 20 – Resultado da simulação da combinação de diferentes fontes energéticas, fornecedores e modal nacional rodoviário.....	72
Figura 21 – Resultado da simulação da combinação de diferentes fontes energéticas, fornecedores e modal nacional ferroviário.....	72
Figura 22 – Distribuição espacial dos fornecedores nacionais do LABFABITR em relação as ferrovias nacionais.....	73
Figura 23 – Emissões de CO ₂ para os diferentes transportes.	74
Figura 24 – Fatores de emissão anual de energia elétrica SIN.....	75
Figura 25 – Posição da planta fabril em relação a área urbana.	79

Figura 26 – Evolução de um aterro de resíduos industriais, no entorno do LABFABITR.....	80
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Análise bibliométrica de artigos envolvendo o padrão GRI no período de 2014-2019, classificados quanto aos objetivos e uso do padrão.	31
Quadro 2 - Análise bibliométrica de artigos envolvendo estudos sobre a sustentabilidade que abordem ETR ou ITR no período de 2007-2019.	33
Quadro 3- Estratégia de composição do portfólio de pesquisa.	39
Quadro 4- Aspectos e Indicadores Ambientais padrão GRI <i>Standards</i>	40
Quadro 5- Indicadores mais frequentes em RS do setor metalúrgico.	47
Quadro 6- Categorização dos indicadores quanto a natureza do impacto.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Fatores de Emissões	53
Tabela 2 – Classificação de produtos perigosos do processo produtivo ITR Brasil. .	58
Tabela 3- Fatores de Emissões	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTT – Agência Nacional de Transporte Terrestre
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
B – Borro
BR – Brasil
CERES - *Coalition for Environmentally Responsible Economies*
CERES - *Coalition for Environmentally Responsible Economies*
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
CS – Cadeia de Suprimentos
DJSI – Índice Dow Jones de Sustentabilidade
Dy – Disprósio
EA – Energia Acumulada
ETR – Elementos de Terras Raras
ETR-BR – Elementos de Terras Raras no Brasil
Fe – Ferro
FISPQ – Ficha de Informações de Segurança para Produtos Químicos
GEE – Gases com Efeito de Estufa
GRI – *Global Reporting Initiative*
GSSB – Conselho Global de Padrões de Sustentabilidade
INCT – Ímãs de Terras Raras para Indústria de Alta Tecnologia
ISO – *International Organization for Standardization*
ITR – Ímãs de Terras Raras
LABFABITR – Laboratório Fábrica de Ímãs de Terras Raras
MAGMA – *Magnetic Materials Group*
Nb – Nióbio
Nd – Neodímio
OCDE – *Organisation for Economic Co-operation and Development*
ONU – Organização das Nações Unidas
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
Pr – Praseodímio
RS – Relatório de Sustentabilidade
SASB – *Sustainability Accounting Standard Board*

SIN – Sistema Interligado Nacional

TR – Terra Rara

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	18
1.3	DELIMITAÇÃO DO TEMA	20
1.4	ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	IMÃS DE TERRAS RARAS	22
2.2	AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE	26
2.3	IMÃS DE TERRAS RARAS E SUSTENTABILIDADE	32
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	37
3.1	FASE I: SELEÇÃO DOS INDICADORES.....	38
3.2	FASE II: ESTRUTURAÇÃO DA PROPOSTA	41
3.2.1	Relação entre indicadores e processo	41
3.2.2	Normalização dos indicadores	42
3.2.3	Proposição da escala de desempenho ambiental	43
3.3	FASE III: APLICAÇÃO DO MÉTODO	44
3.4	FASE IV: AVALIAÇÃO DA ABORDAGEM METODOLÓGICA	44
3.5	FASE V: CENÁRIOS	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	CONJUNTO DE INDICADORES	46
4.2	PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DO FLUXO PRODUTIVO DE ITR.....	49
4.2.1	Matriz de Relação	49
4.2.2	Normalização – Fatores de Emissões	53

4.2.3	Desempenho ambiental	55
4.3	APLICAÇÃO DO MÉTODO AO LABFABITR	56
4.4	AVALIAÇÃO DA ABORDAGEM METODOLÓGICA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE ITR BR.	62
4.4.1	Entrevistas com pesquisadores e gestores de ITR.....	62
4.4.2	Ajustes no modelo.....	63
4.5	COMPARATIVO DE DESEMPENHO AMBIENTAL PARA DIFERENTES CENÁRIOS	69
4.5.1	Construção de cenários	70
4.5.2	Comparativo entre cenários	71
5	DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	76
6	CONCLUSÕES	82
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A– Matriz De Relação	98
	APÊNDICE B– Caracterização Dos Fornecedores E Estimativas De Emissões Para Os Diferentes Transportes.....	102

1 INTRODUÇÃO

O fornecimento seguro e acessível de energia considerando as metas sociais e climáticas representa um grande desafio, uma vez que o consumo global de energia e a dependência de combustíveis fósseis aumentam anualmente (ERKER et al., 2017). A indústria está consumindo cada vez mais recursos naturais, especialmente recursos energéticos como carvão, petróleo e gás, para atender à crescente demanda dos seres humanos (ZHOU et al., 2018). A produção e utilização de energia são responsáveis por 80% do dióxido de carbono e dois terços das emissões totais de gases com efeito de estufa (GEE) em nível mundial (IEA, 2017).

Devido à necessidade de descarbonizar as economias globais, muitos países têm se reunido para estabelecerem metas para redução das emissões e medidas de combate aos efeitos das mudanças climáticas, intensificando a busca tecnológica por novas fontes energéticas e produtos com elevada eficiência. Entre as alternativas tecnológicas atreladas à produção de energias limpas e controle de emissões, estão os Ímãs de Terras Raras (ITR) ou Ímãs Permanentes, usados, por exemplo, em turbinas eólicas e veículos elétricos.

Os ITR recebem destaque pois têm elevado produto-energia, ou seja, viabilizam a construção de equipamentos com maior eficiência energética, menor peso e tamanho e, portanto, são amplamente utilizados em aplicações de energia limpa (JIN et al., 2018). Os ITR são à base de Terra Rara – Ferro – Borro (TR-Fe-B), onde “TR” representa um elemento da família dos Elementos de Terras Raras (ETR) (WULF, 2017). Dentre os ETR, tem-se o Neodímio (Nd) como mais usual, utilizado em 25% da produção mundial de ITR, seguido do Praseodímio (Pr) (utilizado em 6%) e Disprósio (Dy) (utilizado em 1%) (WULF, 2017).

A produção desses ímãs está aumentando devido ao seu papel em motores e geradores eficientes (SCHULZE et al., 2017). Os ímãs Neodímio – Ferro e Borro (NdFeB) são considerados os ímãs permanentes mais fortes do mundo (LIMA, 2012). Estima-se que nos próximos 25 anos a demanda por Nd aumente em 700% (ALONSO et al., 2012). Essa projeção de aumento da demanda gera incertezas quanto ao fornecimento dos ETR para a produção de ITR tornando os elementos Nd, Pr e Dy como críticos no balanço da oferta e demanda (JIN et al., 2018; ZAPP et al., 2018).

A China é o maior produtor de ETR em todo o mundo, responsável por 85% da produção, seguido pela Austrália (8%) e Estados Unidos (3%) (WULF, 2017). Juntamente com a experiência em extração de óxidos de terras raras a partir dos respectivos minérios, a China também é especializada em processos produtivos de ITR (ARSHI et al., 2018), dominando a fabricação destes (WULF, 2017). Esse domínio expressivo da China sobre a cadeia de ETR permite que o país controle os preços dos ETR e dos seus produtos, ao mesmo tempo em que desestimula a produção e a pesquisa pelos demais países (WESCHENFELDER, 2012).

A falta de controle na exploração do recurso fez a China sofrer com severos problemas ambientais (ZHOU; LI; CHEN, 2017). Em 2011, o país restringiu as vendas de forma inesperada e drástica, impondo tarifas e cotas de exportação, além de reduzir o número de fabricantes licenciados, o que limitou a disponibilidade de ETR para o resto do mundo. A atitude foi tomada com base em alegações de problemas ambientais, principalmente gerado pela exploração ilegal dos ETR. Devido às incertezas a respeito da estabilidade do preço e da garantia de suprimento, os países consumidores iniciaram rapidamente uma retomada do mapeamento e da exploração desses elementos (SENADO EM DISCUSSÃO, 2011).

O Brasil se destaca como sendo o segundo país com maior reserva de ETR, no entanto, a exploração dos minérios não é expressiva, cerca de 1% do mercado mundial. O país ainda conta com um passivo ambiental onde há Nd no rejeito da atual produção de Nióbio (Nb). Com a projeção de aumento da demanda e visando contornar a dependência Chinesa e incertezas de mercado, o Brasil, por meio da ação Elementos de Terras Raras no Brasil (ETR-BR), visa desenvolver a cadeia produtiva de ITR. Dentre os projetos previstos nesta ação, está a construção de um Laboratório Fábrica denominado LABFABITR capaz de produzir inicialmente 4 toneladas/ano até alcançar as 93 toneladas anuais, a partir de terras raras produzidas no país. Este projeto está focado em ações relacionadas ao desenvolvimento tecnológico da cadeia produtiva, principalmente nas etapas de fabricação de ligas e ímãs sobre a ótica da sustentabilidade corporativa.

A sustentabilidade corporativa implica um compromisso entre as atuais necessidades ambientais, sociais e econômicas dos *stakeholders* de uma empresa e suas necessidades futuras (LIERN; PÉREZ-GLADISH, 2018). A sustentabilidade no âmbito industrial busca produzir mais e com melhor qualidade, gerando menos poluição, utilizando menos recursos naturais e considerando a responsabilidade social. No entanto, a ausência de dados acerca das considerações de sustentabilidade ambiental sobre a possível produção de ITR e os impactos

em sua cadeia, dificulta as tomadas de decisões visando um processo mais sustentável. A partir do exposto, surgem as seguintes questões de pesquisa: **(i) Quais aspectos ambientais são relevantes na produção de ITR no Brasil?** e **(ii) Como avaliar a sustentabilidade ambiental do processo produtivo dos ITR no Brasil em fase de projeto?**

No sentido de contribuir para a construção de um modelo de cadeia produtiva sustentável do ITR, sobre o pilar ambiental do tripé da sustentabilidade, este trabalho busca alinhar seus objetivos integrando as diretrizes ambientais do *Global Reporting Initiative* (GRI), considerado o padrão mais usual do mundo em relatórios de sustentabilidade, ao fluxo produtivo. A presente pesquisa resultará em um método para avaliar e gerenciar a sustentabilidade ambiental da produção ITR no Brasil, preenchendo a lacuna sobre os impactos ambientais da produção brasileira e métodos de avaliação de sustentabilidade ambiental ao contexto de ITR.

1.1 OBJETIVOS

Esta seção aborda a finalidade pela qual esta pesquisa será realizada. Engloba assim o objetivo geral e os objetivos específicos delineados.

1.1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método para avaliar a sustentabilidade ambiental da produção de Ímãs de Terras Raras (ITR) no Brasil em fase de projeto.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

- i. Identificar um conjunto de indicadores de sustentabilidade ambiental com vistas à avaliação ambiental do processo produtivo de ITR;
- ii. Estruturar proposta para avaliação da sustentabilidade ambiental do fluxo produtivo de ITR;

- iii. Aplicar o método ao contexto LABFABITR;
- iv. Avaliar a abordagem metodológica proposta para avaliação da sustentabilidade ambiental da produção de ITR BR;
- v. Comparar diferentes cenários visando um processo ambientalmente mais sustentável.

1.2 JUSTIFICATIVA

A extração e refinação de recursos naturais do subsolo através de atividades de mineração e metalurgia produziu grande parte da riqueza da sociedade atual. No entanto, essas atividades acumulam grandes volumes de resíduos que frequentemente causam grandes impactos ambientais negativos, colocando a mineração e a metalurgia entre as maiores atividades poluidoras de ambientes naturais (CRUZ-HERNÁNDEZ, 2018).

A intensificação do uso de metais de terras raras para novas aplicações em tecnologias renováveis e de comunicação aumentou a preocupação com o fornecimento futuro, bem como com os encargos ambientais associados à extração, usabilidade e disposição (perdas) desses metais (PEIRÓ; MÉNDEZ, 2013). À medida em que o processo de produção de ETR degrada o meio ambiente, seus impactos no ciclo de vida devem ser minuciosamente estudados (ARSHI et al., 2018). Entretanto, conforme advoga Ellis (2017), faltam princípios padronizados de gestão ambiental para novos setores emergentes.

Os ETRs são encontrados em todos os continentes. A palavra “raro” se deve à baixa concentração em que os elementos são encontrados. Apenas uma pequena porção de cada elemento pode ser obtida em grande quantidade de minério. Assim, dependendo da concentração de determinado elemento em determinado minério, a exploração do mesmo pode ser economicamente inviável, fator que evidencia a importância da redução de desperdícios e melhoria no aproveitamento de recursos na produção industrial. Uma preocupação é a grande quantidade de resíduos no processo de obtenção dos ETR que podem conter elementos radioativos, como o Urânio e o Tório, altamente contaminantes ao meio ambiente (LIMA et al., 2018). O desenvolvimento tecnológico (inovações na exploração, extração, processamento e o custo de cada uma dessas etapas) é o que tornará capaz o melhor aproveitamento das reservas de ETR (DELGADO et al., 2018). Assim, o primeiro passo para encontrar uma alternativa é estimar os impactos das etapas existentes para usar como referência (ARSHI et al., 2018).

O ITR representa a principal aplicação mundial de ETR, cerca de 26% em 2015 (CGEE, 2013). No entanto, os três ETR usuais na produção de ITR (Nd, Pr e Dy) são considerados críticos, ou seja, com risco de escassez. A oferta monopolística da China, as práticas ambientalmente insustentáveis na mineração e o rápido crescimento da demanda contribuem para a confirmação desse cenário de escassez (CIACCI et al., 2019). A ausência de considerações de sustentabilidade na cadeia produtiva dos ITR dificulta a formulação de estratégias para a construção de uma cadeia sustentável, fazendo-se necessário avaliar todas as etapas atreladas. Um conjunto de critérios para sustentabilidade para tecnologias de energia renovável (como o caso do ITR) se faz necessário uma vez que estas demandam grandes quantidades de recursos naturais, resultando em possíveis impactos negativos nos sistemas naturais (RÖSCH et al., 2018). Azevedo (2018) afirma que ainda não foi avaliado o impacto ambiental de toda a cadeia produtiva da metalurgia do pó, técnica por meio da qual os ITR são produzidos.

Os Relatórios de Sustentabilidade (RS) oferecem uma estrutura genérica de como as organizações podem equilibrar seus processos para práticas mais sustentáveis. O padrão GRI para RS é considerado o mais utilizado, ou seja, é a ferramenta mais usual de avaliação de desempenho ambiental e sustentabilidade (RÖNNLUND et al., 2016). Segundo o padrão GRI, as informações a serem divulgadas bem como o conteúdo específico (indicadores) se baseiam nos aspectos materiais. Os aspectos materiais refletem os impactos associados a determinada atividade. Entretanto, a aplicação de RS no setor da metalurgia ou ao contexto de empresas que utilizem ETR em seus processos é limitada, fator que dificulta as considerações sobre a sustentabilidade para o setor. Métodos e ferramentas para avaliar a sustentabilidade são de grande relevância acadêmica, no entanto, a literatura geralmente presta pouca atenção ao que exatamente medir e como interpretá-los, a fim de identificar o desempenho de sustentabilidade (BÜYÜKÖZKAN; KARABULUT, 2018).

A principal justificativa dessa pesquisa é a necessidade de se explorar mais as considerações sobre os aspectos ambientais negativos causados, pois propõe-se em realizar um diagnóstico da sustentabilidade ambiental da produção de ITR no Brasil. Este vem a ser o primeiro trabalho sobre os impactos da produção brasileira de ITR e preenche uma importante lacuna sobre métodos de avaliação de sustentabilidade ambiental aplicados a este contexto. A

pesquisa também contribui para esclarecer sobre o uso do padrão GRI como uma ferramenta de gerenciamento e avaliação do desempenho da sustentabilidade.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este trabalho tem por finalidade desenvolver um método para avaliar a sustentabilidade ambiental em fase de projeto da produção de ITR no Brasil no contexto do LABFABITR, priorizando as ações na busca de uma produção mais sustentável. Limita-se em abordar apenas o aspecto ambiental da sustentabilidade, não considerando os aspectos sociais e econômicos.

O diagnóstico e as considerações da metodologia proposta para avaliar a sustentabilidade ambiental na produção de ITR são referentes aos processos da produção de ligas e ITR com dados provenientes do projeto executivo LABFABITR, limitando-se ao chão de fábrica. Parte da metodologia aqui proposta é com base em metas e práticas ambientais pautadas no escopo dos indicadores GRI, no entanto, não serão caracterizadas práticas como a logística reversa, limitando-se a aspectos referente ao processo e práticas internas.

Indicadores referentes à biodiversidade, apesar de serem de grande importância para o setor metalúrgico, não foram considerados, pois a análise limita-se ao chão de fábrica, ou seja, não se considera a mineração, atividade de maior impacto na biodiversidade. Outra justificativa é que o local da instalação do LABFABITR é dentro de um condomínio tecnológico onde já são previstas atividades industriais, sendo assim, os impactos que afetam diretamente a biodiversidade atrelados aos ITR são referentes aos aspectos construtivos da planta fabril e no controle de efluentes e recursos, analisados em outros aspectos ambientais. O mesmo ocorre para os aspectos de conformidade ambiental, visto que o projeto passou por etapas de licenciamento nos órgãos ambientais responsáveis, como descrito no projeto executivo LABFABITR.

Apesar da literatura indicar a necessidade de considerar os aspectos ambientais em fase de projeto, para Brundage et al., (2018), as informações de sustentabilidade ambiental na indústria de manufatura não são facilmente compartilhadas entre os estágios do ciclo de vida do produto. Em particular, informações confiáveis relacionadas à fabricação para avaliar a sustentabilidade de um produto muitas vezes não estão disponíveis no estágio de projeto sendo essa uma limitação, visto que os resultados obtidos são baseados em estimativas e dados secundários.

1.4 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos assim definidos: a introdução apresenta a contextualização sobre ITR, os objetivos, tanto geral como os específicos, a fim de alcançar a proposta deste estudo. Por meio da justificativa demonstra-se a importância de identificar os aspectos ambientais que influenciam a avaliação da sustentabilidade ambiental da produção e a necessidade de um método que permita avaliar a sustentabilidade ambiental integrando os objetivos de produção aos aspectos ambientais.

No segundo capítulo, aborda-se o referencial teórico utilizado como embasamento para a pesquisa, constituindo-se dos temas relevantes para este como Imãs de Terras Raras, Avaliação da Sustentabilidade, Imãs de Terras Raras e Sustentabilidade.

A partir da conceituação feita no capítulo dois, são determinados os procedimentos metodológicos utilizados de forma a atingir os objetivos do estudo, sendo apresentado neste documento. O quarto capítulo apresenta os resultados que foram estruturados de forma semelhante ao capítulo anterior de método, para facilitar a compreensão. O quarto capítulo finaliza com comparativo de cenários onde permitiu identificar estratégias frente a metas ambientais.

Em seguida, o quinto capítulo apresenta as discussões dos resultados, trazendo comparações e discussões do trabalho com a literatura. O sexto capítulo, apresenta as conclusões, limitações e pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

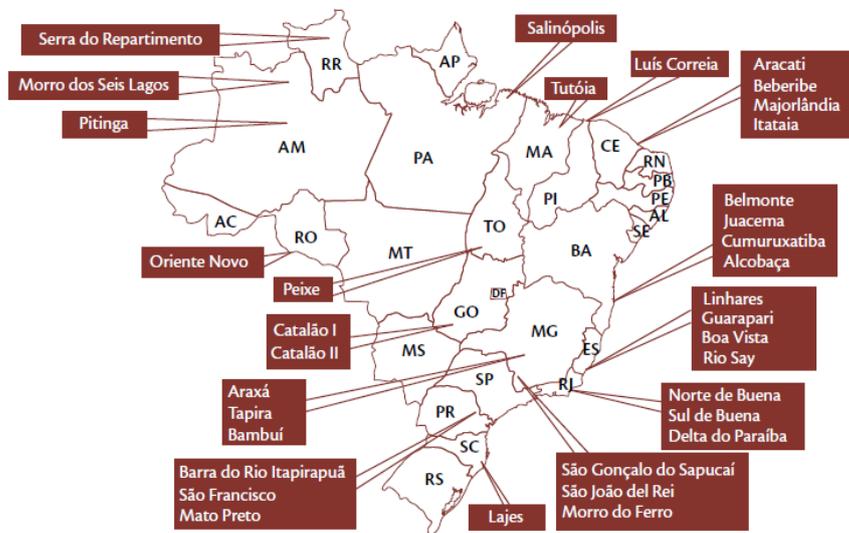
Com a finalidade de abordar os aspectos principais da dissertação, o referencial teórico está dividido em três seções, englobando os assuntos de Imãs de Terras Raras, Avaliação da Sustentabilidade, Imãs de Terras Raras e Sustentabilidade.

2.1 IMÃS DE TERRAS RARAS

A União Internacional de Química Aplicada e Pura (IUPAC) define os elementos de terras raras (ETR) como os 15 elementos de lantanídeos somados ao Escândio (Sc) e o Ítrio Y, totalizando 17 elementos da tabela periódica. A primeira aplicação industrial das terras raras data de 1891 e estava relacionada com as invenções do empresário e cientista austríaco Carl Auer Von Welsbach, que usou as terras raras para resolver o que era, naquele tempo, um grande problema técnico: a produção de luz brilhante (FERREIRA, 2013).

Estes elementos encontram-se espalhados ou misturados com outros elementos, com aparência de terra, e podem ser observados em todo o globo. Geralmente ocorrem em baixas concentrações (cerca de 3%), de modo que grandes quantidades de minério precisam ser processadas para que determinada quantidade de ETR possa ser extraída (SCHULZE et al., 2017). A produção primária de ETR está associada a impactos ambientais e sociais como radiação ionizante durante a fase de mineração, emissões de processo, deposição de rejeitos e degradação da terra (SCHULZE et al., 2017). Em relação às reservas mundiais, 44% destas concentram-se na China, seguida pelo Brasil com 17% e Austrália com 2,5% (Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, 2015). Dono da segunda maior reserva do mundo de ETR, o Brasil destaca-se devido à ocorrência de forma numerosa dos ETR, como apresentado na Figura 1. Porém, não há exploração significativa do recurso: em 2017 a produção nacional foi de 2 mil toneladas/ano, aproximadamente 1% da produção mundial (CGEE, 2013; USGS, 2018).

Figura 1 - Ocorrência de ETR no Brasil.



Fonte: CGEE (2013).

O início da produção de terras raras no Brasil ocorreu em meados da década de 1940, na Usina Santo Amaro, no Estado do Rio de Janeiro, fornecendo matéria-prima para mantas incandescentes de lâmpadas. Devido à presença de Urânio e Tório nessa monazita, em 1960, as atividades foram assumidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) (CERTI, 2017). A China iniciou na década de 1980 a produção destes elementos, com preços inferiores aos então praticados, de modo que outros países do mundo interromperam suas atividades de mineração. No entanto, devido às incertezas de fornecimento já expostas nesse trabalho, o Brasil retomou as iniciativas de exploração do recurso.

Os ETRs são essenciais para tecnologias de baixo carbono (ZAPP et al., 2018), tornando-se cada vez mais importantes na transição para uma economia verde, devido ao seu papel essencial em ímãs permanentes, fósforos de lâmpadas, catalisadores, baterias recarregáveis etc. (BINNEMANS et al., 2010). Os ETR são usados principalmente em ímãs permanentes (21%), catálise (20%), ligas (18%), produção de pós (12%) e fósforo (7%) (GWENZI et al., 2018).

O mercado internacional de ITR em 2015 atingiu aproximadamente 140 mil toneladas/ano com projeção de crescimento da demanda em 40% no ano de 2020, atingindo 200 mil toneladas/ano. No mercado nacional a projeção de crescimento é de 60% até 2020 atingindo 1,8 mil toneladas/ano (CERTI, 2017).

Devido ao potencial de exploração no Brasil e a projeção de aumento na demanda, o Projeto ETR –BR tem por objetivo viabilizar a implantação do ciclo completo da cadeia industrial de terras raras no Brasil (Figura 2), desde a produção de matérias primas até a fabricação de produtos finais, em consonância com o Plano Brasil Maior (PBM). Uma das ações do projeto está na construção do Laboratório-Fábrica de ligas e ímãs de terras raras, denominado LABFABITR.

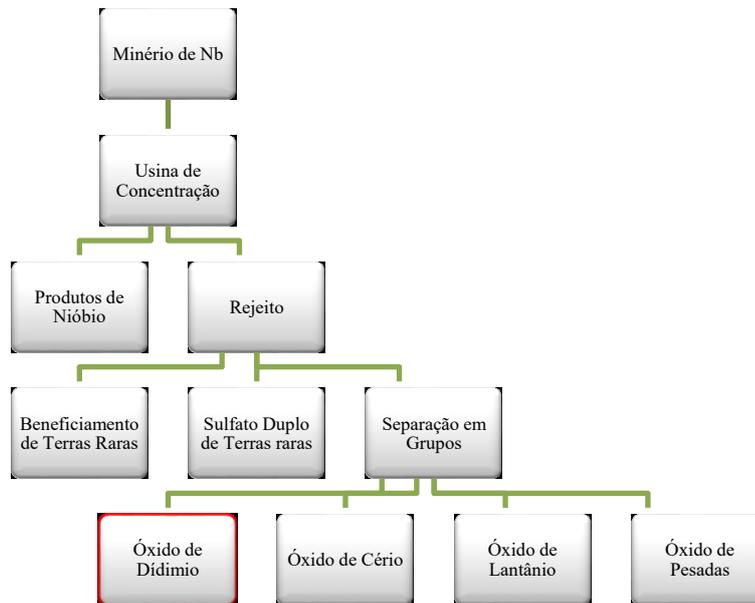
Figura 2 – Cadeia industrial de terras raras no Brasil Projeto ETR-BR.



Fonte: adaptado de CERTI (2017).

Segundo Lima et al. (2018), nos rejeitos da mineração de Nióbio da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração CBMM em Araxá, existem quantidades concentradas de ETR passíveis de exploração, incluindo Nd na forma de Óxido de Dídimo, matéria prima dos ITR. A Figura 3 apresenta o fluxograma da obtenção do Óxido de Dídimo a partir do rejeito do Nióbio.

Figura 3 – Beneficiamento de Terras Raras.



Fonte: adaptado de CBMM (2015).

Os ITR são produzidos pela técnica de fabricação denominada metalurgia do pó sendo o processo produtivo básico completo subdividido em dez etapas, apresentadas na Figura 4. Segundo o relatório técnico desenvolvido pela CERTI (2017) o processo se inicia com a etapa de redução do Óxido de Dídimo para obtenção do Dídimo metálico.

Figura 4 – Processo produtivo básico completo.



Fonte: Adaptado da CERTI (2017).

A fabricação de ligas específicas é feita por meio da técnica de *Strip Casting*, em que se faz a fusão e resfriamento controlado da matéria-prima para a obtenção de uma microestrutura anisotrópica (alinhamento preferencial dos momentos magnéticos). A etapa seguinte consiste em fragmentar grosseiramente as ligas obtidas na etapa anterior por meio de técnica da decrepitação por hidrogênio e, na sequência, cominuição/moagem utilizando técnica de moagem autógena por jatos opostos. Este pó produzido é compactado sob um campo magnético para orientação dos domínios magnéticos do material. O pó compactado a verde é então sinterizado em um forno a vácuo. O imã sinterizado sofre ajustes dimensionais por diferentes processos de usinagem. Após a usinagem, ocorre o revestimento e, em seguida, as peças metálicas são magnetizadas e embaladas para expedição.

2.2 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

As transformações significativas ocorridas no meio ambiente, devido ao crescimento exponencial do desenvolvimento tecnológico, fazem surgir as preocupações quanto a ações visando o desenvolvimento sustentável¹. A definição mais usual para este termo foi apresentada no relatório da Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED, 1987 - *The Brundtland Report*), como “desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas próprias necessidades”.

Elkington (1994) propôs o *Triple Bottom Line* (TBL) (Tripé da Sustentabilidade) estabelecendo relações entre as organizações e o desenvolvimento sustentável, operacionalizando o conceito de sustentabilidade ao medir o desempenho de um contexto nas dimensões ambiental, econômica e social. O conceito refere-se ao equilíbrio econômico, qualidade ambiental e progresso social como indicadores de sustentabilidade corporativa (ARAS; TEZCAN; FURTUNA, 2018).

No âmbito industrial, o termo sustentabilidade considera a criação de produtos a partir de processos que minimizem os impactos negativos na natureza, conservando energia e recursos, sendo seguro para os trabalhadores e consumidores além de economicamente viável (THE US DEPARTMENT OF COMMERCE, 2015). Os processos de fabricação têm um grande impacto no meio ambiente, incluindo alto consumo de energia, geração de resíduos e

¹ Sartori, Latrônico e Campos, (2014) consideram os conceitos desenvolvimento sustentável e sustentabilidade como distintos. No entanto, nessa dissertação sua distinção conceitual não será discutida, pois não se trata do tema central do trabalho.

emissões de GEE (BRUNDAGE et al., 2018). Desta forma, a sustentabilidade ambiental limita-se ao pilar ambiental do Tripé da Sustentabilidade.

Para empresas de manufatura envolvidas em um ambiente cada vez mais insustentável, a redução do consumo de recursos de seus processos de produção é essencial para manter a competitividade, mas também é crucial para a sobrevivência da empresa (RIDAURA et al., 2018). A extração e transformação de matérias-primas em produtos é um grande desafio das indústrias manufatureiras em adotar práticas mais sustentáveis (GBEDEDU; LIYANAGE; GARZA-REYES, 2018).

O termo avaliação consiste em um processo de coleta e análise de dados, buscando verificar se os objetivos propostos foram atingidos (HAYDT, 1997). Waas et al. (2014) destacam os desafios quanto a implementação de ações visando o desenvolvimento sustentável, sendo a avaliação da sustentabilidade e os indicadores de sustentabilidade ferramentas de apoio à decisão, pois contribuem para uma melhor compreensão do significado de sustentabilidade e sua interpretação em determinado contexto. Os indicadores podem comunicar ou informar sobre o progresso em direção a uma determinada meta, como por exemplo, o desenvolvimento sustentável, mas também podem ser entendidos como um recurso que deixa mais perceptível uma tendência ou fenômeno, que não seja imediatamente detectável (HAMMOND, 1995).

Modelos, métricas e ferramentas para avaliar as atividades de produção auxiliam os tomadores de decisão a se afastarem de práticas insustentáveis (SANTIAGO-BROWN, 2015). Büyüközkan e Karabulut (2018) consideraram as ferramentas mais utilizadas na avaliação de desempenho da sustentabilidade na indústria os padrões da *International Organization for Standardization* (ISO), da *Carbon Disclosure Project*, da *Global Reporting Initiative* (GRI) e dos Índices Dow Jones de Sustentabilidade (DJSI). Ainda segundo os autores, os RS são abordados em 13% das publicações sobre avaliação de sustentabilidade (BÜYÜKÖZKAN; KARABULUT, 2018).

Os relatórios de sustentabilidade surgiram em meados do ano de 1990 como um meio para as organizações empresariais gerenciarem e equilibrarem seus esforços produtivos com os do meio ambiente e da sociedade (CHRISTOFI; SISAYE, 2012). As diretrizes do padrão GRI tornaram-se as mais adotadas no mundo (GAVANA; GOTTARDO; MOISELLO, 2016).

Fundada em Boston em 1997 pela *Coalition for Environmentally Responsible Economies* (CERES) e o *Tellus Institute*, a *Global Reporting Initiative* (GRI) é uma organização não governamental que produz os padrões amplamente utilizados para relatórios de sustentabilidade, com milhares de repórteres em mais de 90 países. Há parcerias estratégicas com organizações internacionais, incluindo a *Organisation for Economic Co-operation and Development* (OCDE), o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a ISO (GRI 2017). O padrão fornece uma estrutura para práticas de divulgação, publicando indicadores e diretrizes padronizados, para que os relatórios possam ser utilizados para avaliar, monitorar e comparar o desempenho da sustentabilidade corporativa (TALBOT; BOIRAL, 2018).

A primeira versão das diretrizes para relatórios de sustentabilidade da GRI (G1) foi lançada em 1997. Em 2002, a versão foi atualizada para diretrizes da segunda geração (G2). O lançamento da terceira geração ocorreu em 2006 (G3) e atualizada em 2011 (G3.1). Em 2013, foi lançada a quarta versão das diretrizes (G4) e entre as principais alterações para esta quarta geração, destaca-se a inclusão da cadeia de fornecedores. Neste sentido, as organizações devem reportar informação sobre a gestão das suas cadeias de fornecedores em cada pilar (Econômico, Ambiental e Social), quando este tema é considerado material. Entre as modificações evidenciam também: (i) alterações quanto a materialidade; (ii) divulgação de informação sobre governança, remuneração, ética e integridade; (iii) formas de gestão por via de uma uniformização do conteúdo; (iv) níveis de aplicação com a substituição dos níveis A, B e C por Essencial e Abrangente; e (v) uma nova tabela GRI, com uma coluna para a verificação externa.

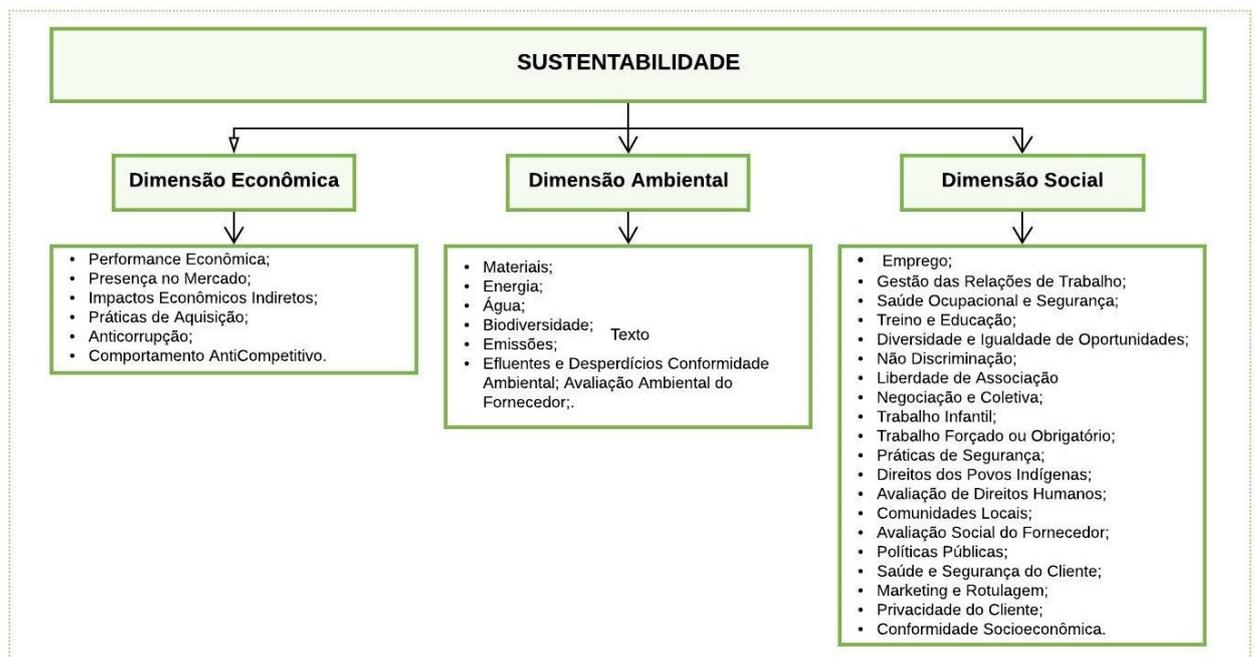
Segundo o padrão G4, o tema e os indicadores (conteúdo específico) a serem relatados são delimitados com base na materialidade. Os aspectos materiais são aqueles que refletem os impactos econômicos, ambientais e sociais significativos da organização ou influenciam substancialmente as avaliações e decisões de *stakeholders* (GRI, 2013). Já o aspecto ambiental é definido pela ISO 14001:2015 (ABNT 14001, 2015) como elemento das atividades, produtos ou serviços de uma organização que pode interagir com o meio ambiente, como, por exemplo, materiais e energia.

Em outubro de 2016 foram lançados os primeiros padrões globais de relatórios de sustentabilidade sob a versão GRI *Standards*, com a obrigatoriedade datada em 1 julho de 2018 (GRI, 2017). Desenvolvida pelo Conselho Global de Padrões de Sustentabilidade (GSSB), a versão inclui todos os principais conceitos e divulgações das Diretrizes GRI G4,

aprimorados com uma estrutura mais flexível, requisitos mais claros e linguagem mais simples. Seu objetivo é que todas as organizações informem publicamente sobre seus impactos econômicos, ambientais e sociais e sua contribuição para o desenvolvimento sustentável, além de servir como referência confiável para formuladores de políticas e reguladores. O novo padrão serviu como base para a construção de um índice para analisar informações ambientais em empresas internacionais (GALLEGO-ÁLVAREZ; LOZANO; RODRÍGUEZ-ROSA, 2018).

O padrão *Standards* conta com um conjunto de 36 normas, consistindo em padrões universais (GRI 101-103) e padrões específicos para relatar materiais econômicos (GRI 200), ambientais (GRI 300, incluindo padrões para emissões de GEE, água e biodiversidade) e tópicos sociais (GRI 400), constituindo assim um modelo genérico da gestão da sustentabilidade, como observado na Figura 5.

Figura 5 – Diretrizes GRI da Sustentabilidade.



Fonte: Fonte: GRI (2016).

O uso dos padrões GRI por pesquisadores é bem difundido. Uma busca na base de dados *Scopus* em 20 de fevereiro de 2019 com a palavra-chave “*Global Reporting Initiative*”,

limitada para artigos e revisões, trouxe um resultado de 492 publicações. Na análise das publicações, foram observadas cinco finalidades principais quanto ao uso do GRI.

Devido ao caráter voluntário dos relatórios, estes demonstram inconsistências que implicam em dificuldades de avaliar em termos absolutos e conseqüentemente comparações entre diferentes organizações quanto ao desempenho da sustentabilidade (SETHI; MARTELL; DEMIR, 2017). Dentro desse contexto, os trabalhos que abordam o padrão GRI concentram-se em suprir esta lacuna propondo métodos e ferramentas que, além de avaliar a sustentabilidade, permitam a comparação do desempenho entre setores e ou regiões. O Quadro 1, apresenta os objetivos abordados pelos artigos, associado com o uso dos relatórios GRI.

Quadro 1 - Análise bibliométrica de artigos envolvendo o padrão GRI no período de 2014-2019, classificados quanto aos objetivos e uso do padrão.

Objetivo	Uso					
	Indicadores	Análise de Conteúdo	Diretrizes	Coleta de Dados	Indicadores + Diretrizes	Diretrizes + Coleta de dados
Avaliação da Sustentabilidade (atribuição quantitativa)	GALLEGO-ÁLVAREZ; LOZANO; RODRÍGUEZ-ROSA (2018);	YADAVA; SINHA (2016);		CALABRESE et al. (2016); JOSEPH (2016); BELLANTUONO; PONTRANDOLFO; SCOZZI (2016)		
Avaliação da Sustentabilidade (proposta de métodos)	CANTELE; TSALIS; NIKOLAOU (2018); TSALIS; AVRAMIDOU; NIKOLAOU (2017); DE LIMA et al. (2016); CEULEMANS; LOZANO; ALONSO-ALMEIDA (2016)	THIJSENS; BOLLEN; HASSINK (2016);	ROBINSON et al. (2018);	BOIRAL; HERAS-SAIZARBITORIA (2017); VIGNEAU; HUMPHREYS; MOON (2016);	VELEVA; BODKIN; TODOROVA (2017);	
Análise da Qualidade de Divulgação	CANTELE; TSALIS; NIKOLAOU (2018);	TALBOT; BOIRAL (2018); BRAAM et al. (2016);		TSCHOPP; NASTANSKI (2015); SETHI; MARTELL; DEMIR (2017); LEONG et al. (2014);	DU PLESSIS; BAM (2018);	
Comparativo entre Práticas, Padrões e ou diferentes Padrões	PERLIN, et al. (2018);	MASUD; HOSSAIN; KIM (2018); CHAUVEY et al. (2015); TRAXLER; GREILING (2019); ORAZALIN; MAHMOOD; NARBAEV (2019); BATISTA; FRANCISCO (2018); MIGDADI (2018).	TOST et al. (2018); WAGNER; SEELE (2017); CARDONI; KISELEVA; TERZANI (2019);	FERNANDEZ-FEIJOO; ROMERO; RUIZ (2014); MIGDADI; OMARI (2019);		
Motivações e Influências nas divulgações	TARQUINIO; RAUCCI; BENEDETTI (2018);	COMYNS (2016); CHEN; TANG; FELDMANN (2016); HERNÁNDEZ PAJARES (2018);	YANG et al. (2017); GARCÍA-PÉREZ; MUÑOZ-TORRES; FERNÁNDEZ-IZQUIERDO (2017); LOZANO; NUMMERT; CEULEMANS (20116); UMARASINGHE; WILL; HOSHINO (2018),	MAHMOOD et al. (2018); BOIRAL; HERAS-SAIZARBITORIA (2017); KUZEY; UYAR (2017); GAVANA; GOTTARDO; MOISELLO (2017); GUESSER, et al. (2016);	HERNÁNDEZ-PERLINES; RUNG-HOCH (2017);	FUENTE; GARCÍA-SÁNCHEZ; LOZANO (2017);
Modelo de Tomada de Decisão					TALEIZADEH; HAGHIGHI; NIAKI (2019)	
Levantamento de Práticas		ORAZALIN; MAHMOOD, (2018)				

Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

Há poucas considerações sobre avaliação de sustentabilidade ao contexto dos ETR ou no setor da metalurgia, sendo os aspectos materiais para o setor uma importante lacuna evidenciada, pois apesar do padrão GRI ser uma estrutura genérica devem-se considerar as peculiaridades setoriais e regionais para delimitar os aspectos materiais.

2.3 IMÃS DE TERRAS RARAS E SUSTENTABILIDADE

Com o intuito de aprofundar sobre a sustentabilidade no contexto de TR e ITR realizou-se uma análise bibliométrica entre os anos de 2007 a abril de 2019². Utilizou-se a base de dados *Scopus* e *Web of Science* com as palavras chaves: ("*Sustainability Assessment*" OR "*Environmental Assessment*" OR "*Environmental Performance*" OR "*Life Cycle Assessment*" OR "*Environmental Indicators*" OR "*Environmental Assessment Tools*") AND ("*Rare Earth Magnets*" OR "*Permanent Magnets*" OR "*Metallurgy*"). Houve um retorno de 183 artigos pela *Scopus* e pela *Web of Science* 43, totalizando 226. Após a exclusão dos duplicados (8) iniciou-se a seleção dos artigos através da leitura de títulos e resumos, resultando em 45 artigos que compuseram o portfólio. Destes, 17 publicações abordam ETR ou ITR.

Diferentes setores como, por exemplo, o de mineração (MARX et al., 2018; ZAIMES et al., 2015; SWART; DEWULF, 2013), de metalurgia (XIAO, 2003; WANG, 2012), automotivo (NORDELÖF, et al. 2019; HERNANDEZ et al., 2017) e de energia (FTHENAKIS; WANG; KIM, 2009) são abordados nos estudos de sustentabilidade e ETR e ITR. O Quadro 2 apresenta a classificação de pesquisas que abordam ETR ou ITR, as quais foram classificadas quanto a (i) ferramenta, a (ii) dimensão da sustentabilidade e o (iii) elemento, produto ou processo analisado. Em relação às dimensões da sustentabilidade consideradas nas publicações, a dimensão ambiental é a mais abordada (100%). Essa dimensão foi combinada à dimensão econômica em 13% das publicações e combinada à dimensão social em 7%. Quanto a ferramenta, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é mais utilizada.

² A última atualização da busca foi realizada em 20 de fevereiro de 2019.

Quadro 2 - Análise bibliométrica de artigos envolvendo estudos sobre a sustentabilidade que abordem ETR ou ITR no período de 2007-2019.

Autor (Ano)	Social (S) Ambiental (A) Econômico (E)	Ferramenta	Elemento; Produto ou Processo
NORDELÖF et al. (2019)	A	ACV	ITR
CIACCI et al. (2019)	A	Modelo Dinâmico	ETR
MARX et al. (2018)	A	ACV	ETR
ZAPP et al. (2018)	A	ACV	Disprósio
ARSHI; VAHIDI; ZHAO (2018)	A	ACV	Fósforos e ITR
NORDELÖF (2018)	A	ICV	Veículo Elétricos /ITR
NORDELÖF (2018)	A	ICV	Veículo Elétricos /ITR
WULF et al. (2017)	A+S	ACV+ACV Social	ITR / Turbinas Eólicas
SCHULZE et al. (2017)	A+E	Modelo de Simulação	ITR
BUSCH (2017)	A+E	Modelo Dinâmico	ITR
HERNANDEZ et al. (2017)	A	ACV	ITR
LEE; WEN (2017)	A	ACV	ETR
ZHOU; LI; ZHAO; WANG (2016)	A	ACV	ETR
LLOBERAS-VALLS; PÉREZ; GOMIS-BELLMUNT (2016)	A	ACV	ITR
MONFARED; FURBERG; PALM (2014)	A	ACV	Refrigerador / ITR
SPRECHER et al. (2014)	A	ICV	ITR
BINNEMANS et al.(2013)	A	Revisão de Literatura	ETR

ACV: Análise do Ciclo de Vida; ICV: Inventário do ciclo de vida.

Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

A rota de produção virgem dos ITR foi comparada com dois processos hipotéticos de reciclagem em termos de impacto ambiental no cenário de produção Chinesa por Sprecher et al. (2014). Para os autores, cerca de 50% do Nd se perde ao longo da cadeia, fato que evidencia a necessidade de ferramentas de gestão do recurso mais eficientes, principalmente pelo impacto da extração do elemento. Apesar dos ITR estarem atrelados a tecnologias limpas

sua aplicação foi questionada pelos autores Monfared, Furberg e Palm (2014), que investigaram se refrigeradores com motores com ITR são mais ecológicos que por compressão tradicional. Segundo os autores, a eficiência nos motores com ITR pode não compensar os impactos ambientais relacionados a cadeia dos ITR.

Os impactos ambientais quanto ao uso de ITR também são discutidos por Lloberas-Valls, Pérez e Gomis-Bellmunt (2015), que comparam os impactos de duas tecnologias para aplicações de energia eólica *offshor*, visando detectar e fazer recomendações para redução dos impactos resultando na quantificação de cada componente necessário para a produção. No contexto de veículos elétricos, Hernandez et al. (2017) comparam o desempenho ambiental nos motores de tração convencionais e motores elétricos. Os autores concluem que o desempenho ambiental do motor de tração está intimamente ligado à sua eficiência, sendo assim a seleção de materiais durante o projeto deve se concentrar mais na preservação ou melhoria da eficiência do motor do que em materiais com baixo impacto ambiental durante a produção.

Busch, Dawson e Roelich (2017) avaliaram essa transição através de modelos de estoque e fluxo e analisam iniciativas da Economia Circular como Reutilização e Remanufatura de componentes tecnológicos. Segundo os autores, as intervenções de economia circular, como a reciclagem e a reutilização de tecnologias, são defendidas como soluções que reduzem a dependência de materiais críticos, bem como a redução da demanda de materiais primários e os impactos ambientais associados à sua extração. A reciclagem de ITR também é abordada por Schulze et al. (2017) que avaliam os efeitos da reciclagem de NdFeB em larga escala no mercado global de terras raras. Para os autores, a produção primária poderia ser parcialmente evitada ao se introduzir uma rota de produção secundária para o mercado de terras raras contribuindo assim para o problema da balança entre oferta e demanda.

A dimensão social e ambiental é abordada por Wulf et al. (2017), onde os autores discutem a facilitação da aplicação de Avaliação do Ciclo de Vida somada a Avaliação Social do Ciclo de Vida analisando a produção e fornecimento de materiais críticos por diferentes provedores em diferentes posições geográficas. No entanto, para os autores, a avaliação do fornecimento sustentável de metais ETR para a produção de ITR é muito afetada pela baixa quantidade de dados disponíveis para todas as dimensões. A falta de disponibilidade de dados também é citada por Arshi, Vahidi e Zhao (2018). Ao analisar a avaliação do ciclo de vida de quatro fósforos de terras raras, juntamente com ímãs de NdFeB, os autores consideram dados

de produto reais de instalações de produção de ETR como extremamente difícil de encontrar, sendo esta uma importante limitação do trabalho (ARSHI; VAHIDI; ZHAO, 2018).

Os impactos da mineração são avaliados a partir de meio da ACV por Marx et al. (2018) durante a produção de 1 kg de ímã de boro de ferro neodímio (NdFeB) em três depósitos importantes de ETR: (i) Bayan Obo (China) considerada a maior produtora mundial; (ii) Mount Weld (Austrália), considerada a segunda maior; e (iii) Mountain Pass (EUA). O melhor desempenho frente aos aspectos ambientais é observado na mina americana devido ao melhor manuseio de produtos químicos. Em contrapartida, o pior desempenho observado foi o chinês.

Nordelöf et al. (2018) fornecem uma estimativa de massa escalável e inventário de fabricação para uma típica máquina de tração automotiva elétrica. Os riscos associados na mineração, o consumo de energia e matérias virgem são apontados pelo autor como os principais desafios para mitigar os impactos ambientais referentes a transição para veículos elétricos. O autor, em 2019, volta a avaliar o desempenho dos motores de ITR através de uma combinação entre dados técnicos dos motores e ACV, onde os impactos nas alterações climáticas e na toxicidade humana foram os mais importantes. As principais metas identificadas de projeto do motor é a alta eficiência energética, alojamentos delgados, bobinas compactas, laminados segmentados para reduzir o desperdício de produção e fácil desmontagem.

O suprimento por meio de fontes secundárias, como forma de gerir as incertezas de mercado é abordada por Ciacci, et al. (2019). Por meio de um modelo dinâmico de estoque e fluxo, os autores constatam que 50% da demanda anual de Neodímio na Europa poderia ser suprida pela oferta secundária interna, reduzindo significativamente as emissões de GEE. No entanto, o design do produto, a coleta de fim de vida útil e os problemas de preço de sucata são as principais barreiras à recuperação do Neodímio. Os resultados obtidos pelos autores vão de encontro com o que apregoa os autores Busch, Dawson e Roelich (2017), os quais também utilizaram modelo dinâmico para avaliar fontes secundárias de ETR.

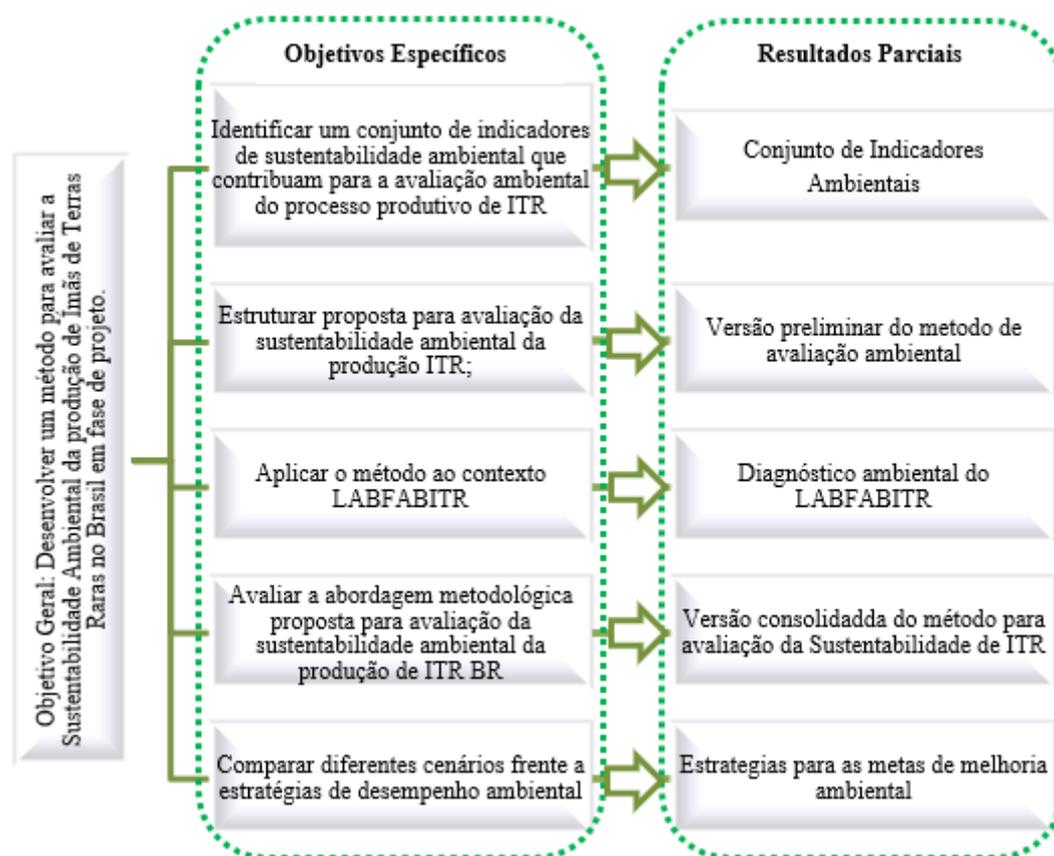
Na análise da literatura acerca do tema, foi possível identificar as incertezas quanto à capacidade de suprimento do ETR e o grande impacto em sua cadeia principalmente na fase da sua extração (mineração). Observa-se como um importante aspecto material para a sustentabilidade no ITR a avaliação dos fornecedores da produção ITR, como uma forma de

estender as práticas ambientais da produção do ITR além dos limites da fábrica. A partir dos assuntos tratados neste capítulo, confirma-se a evidência da necessidade de caracterizar os aspectos ambientais representativos ao processo de ITR, sendo este um passo na direção da seleção de indicadores ambientais adequados que resultem em uma avaliação eficaz da sustentabilidade ambiental.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta seção é constituída pelos procedimentos metodológicos empregados no desenvolvimento dessa pesquisa. A dissertação tem como resultado final o desenvolvimento e a descrição de um método para avaliação da sustentabilidade ambiental da produção de ITR no Brasil em fase de projeto. Desta forma, o objetivo geral proposto será auferido por meio da composição de cinco resultados parciais conforme observado na Figura 6.

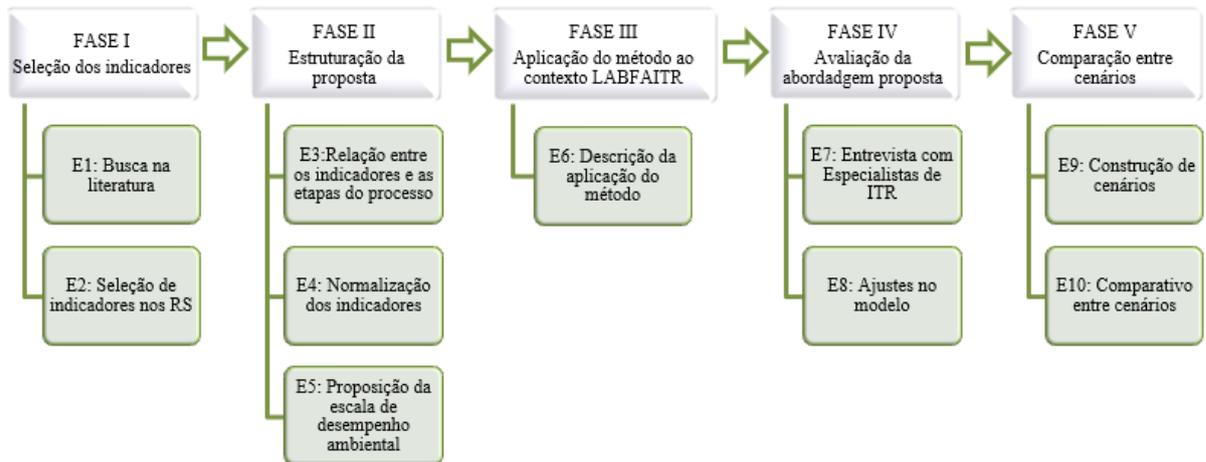
Figura 6 – Etapas Metodológicas.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

Para atingir tais resultados, a pesquisa é dividida em cinco fases, subdivididas em dez etapas de pesquisa, conforme a Figura 7. As fases e as etapas são descritas na sequência. De forma geral, o processo envolve a seleção de um conjunto limitado de indicadores, a coleta de dados, o tratamento e a análise dos dados e, ainda, o envolvimento com as partes interessadas.

Figura 7 – Etapas da Pesquisa.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

3.1 FASE I: SELEÇÃO DOS INDICADORES

Na primeira fase da pesquisa, para a etapa de análise da literatura (E1), foram seguidos os passos propostos por Denyer e Tranfield (2009): (i) formulação da questão, (ii) localização dos estudos, (iii) seleção do estudo e avaliação, e (iv) análise e síntese. Os passos foram realizados duas vezes, considerando primeiramente publicações acerca do tema GRI e na sequência, acerca dos temas sustentabilidade e ITR (ver Quadro 3).

Quadro 3- Estratégia de composição do portfólio de pesquisa.

	GRI	Sustentabilidade + ITR
Questão de Pesquisa	Como o padrão GRI é usado na avaliação ou gestão da Sustentabilidade?	Quais são aspectos ambientais relevantes na produção de ITR?
Critério para escolha das bases de dados	<i>Scopus</i>	<i>Scopus + Web of Science</i>
Critério de inclusão e exclusão	Idioma inglês, contendo em seu título, resumo ou palavras-chave Delimitação Temporal: 2004-2017 Conceito Qualis	Idioma inglês, contendo em seu título, resumo ou palavras-chave
Termos usados na pesquisa	<i>"Global Reporting Initiative"</i>	<i>("Sustainability Assessment" OR "Environmental Assessment" OR "Environmental Performance" OR "Life Cycle Assessment" OR "Environmental Indicators" OR "Environmental Assessment Tools") AND ("Rare Earth Magnets" OR "Permanent Magnets" OR "Metallurgy")</i>
Software	<i>Mendeley® Excel</i>	
Critério de análise sistemática	Finalidade do uso	Dimensão da sustentabilidade, ferramenta, indicador

Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

As duas primeiras etapas (E1 e E2) estão relacionadas com a identificação do conjunto de indicadores cabíveis ao processo produtivo considerado. Para isso foi realizada a seleção de indicadores nos Relatórios de Sustentabilidade com base nas diretrizes e indicadores reportados (CANTELE; TSALIS; NIKOLAOU, 2018; TSALIS; AVRAMIDOU; NIKOLAOU, 2017; DE LIMA et al., 2016; CEULEMANS; LOZANO; ALONSO-ALMEIDA, 2016; VELEVA; BODKIN; TODOROVA, 2017).

O conjunto de indicadores ambientais, segundo o padrão GRI Standards é dividido em 8 aspectos ambientais, conforme apresentados no Quadro 4, com seus respectivos indicadores.

Quadro 4- Aspectos e Indicadores Ambientais padrão GRI *Standards*

Aspectos	Indicadores
Materiais	Materiais usados por peso ou volume; Materiais de entrada reciclados usados; Produtos recuperados e seus materiais de embalagem
Energia	Consumo de energia dentro da organização; Consumo de energia fora da organização; Intensidade energética; Redução do consumo de energia; Reduções nos requisitos de energia de produtos e serviços.
Água	Retirada de água por fonte; Fontes hídricas significativamente afetadas pela retirada de água; Água reciclada e reutilizada.
Biodiversidade	Sites operacionais de propriedade, alugados, gerenciados em, ou adjacentes a áreas protegidas e áreas de alto valor de biodiversidade fora áreas protegidas; Impactos significativos de atividades, produtos e serviços na biodiversidade; Habitats protegidos ou restaurados; Espécies da Lista Vermelha da IUCN e espécies da lista nacional de conservação com habitats em áreas afetadas por operações
Emissões	Emissões Diretas (Escopo 1) de GEE; Energia indireta (Escopo 2) Emissões de GEE; Outras emissões indiretas (escopo 3) de GEE; ntensidade das emissões de GEE; Redução de emissões de GEE; Emissões de substâncias destruidoras de ozono (ODS); Óxidos de nitrogênio (NOX), óxidos de enxofre (SOX) e outros; Emissões atmosféricas significativas.
Efluentes e Desperdícios	Descarte de água por qualidade e destino; Resíduos por tipo e método de disposição; Derramamentos significativos; Transporte de resíduos perigosos; Corpos de água afetados por descargas de água e /ou escoamento.
Conformidade Ambiental	Não conformidade com leis e regulamentos ambientais
Avaliação Ambiental do fornecedor	Novos fornecedores que foram selecionados usando critérios ambientais; Impactos ambientais negativos na cadeia de fornecimento e ações tomadas

Fonte: GRI (2016).

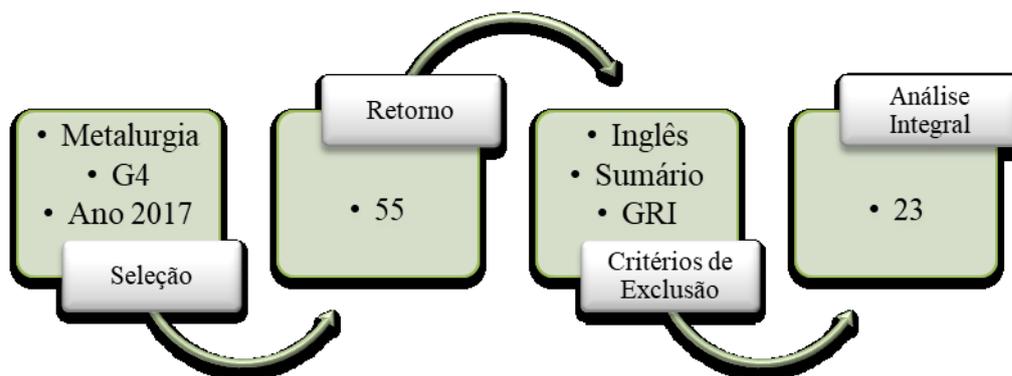
Os indicadores compõem o conteúdo padrão específico, que segundo as orientações GRI, são selecionados com base nos aspectos materiais relevantes à empresa. Em síntese, ao definir quais aspectos são relevantes a determinada atividade e/ou setor, os indicadores do GRI são selecionados. No entanto, o padrão *Standards*, teve sua obrigatoriedade datada em 1 julho de 2018 e não há relatórios de sustentabilidade disponível³ no padrão para o setor. Sendo assim, o levantamento dos indicadores ambientais aplicados ao contexto da metalurgia foi feito considerando os dados reportados por empresas do setor na versão G4 do GRI.

Para tal, foi realizada uma busca por relatórios de sustentabilidade de empresas de ITR no mundo todo, considerando como canal de busca *websites* de empresas e a base de dados do GRI. Não foram identificados relatórios de sustentabilidade de empresas de ITR, assim o levantamento é realizado para o setor de metalurgia, visto que a produção dos ITR é

³ Busca realizada 07 de outubro de 2018.

através do processo denominado metalurgia do pó. Após a busca por relatórios, houve a análise de conteúdo dos relatórios selecionados, realizando-se a coleta de dados, ou seja, os indicadores reportados. Os critérios estabelecidos para seleção dos relatórios estão apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Etapas de inclusão para coleta de dados dos RS do setor metalúrgico.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

3.2 FASE II: ESTRUTURAÇÃO DA PROPOSTA

A segunda fase é constituída em estruturar o método que visa o diagnóstico ambiental da produção de ITR no Brasil. A estrutura proposta é baseada em uma metodologia baseada em uma matriz de relação, onde os indicadores são representados nas colunas e a caracterização do processo nas linhas. Deste modo, quando cruzadas com as características ambientais e operacionais da atividade, levam a determinação dos impactos do processo avaliado. O método foi construído em três etapas principais: (i) Relação entre indicadores e fluxo produtivo (matriz de relação); (ii) Normalização dos indicadores; e (iii) Desempenho ambiental.

3.2.1 Relação entre indicadores e processo

As medições em cada etapa do processo foram delimitadas com base nas orientações setoriais do GRI. A etapa permitiu delimitar o escopo de cada indicador e estabelecer relação

entre os diferentes aspectos e indicadores ambientais. Para a organização de coleta de dados e posterior análise dos impactos ambientais é proposta uma matriz de relação (E3), onde os indicadores são representados nas colunas e a caracterização do processo nas linhas. A estrutura proposta é exemplificada na Figura 9.

Figura 9 – Matriz de relação indicador X processo.

Processo	Elementos		Indicadores (kg)		
	Entrada	Saída	Indicador A	Indicador B	Indicador C

Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

3.2.2 Normalização dos indicadores

Com o propósito de facilitar a interpretação dos dados e comparação entre indicadores, os dados foram normalizados em CO₂ (E4) por meio da ferramenta *Eco Audit*®, disponível no *software CES Selector*®, onde foram estimados os fatores de conversão. O *software* também foi usado para determinar as emissões indiretas da produção e consumo de energia.

A ferramenta *Eco Audit*® estima a energia usada e o CO₂ produzido durante cinco anos de vida, nas fases de um produto (material, fabricação, transporte, uso e fim de vida), e identifica qual fase tem a contribuição dominante (CES EDUPACK, 2018). Esta é uma ferramenta complementar ao *CES Selector*®, desenvolvida com base na metodologia de Michael F. Ashby para a seleção de materiais. O *software* baseia-se nos dados ambientais da *Granta Design*® para quantificar o impacto ecológico das principais fases da vida de um material, ajudando a identificar os custos ambientais mais significativos e, assim, concentrar a atenção nas áreas que podem levar às maiores melhorias. Fundada em 1994 pela universidade de Cambridge pelos professores Mike Ashby e David Cebon a *Granta Design*® é considerada a maior empresa e organização de pesquisa e desenvolvimento e informação (P&D) operando no mercado de tecnologia de informação de materiais.

A revisão de literatura permitiu identificar que a ferramenta de Análise de Ciclo de Vida é amplamente utilizada nos estudos que envolvem a sustentabilidade e ITR e ETR. Entretanto, Ashby et al. (2009) ressaltam que a avaliação do ciclo de vida (ACV) é demorada, cara e exige muitos detalhes, não conseguindo lidar com o seguinte problema: 80% da carga ambiental de um produto é determinada nos estágios iniciais do projeto, quando muitas decisões ainda não são fluidas. Ainda segundo os autores, os dados de saída da ACV nem sempre são de fácil interpretação ou relação com os aspectos do design. Neste sentido, a metodologia proposta pelo *software* CES Selector® é amplamente utilizada para fins de projeto, uma vez que muitas entradas diferentes podem ser consideradas, tais como propriedades térmicas, comportamento mecânico, preço, disponibilidade, reciclabilidade, pegada de CO₂, entre outros (ZANOLETTI et al., 2018).

3.2.3 Proposição da escala de desempenho ambiental

Após os dados organizados na matriz de relação e já normalizados, de modo a identificar qual a etapa mais impacta no processo, é então proposto um valor de desempenho ambiental para as distintas etapas do processo (E5), obtido através da Equação 1. A equação proposta foi adaptada de metodologias de valoração ambiental e matriz de impacto (MONTALVÁN et al, 2018; IBAMA, 2016; SANCHEZ, 2002), onde os maiores valores obtidos representam o pior desempenho ambiental e logo, os pontos prioritários de ações.

$$D = (\sum IN - \sum IP) * (P/100) \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

D = Desempenho

IN = Indicadores Negativos em kg

IP = Indicadores Positivos em kg

P = Número de Indicadores positivos na determinada etapa

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de MONTALVÁN et al (2018), IBAMA (2016) e SANCHEZ (2002).

Para identificar os valores de IN e IP utilizou-se a categorização dos indicadores como positivos ou negativos, a qual foi realizada considerando dados do setor de mineração, energia, transporte e disposição de resíduos, retirada de água e emissões. Para os indicadores categorizados como positivo, foi atribuído o peso de -1, ou seja, os indicadores classificados como positivos representam redução nos impactos (BNDS, 2016; IBAMA, 2016). Um aspecto é categorizado como positivo ou benéfico quando sua manifestação resulta na melhoria da qualidade ambiental, já o negativo ou adverso, quando sua manifestação resulta em dano à qualidade ambiental.

3.3 FASE III: APLICAÇÃO DO MÉTODO

Após a metodologia estar estruturada, afim de ilustrar a aplicação do método e efetivamente avaliar a sustentabilidade ambiental da produção de ITR a terceira fase da pesquisa roteiriza a aplicação do método ao contexto LABFABITR (E6). Os dados do fluxo produtivo dos ITR foram obtidos no projeto executivo do LABFABITR. Como produto desta etapa obteve-se versão preliminar do diagnóstico ambiental da produção nacional de ITR.

3.4 FASE IV: AVALIAÇÃO DA ABORDAGEM METODOLÓGICA

A quarta fase dessa pesquisa concentra-se em avaliar a abordagem metodológica para avaliação ambiental do processo produtivo proposto e delineado pelas fases anteriores. Para tal, optou-se pela metodologia grupo focado, ou grupo de foco (E7). Grupos focados são utilizados em conjunto com outras ferramentas como uma pesquisa preliminar, para preparar questões de pesquisa de um projeto maior, ou como método de pesquisa para esclarecer os resultados de outros dados. Os grupos focados são compostos de 3 a 12 participantes. A discussão é guiada e facilitada por um moderador, que segue uma estrutura pré-definida para que a discussão permaneça focada. Os grupos focados são mais flexíveis que aplicações individuais de instrumentos de coleta de dados, e geram benefícios devido à interação entre os participantes (KONTIO et al., 2004; OLIVEIRA; FREITAS, 1997). A escolha do método tem como propósito validar o modelo quanto às considerações no processo produtivo de ITR. Para atingir tal objetivo, o método foi dividido em duas frentes de pesquisa: (i) Grupo gestor da equipe LABFABITR; e (ii) Entrevista com pesquisadores e ITR no Brasil.

Os especialistas selecionados foram pesquisadores, integrantes do laboratório *Magnetic Materials Group* (MAGMA), onde ocorrem pesquisas em conjunto a Indústria Global de Terras-Raras e Novas Aplicações (REGINA, na sigla em inglês) e do Instituto Nacional de Processamento e Aplicações de Ímãs de Terras Raras para Indústria de Alta Tecnologia (INCT). O projeto REGINA é composto por 17 instituições brasileiras e alemãs. O laboratório desenvolve pesquisas no processo de ITR de diferentes rotas produtivas, base para o *scale up* para a produção nacional em escala industrial dos ITR no Brasil. A equipe de pesquisa é formada por três professores, um pós doutorando, três mestrandos e quatro estagiários que atuam em pesquisas de processo e pesquisadores atuantes na implementação de aspectos de gestão da planta fabril.

A consulta aos pesquisadores ocorreu em paralelo à seleção dos indicadores e estruturação da proposta metodológica, levantando fatores importantes a serem considerados. A versão preliminar do diagnóstico é então apresentada aos especialistas dos ITR juntamente com gestores do LABFABITR, com foco em validar o processo produtivo do ITR, identificar pontos representativos do processo que resultaram em possíveis ajustes da metodologia proposta para avaliar a sustentabilidade ambiental do LABFABITR. A avaliação da sustentabilidade é realizada tanto em relação a descrição do processo inventariado como em relação aos indicadores selecionados, ou seja, se avaliam adequadamente essa produção. Após os ajustes evidenciados se obteve a versão consolidada do método (E8).

3.5 FASE V: CENÁRIOS

Para auxiliar nas estratégias quanto às melhorias ambientais, um cenário hipotético foi proposto (E9), frente às metas globais para a sustentabilidade corporativa sobre a ótica ambiental. Os critérios para configurar este cenário foram estabelecidos respeitando as limitações tecnológicas identificadas em entrevista com pesquisadores de ITR e na literatura. Dessa forma, ao avaliar o processo produtivo LABFABITR, análises puderam ser feitas comparando o resultado obtido com o resultado do cenário ideal (E10).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados do trabalho, iniciando pelos resultados quanto ao levantamento dos indicadores. Na sequência, a proposta metodológica é estruturada, tendo como ponto de partida inicial o estabelecimento da relação entre os indicadores e o processo. Estabelecidas as relações e os critérios para o tratamento dos dados, então, o método é aplicado ao processo do LABFABITR. Foram considerados os dados do projeto executivo, proporcionando a obtenção da versão preliminar do diagnóstico ambiental do LABFAITR, bem como a roteirização da aplicação do método e interpretação dos resultados. A versão preliminar do diagnóstico é então apresentada aos pesquisadores de ITR, permitindo a obtenção da versão consolidada do método lapidado, conforme as recomendações obtidas. O capítulo é finalizado com o comparativo de cenários que subsidiou as discussões quanto ao diagnóstico e apresenta um direcionamento frente a estratégias e metas ambientais.

4.1 CONJUNTO DE INDICADORES

A partir da análise e estudo das diretrizes do GRI, foi possível identificar os indicadores que são abordados e os critérios para a seleção. Os indicadores reportados nos relatórios, com uma frequência superior a 40%, estão apresentados no Quadro 5, sendo o indicador referente a resíduos e o indicador retirada de água os mais relatados pelo setor, ambos com 21 relatos. Na sequência, aparece o indicador de consumo de energia como o terceiro mais relatado. A análise de frequência dos indicadores reportados em relatórios de sustentabilidade, de um determinado setor, pode representar uma tendência entre essas empresas em abordar os indicadores que correspondem a informações fáceis de relatar ou obrigatórias em outros tipos de relatório (HAHN; KÜHNEN, 2013).

Quadro 5- Indicadores mais frequentes em RS do setor metalúrgico.

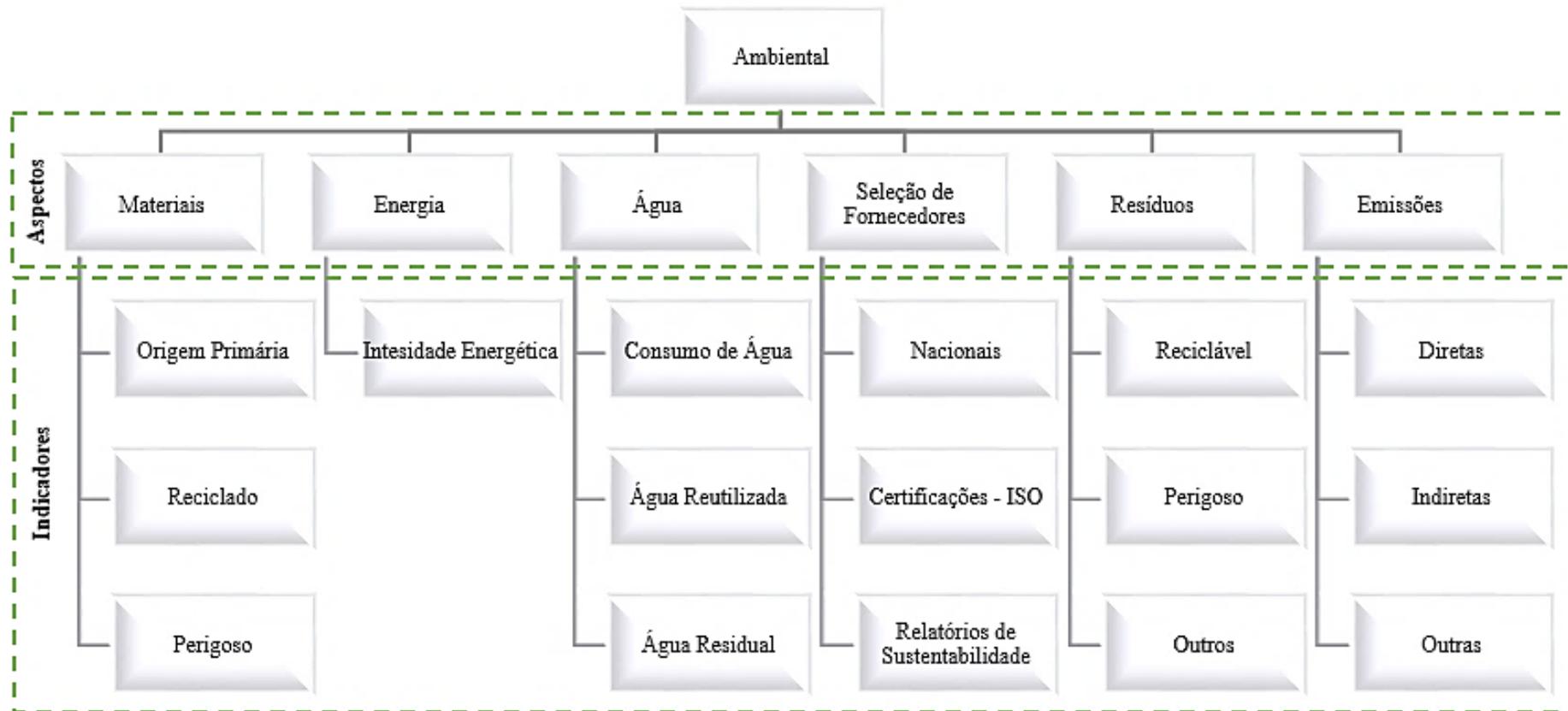
Indicador (Ambiental)		Total
EN1	Materiais usados, discriminados por peso ou volume	13
EN2	Percentual de materiais usados provenientes de reciclagem	14
EN3	Consumo de energia dentro da organização	19
EN5	Intensidade energética	13
EN6	Redução do consumo de energia	13
EN8	Total de retirada de água por fonte	21
EN15	Emissões diretas de gases de efeito estufa (GEE)	18
EN16	Emissões indiretas de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da aquisição de energia	11
EN18	Intensidade de emissões de gases de efeito estufa (GEE)	12
EN19	Redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE)	10
EN21	Emissões de NOx,SOx e outras emissões atmosféricas significativas	10
EN23	Peso total de resíduos, discriminado por tipo e método de disposição	21
EN29	Valor monetário de multas significativas e número total de sanções não monetárias aplicadas em decorrência da não conformidade com leis e regulamentos ambientais	9
EN31	Total de investimentos e gastos com proteção ambiental, discriminado por tipo	11

Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

Para adequar os resultados à produção de ITR-BR, garantindo a representatividade quanto aos impactos das atividades, também foram consideradas na seleção de indicadores as orientações setoriais GRI, a qual destaca que a materialidade é definida principalmente pelo grau de risco dos produtos e processos envolvidos. Ainda para alinhar os indicadores as metas da produção brasileira de ITR em julho de 2018, ocorreu uma reunião com os especialistas participantes do MAGMA, e gestores do LABFABITR. Foram identificadas as principais estratégias comerciais vinculadas à produção mais sustentável de ITR. Esta discussão foi baseada, principalmente, em possíveis acordos internacionais com países que exigem certificações e/ou selos ambientais dos fornecedores de sua cadeia de suprimentos, sendo este o grande diferencial do ITR produzido no Brasil.

Na reunião, também foram apresentadas pesquisas sobre novas rotas produtivas de ITR. Após compiladas as informações, é apresentada a proposta inicial, observada na Figura 10, do conjunto de indicadores para avaliação ambiental do processo produtivo do LABFABITR, composta inicialmente por seis aspectos subdivididos em 14 indicadores.

Figura 10 – Indicadores ambientais selecionados dos seis aspectos ambientais selecionados na pré-proposta.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

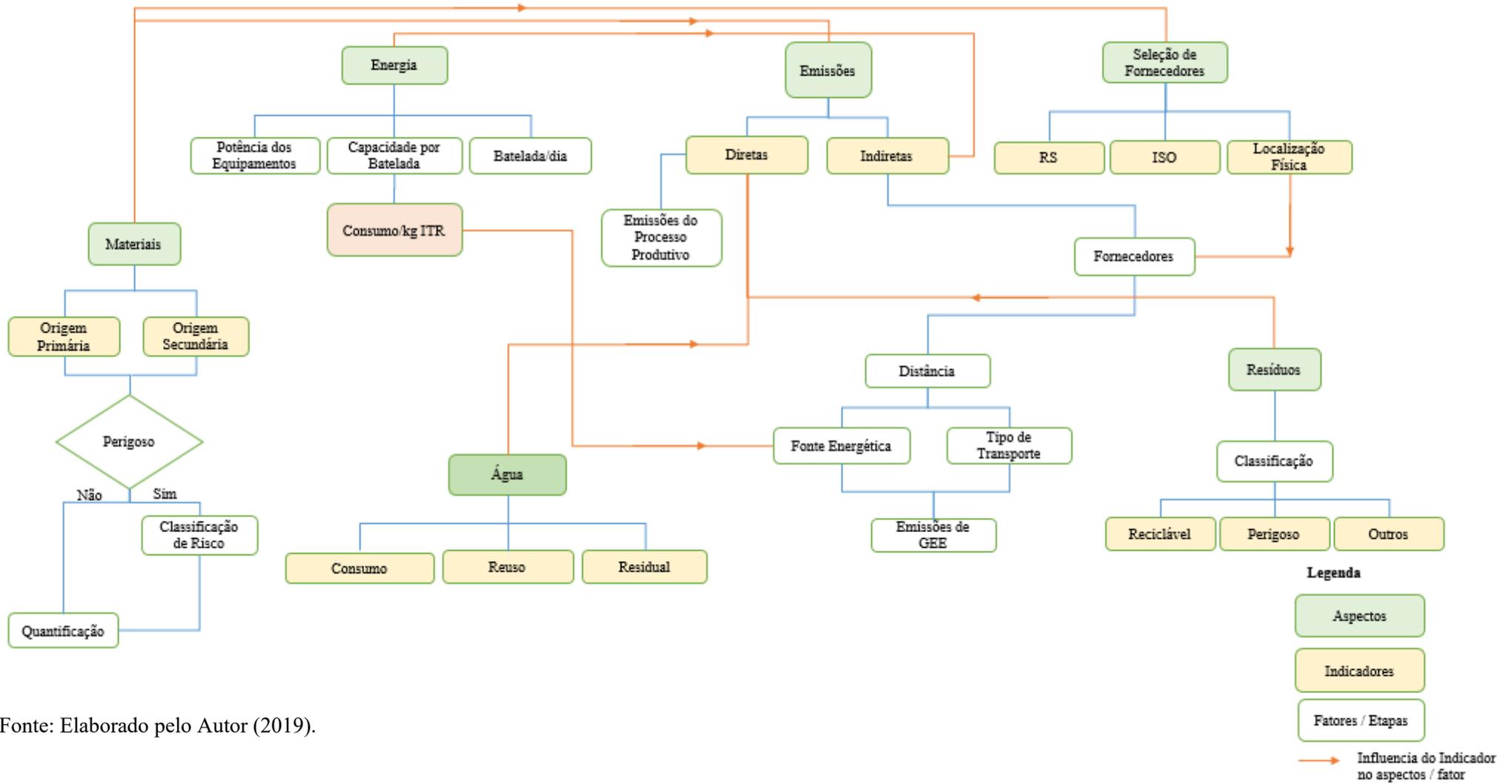
4.2 PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DO FLUXO PRODUTIVO DE ITR

Esta fase da pesquisa teve por objetivo estruturar o método e definir os critérios para o tratamento e interpretação dos resultados. O método foi construído em três etapas principais: (i) Relação entre indicadores e fluxo produtivo (matriz de relação); (ii) Normalização dos indicadores; e (iii) Escala de desempenho ambiental.

4.2.1 Matriz de Relação

Para auxiliar na coleta de dados e elucidar a relação dos indicadores com etapas do processo, a Figura 11 apresenta a estrutura analítica dos procedimentos e escopo de cada indicador, bem como suas relações. A estrutura foi construída com base nas diretrizes GRI. Em outras palavras a referida figura ilustra o que exatamente medir em cada etapa do processo e a influência do que foi medido sobre cada indicador.

Figura 11 – Fatores e etapas consideradas nos distintos indicadores e suas relações.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Para a classificação dos elementos de entrada identificados na caracterização do processo, como perigosos ou não, adotou-se a lista de produtos perigosos da Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT) da Resolução 5.232 de 14 de dezembro de 2016 (ANTT, 2016), listagem de produtos perigosos ONU e Ficha de Informações de Segurança para Produtos Químicos (FISPQ).

Os resíduos também foram classificados quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Essa classificação, por sua vez, foi caracterizada de acordo com a NBR 10.004:2004, e a FISPQ do respectivo elemento químico quanto sua disposição final.

O indicador proposto de intensidade energética se difere das orientações GRI, que relaciona a receita da empresa ao consumo energético. Esta pesquisa avalia a intensidade de energia utilizada por kg produzido, visto que a avaliação é na fase de projeto e alguns fatores estratégicos, como a geometria dos ITR, se encontram em desenvolvimento. A variabilidade na geometria dos ITR condiciona seu uso e valor, desse modo, para uma projeção adequada do faturamento da empresa, seria necessária uma pesquisa de mercado mais aprofundada.

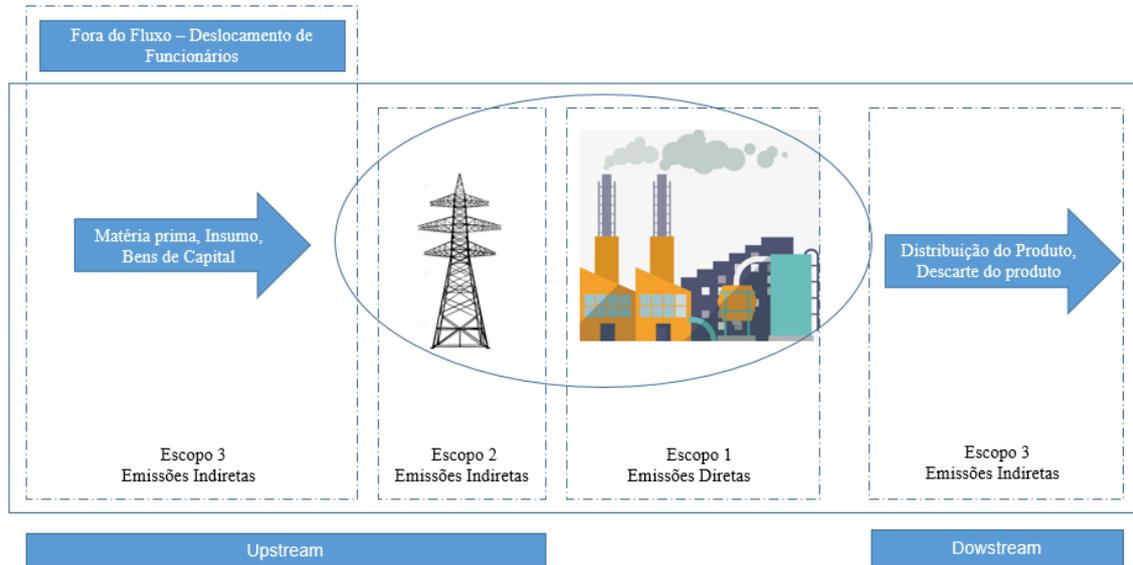
O consumo de energia tem impacto direto nas emissões, e as emissões compõem um forte indicador quanto à avaliação de desempenho ambiental. As orientações do GRI frente a quantificação das emissões são pautadas na *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)*, a qual é compatível com a ISO 14.064. O *GHG Protocol* foi adaptado para o contexto nacional, dando origem ao Programa Brasileiro *GHG Protocol (PBGHGP)*.

O inventário de emissões, segundo o programa brasileiro, é de caráter voluntário e divide em três escopos. O Escopo 1 envolve as emissões de GEE oriundas de fontes pertencentes a empresa, sendo a quantificação desta considerada obrigatória pelo *GHG Protocol*. O Escopo 2 abrange as emissões de GEE oriundas da compra de energia elétrica da rede ou vapor. Como a empresa inventariada não detém controle operacional sobre a geração dessa energia, tais emissões, alocadas sob o Escopo 2, são consideradas indiretas e sua quantificação é considerada obrigatória.

As emissões de Escopo 3 são geralmente classificadas como *upstream* ou *downstream* (ABNT 14064, 2015), e são outras emissões indiretas que ocorrem ao longo da cadeia de valor. Mais especificamente, são as emissões proveniente da extração e produção de matérias-primas, transporte de matérias primas e insumos adquiridos, transporte de funcionários, emissões relativas ao uso final dos produtos, viagens de funcionários, transporte

de combustíveis adquiridos, entre outros (WRI, 2011; ABNT 14.064, 2015). A composição dos distintos escopos é ilustrada na Figura 12.

Figura 12 – Tipos de emissões e composição dos escopos.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019), adaptado de ISO 14.064 (2015) e ISO 14.069 (2015).

Apesar do Escopo 3 não ser obrigatório, este é considerado o de emissões mais significativas, sendo a seleção de fornecedores com base em critérios ambientais, um importante instrumento na redução de GEE na cadeia de valor (PBGHGP, 2018). A delimitação adotada neste trabalho, frente à quantificação das emissões, é da planta fabril limitado ao processo, não considerando o CO₂ incorporado do processo de extração de matérias primas. No entanto, para que a pesquisa permita apontar um direcionamento na construção de uma cadeia produtiva sustentável, os fornecedores são avaliados nas Emissões Indiretas, do transporte dos *inputs* através de uma estimativa de emissões pelo tipo de transporte e distância.

Os fornecedores também foram avaliados quanto à disposição de certificação ISO 14.000 de Gestão Ambiental e/ou relatórios de sustentabilidade, sendo esta uma análise indireta da implementação de práticas mais sustentáveis. A caracterização dos fornecedores ocorre em paralelo ao preenchimento da matriz, uma vez que é um ponto essencial na estimativa de distâncias. Os dados frente à caracterização são organizados em um banco de dados.

Para os elementos de entrada que dispunham de mais de um fornecedor, é proposta uma terceira planilha para a seleção dos mesmos. A planilha é vinculada à matriz de relação e ao banco de dados dos fornecedores, e retoma os processos listados e seus respectivos elementos classificados como de entrada. A coluna Fornecedor permite a seleção dos possíveis fornecedores do respectivo elemento, além das informações de certificação e distâncias, auxiliando na seleção dos fornecedores sobre a ótica de critérios ambientais.

4.2.2 Normalização – Fatores de Emissões

Para facilitar a interpretação, foi proposta a normalização dos indicadores em CO₂ equivalente das fontes diretas e as indiretas. Com o auxílio da ferramenta *ECO Audit*® foram determinados os fatores de emissões, ao contexto dos ITR. Estes fatores foram validados para a produção brasileira, por meio do levantamento de fatores de emissões sugerido pelo IPCC e PBGHGP, além da consulta a inventários de CO₂ e RS de empresas de mineração e metalurgia, como por exemplo, as emissões relatadas pela CBMM. Deste modo os valores estimados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Fatores de Emissões

Aspecto	Medida	CO₂equivalente Kg
Água	Kg	0,01260
Resíduos Sólidos e Efluentes Líquidos	Kg	0,00533
Energia	MJ	0,02100
Transporte de Navio	Km	0,00001
Transporte de Trem	Km	0,00002
Transporte de Caminhão	Km	0,00006

Fonte: Elaborado pelo Autor, adaptado de IPCC (2006), PBGHGP (2018), *Eco Audit*®, (2019), CBMM (2018); e SANEPAR, (2018).

Determinados os fatores de conversão, as emissões foram então estimadas por meio da multiplicação do indicador com o fator de emissão correspondente. Para as emissões indiretas dos fornecedores, a conversão assume, para os fornecedores internacionais, a combinação entre o transporte hidroviário e o transporte rodoviário (relativo à distância entre

o porto a planta fabril). Para os fornecedores nacionais, foi adotado o transporte rodoviário, visto que este é o mais representativo no contexto nacional (CNT, 2019).

O método foi estruturado de modo que a normalização ocorra de forma automática em dois momentos distintos. Quanto às emissões indiretas dos fornecedores, a normalização ocorre no banco de dados, onde a caracterização dos fornecedores, realizada na etapa anterior, é complementada com uma coluna de emissões, para auxiliar na seleção dos fornecedores além das informações de certificação e distâncias.

Para os demais indicadores a normalização ocorre na planilha denominada Diagnóstico Ambiental, cuja estrutura é discutida no item 4.2.3 deste trabalho. Os valores de emissão de transporte que integram o banco de dados do fornecedor são referentes ao transporte de 1kg/km, de modo que para as estimativas de emissões indiretas, os valores foram multiplicados pela quantidade em kg dos respectivos elementos de entrada (estes, em termos de produção para 1kg/ITR, também na referida planilha).

Apesar da ferramenta *Eco Audit*® dispor de dados das cinco fases do ciclo de vida dos produtos (materiais, manufatura, transporte, uso e disposição), neste trabalho as emissões *upstream* frente aos materiais, foi limitada ao transporte. A delimitação adotada foi definida para que o método proposto permita a identificação dos pontos que mais impactam no desempenho ambiental da produção dos ITR, nas diferentes etapas do processo. As emissões incorporadas são cumulativas, logo, o maior valor de CO₂ seria nas últimas etapas. Apesar da ferramenta *ECO Audit*® dispor de valores para as cinco fases do produto, ela não permite identificar qual fator ou aspecto é mais impactante nas distintas fases do processo, fato que se difere da proposta desta pesquisa, cujo intuito é identificar qual etapa do processo, mais impacta no desempenho ambiental da produção brasileira.

Outro critério determinante na delimitação é que como destacado ao longo do trabalho há poucas considerações frente aos aspectos ambientais sobre a produção de ETR, desde modo a produção sofre limitações quanto aos impactos dos elementos envolvidos no processo, principalmente da produção nacional. As emissões e ou energia incorporadas, para cada material, sofrem influência direta da posição geográfica na qual é produzida, visto que o cálculo dos fatores de emissão considera variáveis, como por exemplo, a composição da matriz energética, eficiência energética, processos envolvidos, entre outros (IPCC, 2006; CES *Selector*, MARX et al., 2018). Deste modo, é necessário um estudo mais detalhado da produção nacional das matérias primas, como por exemplo, o Óxido de Didímio, hoje produzido pela CBMM em baixa escala. Segundo a ferramenta *Eco Audit*®, as emissões de

CO₂ incorporados aos materiais representam 83,5% das emissões totais de ITR NdFeB, considerando dados referentes a produção internacional.

4.2.3 Desempenho ambiental

Após a seleção dos fornecedores, os resultados foram organizados em uma quarta planilha automaticamente, a qual associa a caracterização do fluxo produtivo e seleção dos fornecedores aos fatores de emissões. A planilha denominada Diagnóstico Ambiental, sintetiza o desempenho, até então discretizados por elementos, em etapas do processo. A estrutura proposta compila os impactos, através do somatório de um determinado indicador frente a determinada fase do processo, relativos à produção de 1 kg de ITR.

Quanto às etapas prioritárias de ações, essas podem ser interpretadas pela coluna desempenho, a qual combina todos os aspectos avaliados. Para facilitar a interpretação foi atribuída uma escala de cores gradativa, iniciando com a cor azul para o melhor desempenho e vermelha escura para o pior. Deste modo, a cor vermelha indica ações prioritárias. É importante ressaltar que a classificação de desempenho se relaciona com as demais etapas do processo. Ou seja, o desempenho sinaliza qual etapa do processo tem maior impacto ambiental dentre as quais integram a produção de ITR.

Como etapa para a determinação do desempenho e as emissões totais, os indicadores foram categorizados quanto seu potencial impacto positivo ou negativo, por meio de uma análise qualitativa dos indicadores, observados no Quadro 6. Os impactos potenciais foram levantados com base no setor de mineração, energia, transporte e disposição de resíduos. Também foram consultados os impactos da retirada de água e emissões. Para os indicadores categorizados como positivo a coluna assumi o valor correspondente, como redução de emissões.

Quadro 6- Categorização dos indicadores quanto a natureza do impacto.

Aspecto	Indicador	Impactos Potenciais												
		Poluição Solo	Poluição Água	Poluição Atmosférica	Risco Humano	Degradação do Ambiente Sonoro	Poluição Visual	Redução do Estoque de Recursos	Potencial de Impacto ao Meio Biótico	Geração de Resíduos	Proteção dos Recursos Naturais	Redução de Resíduos	Redução de água residuais	Redução de Emissões Atmosféricas
Material	Perigosos													
	Primários													
	Secundários													
Energia	Intensidade energética													
Água	Consumo													
	Reuso													
	Residual													
Seleção de Fornecedores	RS													
	ISO													
	Origem													
Resíduos	Perigoso													
	Reciclável													
	Outros													
Emissões	Direta													
	Indireta													
Legenda:	Positivos													
	Negativo													

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de MONTALVÁN et al (2018), IBAMA (2016) e SANCHEZ (2002).

4.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO AO LABFABITR

Com o propósito de ilustrar a aplicação do método e avaliar a sustentabilidade ambiental para produção de ITR, este subcapítulo apresenta a roteirização da aplicação do método ao contexto LABFABITR. O método proposto foi estruturado, na fase anterior, em quatro planilhas do *Microsoft Excel*® vinculadas entre si: (i) Matriz de relação; (ii)

Caracterização dos fornecedores; (iii) Seleção dos fornecedores; e (iv) Diagnóstico ambiental. As três primeiras planilhas correspondem às etapas de coleta de dados, enquanto a quarta planilha sintetiza os resultados obtidos.

A aplicação do método inicia-se com a caracterização do fluxo produtivo por meio da matriz de relação entre indicadores e processo. Os dados referentes ao fluxo produtivo foram obtidos no projeto executivo do LABFABITR e documentos complementares, disponibilizados pela equipe de pesquisadores do laboratório MAGMA. Foram identificadas 10 etapas e 40 elementos distintos. Destes, 23 elementos são de entrada e 17 elementos são de saída, entre resíduos sólidos, poluentes atmosféricos e efluentes. Suas respectivas quantidades foram alocadas na coluna do indicador correspondente. A matriz em forma de quadro pode ser consultada no Apêndice A.

Para o aspecto material, o indicador Materiais Perigosos, nesta etapa da pesquisa, é tratado como uma subcategoria, visto que para o processo específico de ITR, produtos perigosos como Óxido de Didímio, que possui piroforicidade, pode ter origem secundária através da reciclagem de ITR e ou do rejeito do Nb, como já discutido no item 2.4 deste trabalho. Deste modo, para simplificação do preenchimento da matriz, o mesmo foi utilizado como subcategoria.

Dos elementos de entrada envolvidos no processo, 19 deles (ou 82%) são classificados como perigosos (Tabela 2). Para o produto final do processo, ITR magnetizados, não foi identificada legislação específica para o transporte terrestre, no entanto este material é classificado como transporte perigoso segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e a *International Air Transport Association* (IATA), sendo necessário caixas de blindagem magnética, devido ao potencial de interferência nos controles das aeronaves.

Tabela 2 – Classificação de produtos perigosos do processo produtivo ITR Brasil.

Substância	Classificação	
Óxido De Didímio	Sólidos Inflamáveis	4.1
Fluoreto de didímio (PrNdF3)	Substâncias Tóxicas ou Infectantes	6.1
Fluoreto de lítio (LiF)	Substâncias Tóxicas ou Infectantes	6.1
Gás Carbônico	Gases	2.2
Ácido Fluorídrico (Hf)	Substâncias Tóxicas ou Infectantes	6.1
Óxido de Didímio (Particulado Fino)	Sólidos Inflamáveis	4.1
Ferro (Fe)	Sólidos Inflamáveis	4.2
Nd,Pr Particulado Fino	Sólidos Inflamáveis	4.1
Gás nitrogênio	Gases	2.2
Gás Hidrogênio	Gases	2.1
Gás Argônio	Gases	2.2
Nd,Pr metálico (particulado fino)	Sólidos Inflamáveis	4.1
Gás Argônio	Gases	2.2
Fluído de Corte	Líquidos Inflamáveis	3.0
Hidróxido de Sódio	Substâncias Corrosivas	8.0
Sulfato de Níquel	Substâncias e Artigos Perigosos Diversos	9.0
Cloreto de Níquel	Substâncias Corrosivas	8.0
Sulfato de Cobre	Substâncias e Artigos Perigosos Diversos	9.0

Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

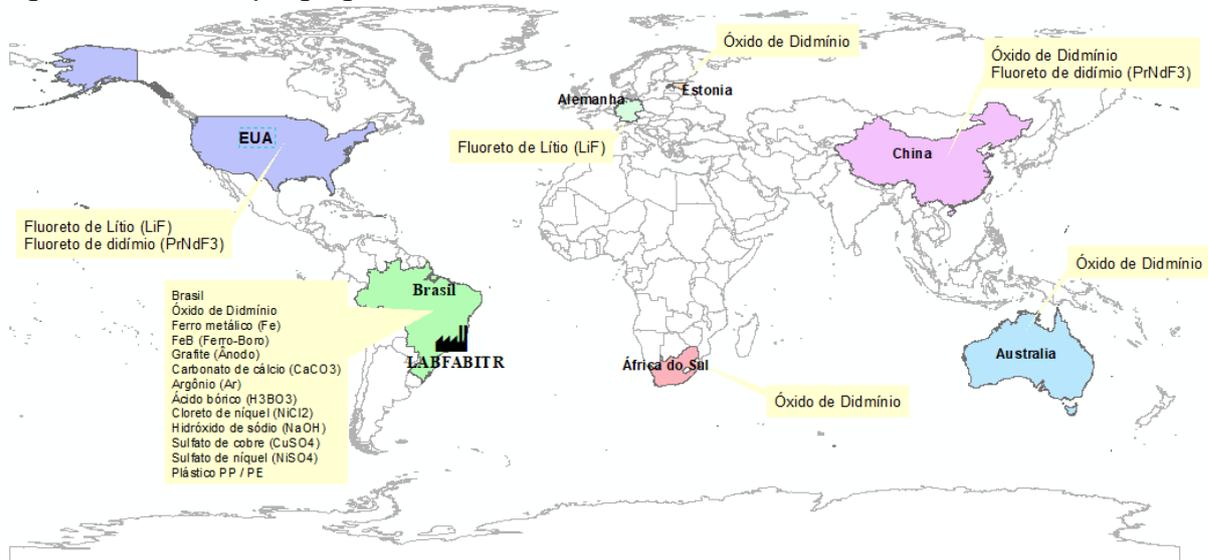
Os resíduos classificados como perigosos foram identificados em três das dez etapas que compõem a produção do ITR, sendo estes os processos de redução, acabamento e revestimento.

A energia consumida nas dependências da fábrica, no estudo, é delimitada ao processo produtivo. Assim foram levantados os dados de potência dos equipamentos, capacidade de produção e tempo do ciclo, estes validados com a estimativa de consumo de energia disponibilizado pelo laboratório MAGMA e projeto do LABFABITR.

Para obter as distâncias entre os fornecedores e o LABFABITR foram listados os fornecedores dos elementos de entrada, identificados na etapa anterior. Assim, se deu uma busca de suas localizações geográficas no *Google Earth* e estas foram posteriormente espacializadas e tratadas no *ArcGis®*. Alguns elementos essenciais na fabricação do ITR, como Fluoreto de Didímio e de Lítio, não possuem fornecedores nacionais. Quanto ao Óxido de Didímio, o fornecimento nacional se limita a CBMM, que atualmente tem a produção em baixa escala, o que pode evidenciar incertezas no fornecimento, nos atuais moldes de

produção. A Figura 13 apresenta a distribuição geográfica de fornecimento dos principais elementos de entrada que compõem o processo.

Figura 13 – Distribuição geográfica dos fornecedores LABFABITR.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

Para a coleta de dados sobre a disposição de relatórios de sustentabilidade foi realizada a busca por relatório de sustentabilidade na base GRI ou em *websites* da própria empresa. O mesmo ocorreu para a existência de certificação ISO 14.000 de Gestão Ambiental, onde buscou-se nos relatórios e nos sites das empresas o relato da certificação.

Os indicadores, referente ao aspecto de seleção de fornecedores, foram organizados então na planilha denominada banco de dados. Dos 66 potenciais fornecedores identificados no projeto executivo, 52 são nacionais. Quanto às certificações, apenas 4 foram identificados possuindo relatórios de sustentabilidade e 6 com certificação da ISO 14001. A caracterização completa encontra-se no Apêndice B, já com suas respectivas estimativas de emissões frente ao transporte em termos de CO₂/km.

Os elementos de entrada que dispunham de mais de um fornecedor foram priorizados segundo dois critérios: (i) menor distância e (ii) com certificação ISO 14.000 ou RS. Para os fornecedores nacionais a adequação à ISO e/ou a adoção de RS foi considerado fator determinante, visto que as diferenças de distâncias são menos representativas, seguindo o entendimento que empresas que dispõem destes instrumentos de gestão tem uma maior

motivação à boas práticas ambientais, visto que os RS e as certificações Isso 14.000 estão entre as ferramentas mais utilizadas na avaliação de desempenho da sustentabilidade na indústria (BÜYÜKÖZKAN; KARABULUT, 2018). A seleção dos fornecedores é ilustrada na Figura 14.

Figura 14 – Seleção dos fornecedores.

Processo	Elementos	Fornecedor	Estado	País	RS	ISO	Distância (Km)	CO2/km
Redução Elétrica	Óxido De Didímio	CBMM	MG	Brasil	Sim	Sim	406	0,025
	Fluoreto de didímio (PrNdF3)	CBMM	0	EUA	Não	Não	7312	4,048
	Fluoreto de Lítio (LiF)	Steenkampskraal Lynas Corporation Limited	0	EUA	Não	Não	7312	4,048
	Grafite (Ânodo)	Baotou Xinyuan Molycorp Silmet	MG	Brasil	Não	Não	56	0,003
	Carbonato de cálcio (CaCO3)	Mineração Terra Nova	MG	Brasil	Não	Não	259	0,016
Fabricação da Liga	Ferro (Fe)	Vale	MG	Brasil	Sim	Não	145	0,009
	FeB (Ferro-Boro)	Giro Metais	SP	Brasil	Não	Não	566	0,034
	Gás Argônio	White Martins	MG	Brasil	Não	Sim	59	0,004
Fragmentação Grosseira	Gás Argônio	White Martins	MG	Brasil	Não	Sim	59	0,004
	Gás Nitrogênio	White Martins	MG	Brasil	Não	Sim	59	0,004
	Gás Hidrogênio	White Martins	MG	Brasil	Não	Sim	59	0,004
Moagem	Gás Argônio	White Martins	MG	Brasil	Não	Sim	59	0,004
Compactação	Gás Argônio	White Martins	MG	Brasil	Não	Sim	59	0,004
	Gás Argônio	White Martins	MG	Brasil	Não	Sim	59	0,004
Sinterização e Trat. Térmico	Gás Argônio	White Martins	MG	Brasil	Não	Sim	59	0,004
	Gás Argônio	White Martins	MG	Brasil	Não	Sim	59	0,004
Lubrificantes (Jatagem)	Óleo Solúvel	Almon	RJ	Brasil	Não	Não	479	0,029
	Fluído de Corte	Kation Raiden	SP	Brasil	Não	Não	638	0,039

Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

Após a seleção dos fornecedores os dados foram organizados de forma automática. Com base no método foi possível observar o pior desempenho no processo de redução, sendo este, responsável por 37 % das emissões totais na produção de ITR. Em segundo lugar está o processo de revestimento, com 26%, seguido da fragmentação grosseira, com 10% na composição total das emissões. Os resultados apresentados na Figura 15 são resultados preliminares, de modo que, após a validação da abordagem proposta, os resultados são rerepresentados e suas discussões aprofundadas.

Figura 15 – Avaliação ambiental preliminar do LABFABITR.

Processo	Matéria prima	Insumo	Saída	Capacidade por ciclo (kg)	Tempo por ciclo (horas)	Entrada						Saída						Resultado							
						Produtos Perigosos Primários	Produtos Perigosos Secundários	Intensidade Energética	Nacionais	RS	ISO	Consumo	Reutilizada	Residual	Reciclável	Perigoso	Outros	Diretas Emissões Fugitivas	Diretas (GEE)	Indireta Fornecedores (CO2)	Indireta Energia (MJ)	CO2equivalente/kgITR	Σ Positivos	Desempenho	
Redução Eletrônica	1	4	6	20	4	5	2	0	20	3	1	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,09	0,01	0,0	1	0,45	71	3,04	4	
Fabricação da Liga	3	1	2	50	4	2	1	0	7	3	1	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0,04	24	0,54	4	
Fragmentação Grosseira	1	4	1	50	8	3	4	0	8	3	0	3	0,1	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0,05	29	0,66	3	
Moagem (Jet Mill)	1	0	2	50	1	1	0	0	1	1	0	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0,00	4	0,08	3	
Alinhamento / Compactação	1	1	1	35	1	1	1	0	2	1	0	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,3	0	0,00	6	0,44	3	
Sinterização e Trat. Térmico	1	1	1	360	20	1	0	0	3	1	0	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,1	0	0,00	9	0,25	3	
Acabamento (Usinagem)	1	5	5	17	1	0	1	0	7	3	0	0	0,0	0,0	0,1	0,00	0,08	0,01	0,1	0	0,18	24	0,75	2	
Revestimento Ni-Cu-Ni	1	7	3	45	22	4	1	0	2	6	0	1	0,1	0,0	0,2	0,00	0,65	0,00	0,0	0	0,25	8	0,44	3	
Magnetização	1	0	0	20	1	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0,00	0	0,00	1	
Embalagem	1	1	0	45	22	1	5	0	2	1	0	0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0,02	7	0,17	2	
LABFABITR	23	17				18	16	0	51	22	2	9	0	0	0	0	1	0	0	1	0,99	182	6,36	28	

Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

4.4 AVALIAÇÃO DA ABORDAGEM METODOLÓGICA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DE ITR BR

Para garantir que a proposta metodológica abordasse os aspectos relevantes a produção de ITR nacional, a versão preliminar do método e diagnóstico foram apresentados aos pesquisadores e gestores de ITR. Após as reuniões o modelo foi então lapidado e assim obteve-se a versão consolidada do método.

4.4.1 Entrevistas com pesquisadores e gestores de ITR

Foram realizadas duas reuniões estruturadas, com três pesquisadores de processos de produção de ITR do laboratório MAGMA e com um pesquisador integrante da equipe de implementação e gestão do LABFABITR. Os especialistas foram instruídos de modo a evidenciar novos elementos e fatores não considerados nas etapas na caracterização do processo e construção do modelo.

Um novo elemento no processo de acabamento e usinagem foi incluído, o Esterato de Zinco na proporção de 1%. Quanto aos aspectos gerenciais, segundo os pesquisadores, o resíduo de cavaco é a maior preocupação, devido as suas características pirofóricas e volume produzido. A reciclagem interna é uma meta do LABFABITR com pesquisas já em andamento frente a reciclagem e novos processos.

Quando questionados quanto a elementos substitutos, ou visando um cenário ideal sobre os aspectos ambientais, os pesquisadores responderam desconhecer de modo geral substitutos para os componentes listados. Os pesquisadores destacam que, considerando os riscos ambientais associados ao processo de revestimento, este necessita de licenças mais específicas. Deste modo, na fase inicial de implantação do LABFABITR, o processo de revestimento será realizado em uma empresa terceira, ou seja, fora dos limites do LABFABITR. Ainda sobre o processo de revestimento eles destacam que alguns fatores, como a temperatura e mecanismos de banho, podem aumentar consideravelmente as perdas e geração de resíduos estimados.

Outros processos em desenvolvimento foram citados pelos especialistas como a injeção e a manufatura aditivas, no entanto tais processos encontram-se em desenvolvimento, sendo necessário uma posterior avaliação. Foi destacado ainda, que a substituição de ETR

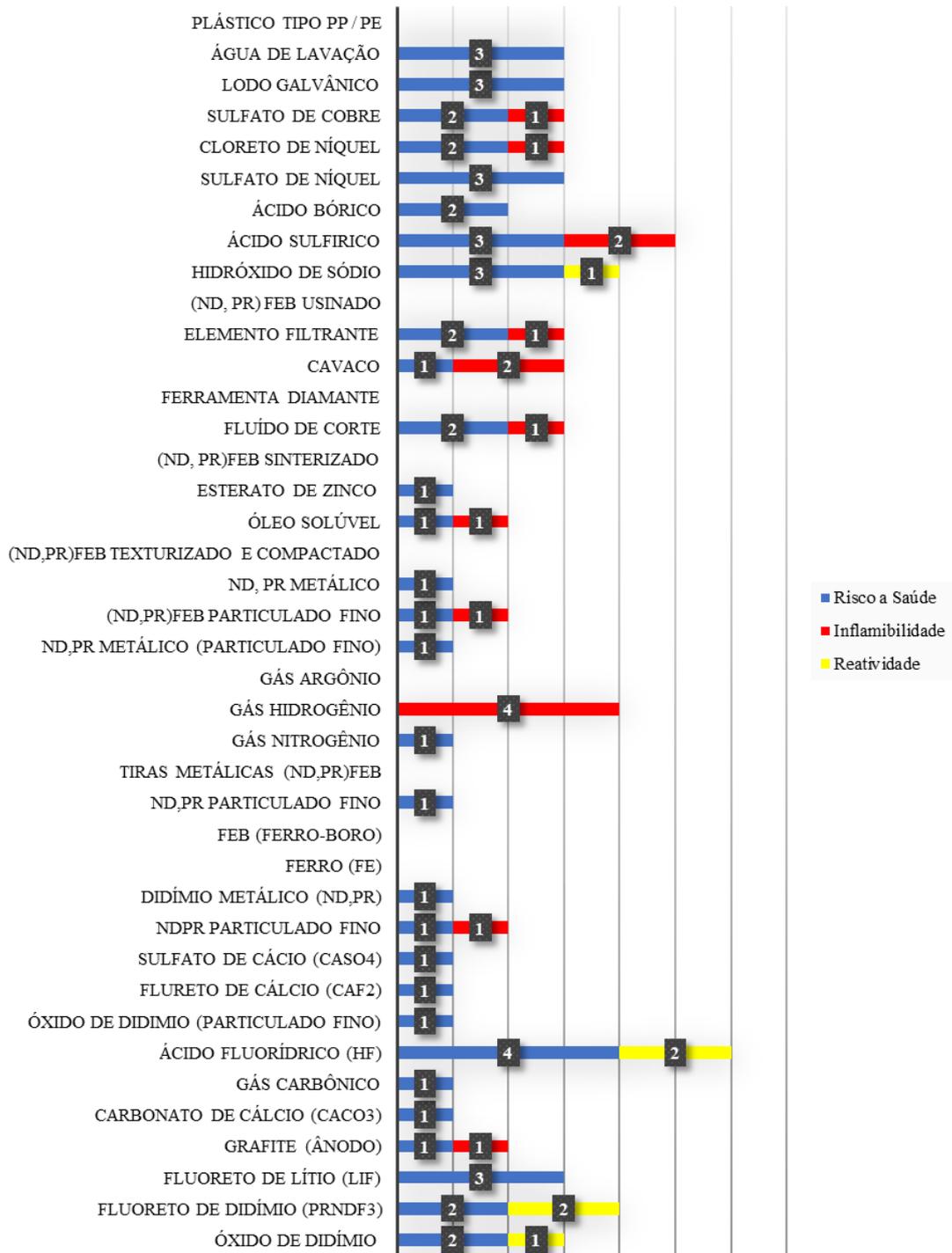
pesados, como o Disprósio, por ETR leves, como o Lantânio, o Cério, o Praseodímio e o Neodímio, resultam em aspectos ambientais positivos, principalmente pelo processo de mineração, cujos resíduos de ETR pesados incluem rejeitos radioativos. Deste modo, em termos de seleção de elementos, o atual processo pode ser considerado o ideal, dentro dos limites tecnológicos. Quanto a simulação do preenchimento do modelo, não houve considerações. No entanto houve a sugestão de evidenciar os riscos potenciais nas diferentes etapas do processo.

4.4.2 Ajustes no modelo

Com base nas considerações dos especialistas o método então foi lapidado, incluindo o novo elemento, Esterato de Zinco, no processo de acabamento e usinagem. Buscando atender à solicitação dos pesquisadores e alinhar o método com as diretrizes GRI, quanto à relação da relevância dos indicadores aos riscos envolvidos em determinada atividade e ou processo, houve a avaliação dos riscos associados aos elementos das distintas etapas do processo. O levantamento foi incorporado à avaliação de desempenho ambiental. A análise é limitada aos riscos das características químicas dos elementos.

Os riscos foram quantificados considerando o risco à saúde (humana e ambiental), inflamabilidade e reatividade, onde estes, por convenção, recebem atribuições de 0 a 4 (onde 0 equivale à baixo risco e 4 altamente arriscado). Os valores identificados para os distintos elementos nas respectivas classes são apresentados na Figura 16. A classificação foi baseada na FISPQ dos produtos e classificação de resíduos. Visto que 86% dos elementos são considerados perigosos, e 13 classificados com risco de médio a alto para a saúde, o levantamento dos riscos permite estratégias mais efetivas de planos de ação emergencial.

Figura 16 – Categoria de Riscos por elementos.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019).

Os valores atribuídos ao risco de determinado elemento, foram somados e multiplicado pela intensidade percentual do respectivo elemento na produção dos ITR (por meio da Equação 2), já que quanto maior o estoque de um produto considerado perigoso,

maior o risco, danos e dificuldade de contenção em casos de eventualidades. Os valores do potencial de risco das distintas fases do processo foram obtidos através do somatório dos riscos dos elementos.

$$PR = \sum(S + I + R) * ITP \quad \text{Equação} \\ (2)$$

Onde:

PR = Potencial de Risco

S = Grau de Risco Atribuído a Saúde

I = Grau de Risco Atribuído a Inflamabilidade

ITP = Intensidade do Elemento no Processo %

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de MONTALVÁN et al (2018), IBAMA (2016) e SANCHEZ (2002).

A coluna de desempenho foi então ajustada, onde foi incluso potencial de risco, resultando na Equação 3.

$$D = ((\sum IN - \sum IP) + PR) * \left(\frac{P}{100}\right) \quad \text{Equação} \\ (3)$$

Onde:

D = Desempenho

IN = Indicadores Negativos em kg

IP = Indicadores Positivos em kg

P = Número de Indicadores positivos na determinada etapa

PR = Potencial de Risco

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de MONTALVÁN et al (2018), IBAMA (2016) e SANCHEZ (2002).

Para o processo de revestimento, apesar de que, segundo os especialistas, em um primeiro momento este ocorrerá fora da planta fabril, por meio de uma empresa parceira, este foi mantido na avaliação de desempenho. Essa ação foi tomada considerando o interesse por parte da equipe gestora, evidenciado na pesquisa, em incluir o processo nas atividades do LABFABRITR, considerando as questões ambientais do processo. Assim, após os ajustes mencionados, o diagnóstico de desempenho nos atuais moldes de produção é apresentado na Figura 17.

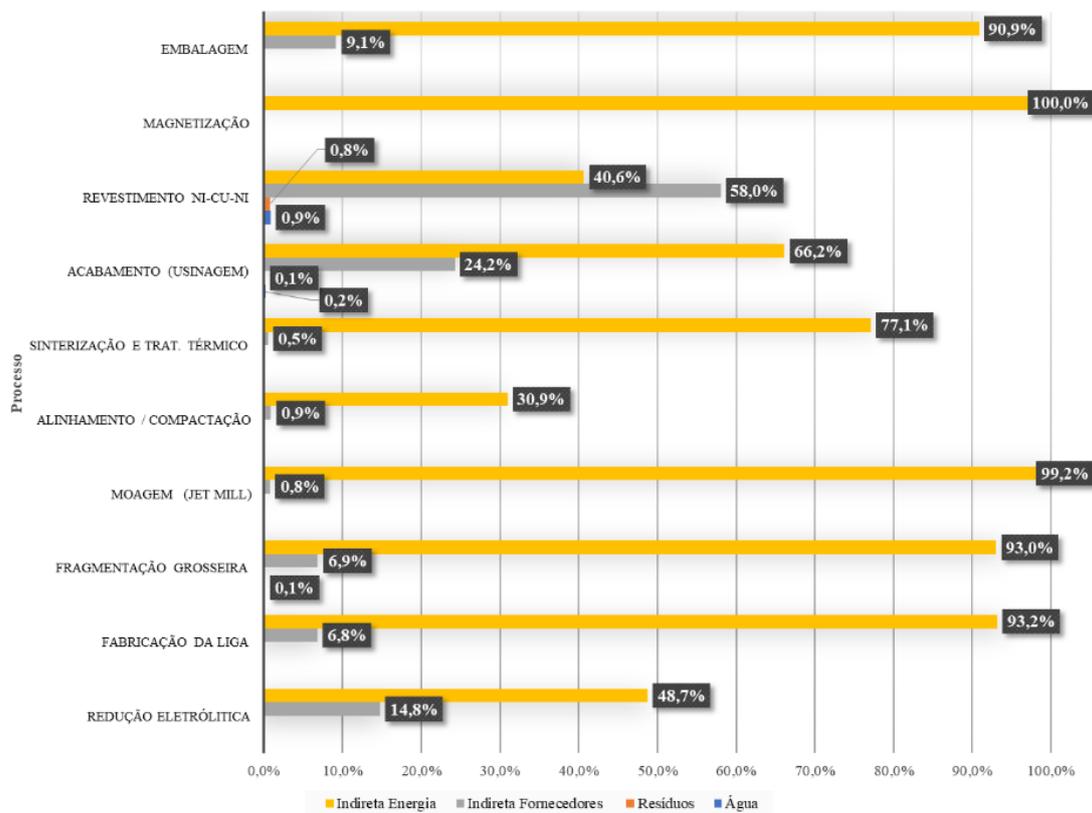
Figura 17 – Diagnostico ambiental do LABFAITR, modelo consolidado.

Processo	Matéria prima	Insumo	Saída	Capacidade por ciclo (kg)	Tempo por ciclo (horas)	Entrada						Saída						Resultado								
						Produto Perigoso	Primários	Secundário	Intensidade Energética	Nacionais	RS	ISO	Consumo	Reutilizada	Residual	Reciclável	Perigoso	Outros	Diretas Emissões Fugitivas	Diretas (GEE)	Indireta Fornecedores (CO2)	Indireta Energia (MJ)	COzequivalente/kgITR	Σ Positivos	Potencial de Risco	Desempenho
Redução Eletrônica	1	4	6	20	4	5	2	0	20	3	1	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,09	0,01	0,0	1	0,45	71	3,04	4	●	●
Fabricação da Liga	3	1	2	50	4	2	1	0	7	3	1	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0,04	24	0,54	4	●	●
Fragmentação Grosseira	1	4	1	50	8	3	4	0	8	3	0	3	0,1	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0,05	29	0,66	3	●	●
Moagem (Jet Mill)	1	0	2	50	1	1	0	0	1	1	0	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0,00	4	0,08	3	●	●
Alinhamento / Compactação	1	1	1	35	1	1	1	0	2	1	0	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,3	0	0,00	6	0,44	3	●	●
Sinterização e Trat. Térmico	1	1	1	360	20	1	0	0	3	1	0	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,1	0	0,00	9	0,25	3	●	●
Acabamento (Usinagem)	1	5	5	17	1	0	1	0	7	3	0	0	0,0	0,0	0,1	0,00	0,08	0,01	0,1	0	0,18	24	0,75	2	●	●
Revestimento Ni-Cu-Ni	1	7	3	45	22	4	1	0	2	6	0	1	0,1	0,0	0,2	0,00	0,65	0,00	0,0	0	0,25	8	0,44	3	●	●
Magnetização	1	0	0	20	1	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0,00	0	0,00	1	●	●
Embalagem	1	1	0	45	22	1	5	0	2	1	0	0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,0	0	0,02	7	0,17	2	●	●
LABFABITR	24	17				18	16	0	51	22	2	9	0,2	0,0	0,3	0,0	0,8	0,0	0,4	1,5	0,99	182	6,36	28		

Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

Por meio do método foi possível observar o desempenho dos processos, sendo que o pior desempenho registrado foi na redução eletrolítica, responsável por 48 % das emissões totais na produção de ITR, onde 49% destas é referente à energia, como pode ser observado na Figura 18. A referida figura apresenta a representatividade percentual dos distintos aspectos do total de emissões gerada nas distintas etapas.

Figura 18 – Composição percentual das estimativas de emissões (CO₂/kgITR), para os diferentes aspectos por processo.



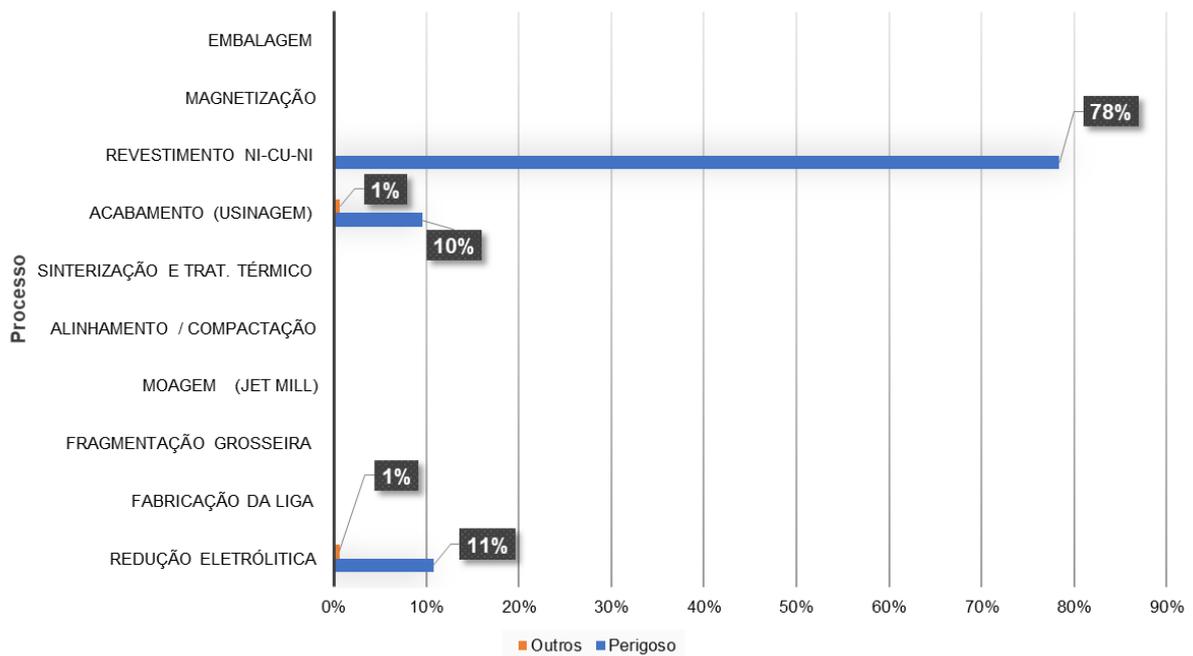
Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

O LABFABITR foi projetado inicialmente para produção de 4 toneladas/ano até chegar em 93 toneladas/ano. A meta a curto prazo é de 8 toneladas/ano, segundo os pesquisadores, sendo a quantidade referida utilizada como referência para as discussões das emissões anuais. No cenário atual, as emissões correspondem a 50,8 toneladas de CO₂/ano. As emissões de materiais particulado são estimadas em 3 toneladas/ano.

A projeção quanto a geração de resíduos é de 6,7 toneladas/ano, onde, destes, 6,5 toneladas/ano são classificados como perigosos, com destaque ao processo de revestimento, cuja geração estimada é 5,2 toneladas/ano de resíduos perigoso. O processo de redução

aparece na segunda posição quanto a geração de resíduos, com 0,8 toneladas/ano, destes, 0,36 toneladas de NdPr. No processo de usinagem e acabamento a geração é de 0,72 toneladas/ano, do quais 0,24 toneladas são de NdFeB. A composição quanto à geração de resíduos é apresentada na Figura 19, onde é apresentado o percentual de geração por processo e classificação, perigoso ou não.

Figura 19 – Estimativa de geração de resíduos por processo por kg de ITR.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

4.5 COMPARATIVO DE DESEMPENHO AMBIENTAL PARA DIFERENTES CENÁRIOS

No sentido de permitir conclusões quanto ao desempenho ambiental da produção nacional de ITR e auxiliar na tomada de decisão frente a estratégias para melhoria ambiental, são propostos cenários comparativos. Os cenários propostos consideraram o relato dos especialistas e estratégias globais relatadas em RS.

Além de auxiliar na formulação e direcionamento de estratégias esta fase da pesquisa visa estruturar a ferramenta para que posteriormente possa ser utilizada para comparar o desempenho ambiental de novas tecnologias de produção de ITR e ou aspectos do *design*.

4.5.1 Construção de cenários

Segundo Fuss et al. (2019) a prática recorrente em RS do setor de metalurgia e mineração está relacionada à meta de redução de emissões de CO₂, por meio de investimentos em energia de baixo carbono, transporte e melhorias gerais de eficiência energética. Os autores ainda citam entre as práticas relatadas, metas para redução da demanda de água, gestão de resíduos, redução ou eliminação de materiais perigosos em seus processos.

Como relatado pelos especialistas, não há elementos alternativos e ou processos já com domínio tecnológico consolidado. Desde modo, foram propostos cenários quanto à seleção de fornecedores de diferentes posições geográficas, transporte adotado e fontes de energia. Como evidenciado pelo método, as emissões indiretas relacionadas ao fornecimento de matérias primas e insumos possuem 16% de representatividade nas emissões totais e as emissões de energia 60%.

A simulação do fornecimento é limitada a matéria prima Óxido de Didímio por fornecedores de diferentes posições geográficas. O cenário denominado como atual, os elementos Fluoreto de Didímio (PrNdF₃), Fluoreto de Lítio (LiF), provem de fornecedores internacionais e o oxido de didímio, fornecimento nacional pela CBMM. É considerado ainda um cenário hipotético com fornecimento 100% nacional.

O aspecto energia também foi avaliado nos cenários comparando a influência de diferentes fontes nas emissões. Foram simuladas as emissões de energia eólica, solar e o atual cenário da energia elétrica obtida da atual matriz energética do sistema interligado nacional (SIN). Os fatores de conversão adotados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3- Fatores de Emissões

Aspecto	Fonte	Tipo	CO₂equivalenteKg
Água Kg			0,01260
Resíduos Sólidos e Efluentes Líquidos Kg			0,00533
Emissões Indiretas			
	Energia MJ	SNI	0,02100
		Eólica	0,00576
		Solar	0,00022
	Transporte	Navio (km)	0,00001
		Trem	0,00002
		Caminhão (km)	0,00006

Fonte: Elaborado pelo Autor, adaptado de IPCC (2006), PBGHGP (2018), Eco Audit® (2019), CBMM (2018) e SANEPAR (2018).

Para comparar os diferentes transportes foi assumida a mesma distância (quilometragem), não considerando as peculiaridades de rota para os distintos transportes. Para o cenário frente ao transporte ferroviário para as estimativas aqui apresentadas, foram consideradas a distância dos fornecedores nacionais em relação à linha ferroviária, onde para essa distância, as emissões foram calculadas considerando o transporte de caminhão. Não houve o levantamento de pontos de carga e descarga.

4.5.2 Comparativo entre cenários

Os resultados das simulações são apresentados em duas frentes, conforme observado na Figura 20. Na Figura 20, são apresentados os resultados de emissões, por diferentes fornecedores e fontes energéticas considerando o transporte nacional rodoviário. Na Figura 21, por sua vez, foi considerado o transporte nacional ferroviário. Nas imagens referidas é possível observar os valores estimados das emissões em termos de CO₂/kgITR, por processo.

Figura 20 – Resultado da simulação da combinação de diferentes fontes energéticas, fornecedores e modal nacional rodoviário.

Processos	Energia Eólica				Energia Solar				Atual Matriz Energética			
	Austrália	Cenário Atual	China	Fornecimento Nacional (100%)	Austrália	Cenário Atual	China	Fornecimento Nacional (100%)	Austrália	Cenário Atual	China	Fornecimento Nacional (100%)
Redução Eletrólica	2,3	2,0	2,3	1,8	1,9	1,6	1,9	1,5	3,3	3,0	3,4	2,9
Fabricação da Liga	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5
Fragmentação Grosseira	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,7	0,7	0,7	0,7
Moagem (Jet Mill)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Alinhamento / Compactação	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Sinterização e Trat. Térmico	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
Acabamento (Usinagem)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7
Revestimento Ni-Cu-Ni	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Magnetização	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Embalagem	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2
LABFABITR	3,9	3,6	3,9	3,5	2,9	2,6	2,9	2,4	6,7	6,4	6,7	6,2

Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

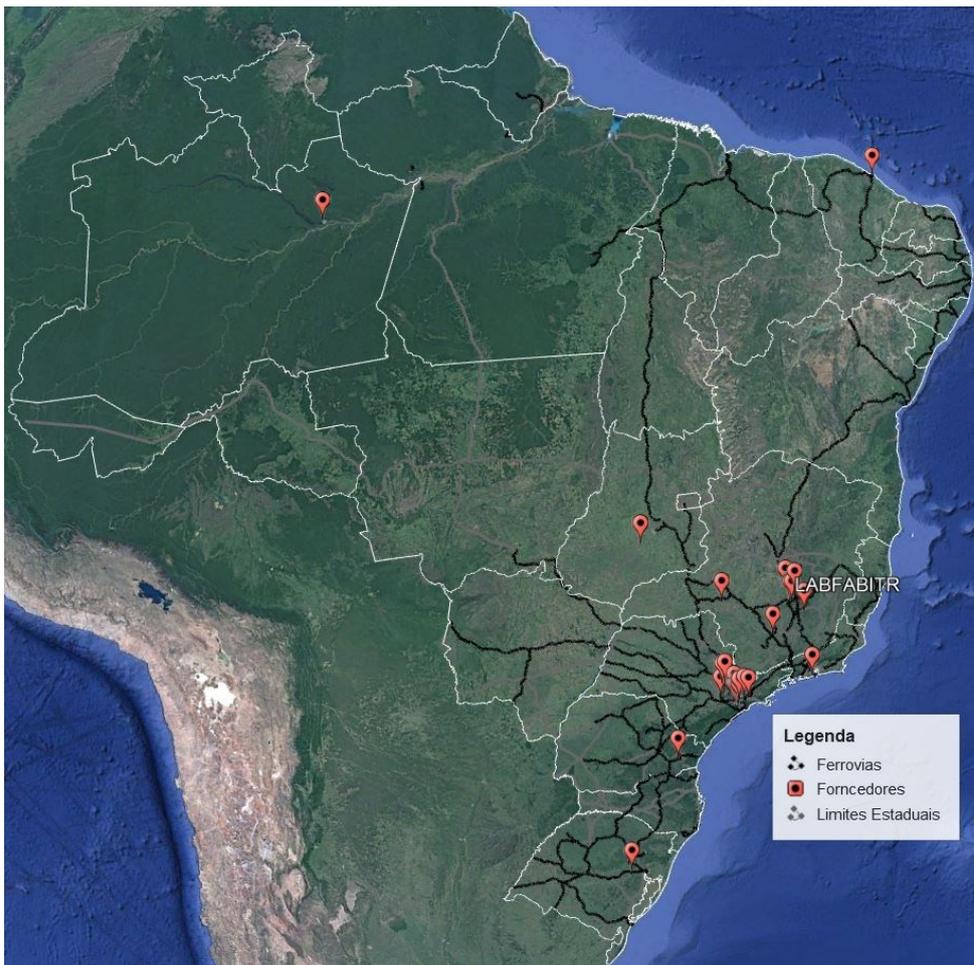
Figura 21 – Resultado da simulação da combinação de diferentes fontes energéticas, fornecedores e modal nacional ferroviário.

Processos	Energia Eólica				Energia Solar				Atual Matriz Energética			
	Austrália	Cenário Atual	China	Fornecimento Nacional (100%)	Austrália	Cenário Atual	China	Fornecimento Nacional (100%)	Austrália	Cenário Atual	China	Fornecimento Nacional (100%)
Redução Eletrólica	2,1	1,8	2,2	1,7	1,7	1,5	1,8	1,3	3,2	2,9	3,2	2,8
Fabricação da Liga	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5
Fragmentação Grosseira	0,2	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,6	0,6	0,6
Moagem (Jet Mill)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
Alinhamento / Compactação	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
Sinterização e Trat. Térmico	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
Acabamento (Usinagem)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,6	0,6	0,6	0,6
Revestimento Ni-Cu-Ni	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3
Magnetização	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Embalagem	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2
LABFABITR	3,4	3,1	3,4	3,0	2,4	2,1	2,4	2,0	6,2	5,9	6,2	5,8

Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

Com base nas imagens, observa-se que, em média, o uso do modal ferroviário apresenta redução nas emissões de 13%, quando comparadas ao uso do caminhão. Apesar do modal rodoviário constituir mais de 60% em nível nacional, o LABFABITR está situado em uma posição estratégica denominado Quadrilátero Ferrífero, onde as ferrovias são responsáveis pelo escoamento e abastecimentos dos principais centros de mineração e siderurgia, tendo conexão com os principais portos brasileiros incluindo o do Espírito Santo (ANTF, 2018). Essa posição contribui para o uso dos transportes combinados (trem + navio). A análise da distribuição espacial dos fornecedores, apresentada na Figura 22 em relação à linha ferroviária, permite concluir que, de modo geral, os fornecedores nacionais estão inseridos na posição estratégica referida.

Figura 22 – Distribuição espacial dos fornecedores nacionais do LABFABITR em relação as ferrovias nacionais.

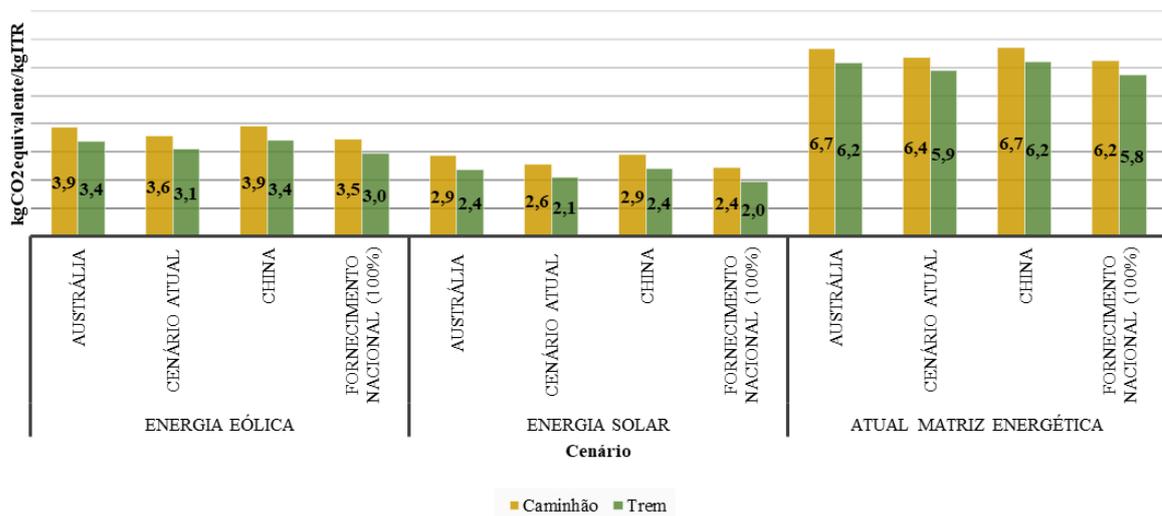


Fonte: Elaborada pelo Autor (2019), adaptado de Mapa de Ferrovias (ANTF, 2018).

Com base na análise dos cenários foi possível constatar que a distância não exerce tanta influência nas emissões quanto o tipo de transporte utilizado e a matriz energética utilizada na produção. Isso porque, comparando o cenário atual de fornecimento, o qual parte das matérias primas são de origem internacional, ao cenário de fornecimento 100% nacional, a redução nas emissões causada por meio da diminuição da distância do transporte é de apenas 3%. Já comparando o mesmo contexto, cenário atual, com diferentes modais de transporte (sendo trem e caminhão), a redução das emissões é de 8%. Quanto ao comparativo entre diferentes fontes energéticas e o cenário atual, a redução das emissões é de 61% com a utilização de energia solar e 46% com a utilização de energia eólica, quando adquiridas no Sistema Interligado Nacional.

A Figura 23, apresenta as emissões totais do LABFABITR combinando diferentes posições geográficas dos fornecedores ao modal nacional (caminhão e trem). O melhor cenário é o uso do transporte ferroviário, combinado ao fornecimento 100% nacional e a fonte de energia a solar.

Figura 23 – Emissões de CO2 para os diferentes transportes.

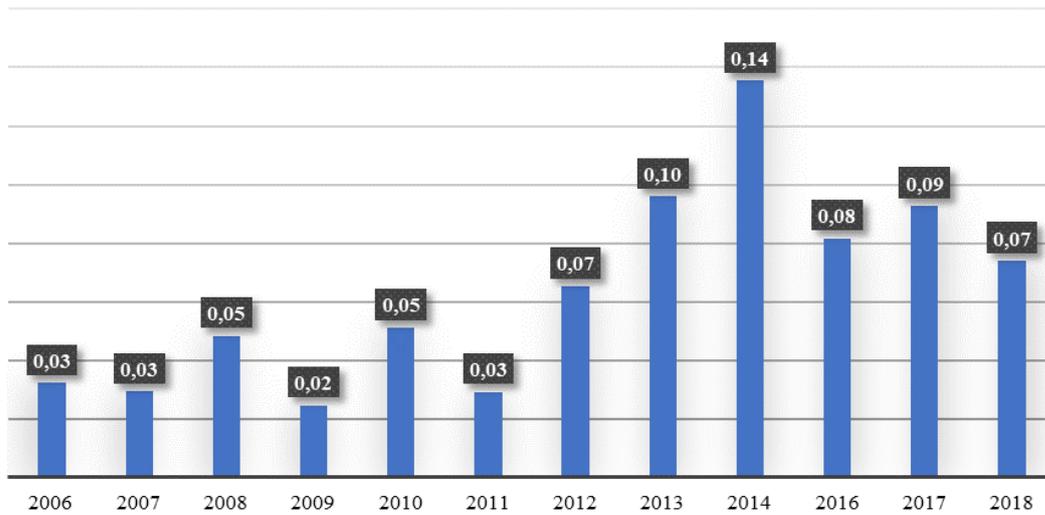


Fonte: Elaborada pelo Autor (2019).

Não foram avaliados os impactos de materiais de origens secundárias, no entanto, com base em uma simulação feita na ferramenta *Eco Audit*®, a inserção de 50% de ETR de origem secundária representa uma redução de 55% nas emissões CO₂equivalente, considerando as cinco fases do produto (material, manufatura, transporte, uso e disposição final).

Ressalta-se que os fatores de conversão devem ser atualizados periodicamente, pois estes são calculados com base na composição da matriz energética, eficiência energética, entre outros, e como pode ser observado na Figura 24, sofrem variações periódicas. Assim, para garantir a confiabilidade dos resultados e que estes estejam em consonância com os padrões globais de gestão, recomenda-se a atualização dos fatores.

Figura 24 – Fatores de emissão anual de energia elétrica SIN.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2019), adaptado de Brasil (2018b).

5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Um método para avaliar a sustentabilidade ambiental da produção de ITR no Brasil em fase de projeto é proposto no trabalho. O uso de ITR é fortemente vinculado à energia de baixa emissão de carbono, porém, as considerações sobre os aspectos ambientais da cadeia produtiva e potenciais soluções permanecem lacunas na literatura (ARSHI et al., 2018; AZEVEDO, 2018). A avaliação da sustentabilidade ambiental deve considerar as peculiaridades dos distintos setores e processos envolvidos, no entanto a falta de considerações quanto aos aspectos da cadeia produtiva de ITR e/ou metalurgia do pó dificulta a tomada de decisão frente a um processo mais sustentável (ARSHI et al., 2018; AZEVEDO, 2018).

Na primeira fase da pesquisa, a análise dos relatórios de sustentabilidade e as orientações setoriais GRI foram utilizadas para compor o conjunto de indicadores ambientais do método proposto. O escopo dos indicadores também teve como referência as orientações GRI. Relatórios de sustentabilidade, em especial o padrão GRI, são amplamente utilizados na composição de métodos e ferramentas de avaliação de desempenho ambiental (GALLEGO-ÁLVAREZ; LOZANO; RODRÍGUEZ-ROSA, 2018; ROBINSON et al., 2018; TSALIS; AVRAMIDOU; NIKOLAOU, 2017). Os indicadores e diretrizes GRI subsidiaram diferentes modelos e métodos de avaliação da sustentabilidade e tomada de decisão (TALEIZADEH; HAGHIGHI; NIAKI, 2019; DU PLESSIS; BAM, 2018; HERNÁNDEZ-PERLINES; RUNG-HOCH, 2017).

Os indicadores foram selecionados por meio das orientações setoriais do GRI para mineração e metalurgia, e por meio do levantamento dos indicadores reportados pelo setor de metalurgia, considerando ainda as distinções identificadas na literatura. O conjunto de indicadores selecionados compõem seis aspectos subdivididos em 14 indicadores.

Para a estruturação do método inicialmente foi estabelecida a estrutura analítica, a qual estabelece relação entre os indicadores ao processo, delimitando o escopo dos indicadores. A estrutura foi construída com base nas orientações do GRI, com objetivo de elucidar o que medir e ou considerar em cada etapa do processo, pois apesar das ferramentas e métodos serem bastante difundido na literatura, poucas pesquisas destacam como e o que medir, ou ainda como interpretar (BÜYÜKÖZKAN; KARABULUT, 2018). Como produto desta etapa obteve-se então a matriz de relação entre indicadores e processo.

Após definida a estrutura para coleta de dados, foi proposto o tratamento destes por normalização dos indicadores em CO₂ equivalente, a fim de permitir o comparativo entre indicadores e aspectos. O desempenho das distintas etapas foi avaliado considerando as emissões de CO₂ equivalente do processo e as emissões indiretas de energia e transporte dos *inputs*, o somatório dos indicadores positivos e quantidade de materiais envolvidos em cada etapa. Os dados são então compilados em um único valor denominado *Desempenho*.

Na aplicação do método, ao contexto LABFABITR foram identificados 10 etapas e 41 elementos distintos, entre elementos de entrada e elementos de saída. Os riscos associados aos elementos químicos ficam evidenciados na caracterização, em que 82% dos elementos de entrada são classificados como perigosos pela ANTT. Os resíduos perigosos foram identificados em 4 das 10 etapas que constituem o processo. Os dados obtidos frente à caracterização do fluxo produtivo podem ser considerados uma contribuição importante para a construção de uma cadeia produtiva sobre a ótica da sustentabilidade ambiental, visto a lacuna identificada em relação aos dados de produto e processos que envolvem ETR (ARSHI; VAHIDI; ZHAO, 2018; WULF et al., 2017).

Dos 66 potenciais fornecedores identificados, apenas 4 fornecedores dispõem de relatórios de sustentabilidade e 8 de certificação ISO 14.001. A atividade de metalurgia e mineração está entre as atividades mais poluidoras do mundo (CRUZ-HERNÁNDEZ, 2018), onde a seleção de fornecedores, com base em critérios ambientais é uma importante estratégia para as empresas buscarem atingir suas metas ambientais (BOUTKHOUM, 2016). Ao contexto dos ITR a prática se demonstra deficitária, não apenas pelo baixo número de certificações, mas também pelo baixo número de repórter do indicador *fornecedores selecionados com base em critérios ambientais* em RS pelo setor de metalurgia, onde apenas 6, num conjunto de 23 empresas, reportam o indicador. A gestão de fornecedores é uma estratégia crucial para estabelecer e atingir os objetivos ambientais (BATISTA; FRANCISCO, 2018).

A avaliação da proposta metodológica resultou em um panorama quanto às pesquisas em desenvolvimento sobre os novos processos, incluindo o de reciclagem. Após as considerações dos pesquisadores foram inclusos no modelo informações quanto a elementos e quanto ao potencial de risco dos elementos envolvidos no processo obtendo assim a versão

consolidada do modelo e diagnóstico. Para a produção de 1kg de ITR, são utilizados aproximadamente 24kg de materiais, dos quais 1,95kg refere-se ao Óxido de Didímio e Ferro.

Os impactos dos elementos de entrada por processos de reciclagem não foram avaliados no trabalho, visto que em nível nacional encontra-se em fase de pesquisa. No entanto, o fornecimento de ETR de origem secundária é apontado na literatura como a principal estratégia para gerir as incertezas de fornecimento e os impactos associados a extração do recurso (BUSCH; DAWSON; ROELICH, 2017; SCHULZE et al., 2017; CIACCI, et al., 2019). Para o Óxido de Didímio há o potencial de origem secundária, por meio da reciclagem e rejeito do Nb.

O processo de redução eletrolítica gera aproximadamente 400kg/ano de rejeitos de óxido de Didímio particulado fino, enquanto o processo de usinagem gera 240kg/ano de NdFeB. Esses achados concordam com o estudo de Sprecher et al. (2014), que apregoa que cerca de 50% dos ETR se perdem ao longo da cadeia.

Quanto ao desempenho ambiental, a redução eletrolítica apresenta o pior desempenho, sendo o processo responsável por 48% das emissões totais na produção de ITR. Destas emissões, 12% se refere à atividade de transporte. Segundo Shahrudin (2019), as cadeias de suprimento são consideradas os contribuintes mais significativos para as emissões de carbono.

Apesar dos riscos associados ao processo não terem sido avaliados de forma efetiva nesta pesquisa, limitando-se aos elementos químicos envolvidos, é válido ressaltar que parte do processo ocorre em atmosfera inerte, através da atmosfera de Argônio, devido ao risco de combustão dos elementos, como por exemplo, o Óxido de Didímio. Atrelado ao risco de combustão está a presença de elementos que, em combustão, liberam gases tóxicos, como o caso do Cloreto de Níquel, Gás Carbônico, Fluido de Corte entre outros. A planta fabril fica a menos de 600m de área urbana, conforme observado na Figura 25, fato que potencializa os riscos ao entorno.

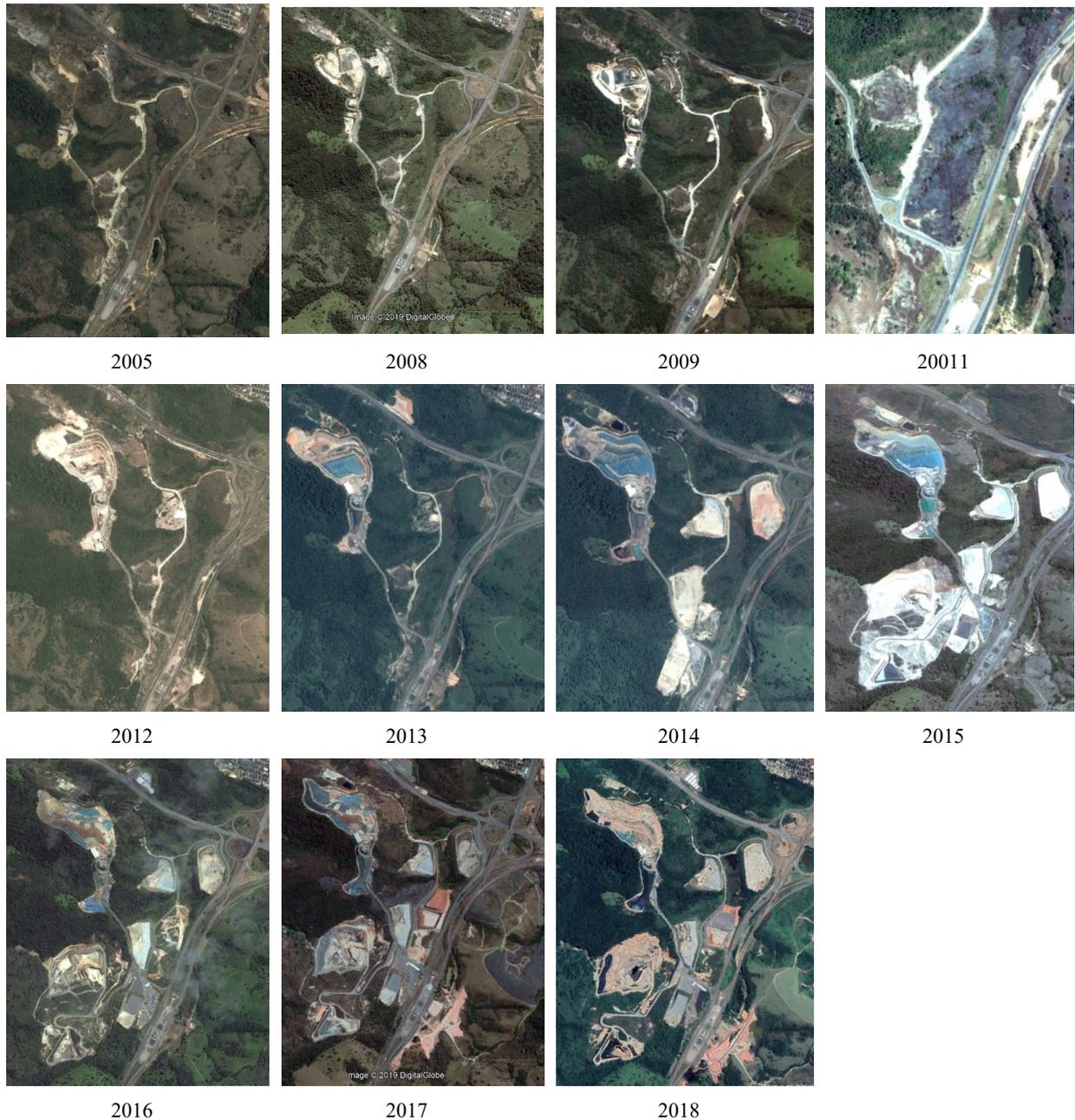
Figura 25 – Posição da planta fabril em relação a área urbana.



Fonte: Elaborado pela Autor (2019).

O principal resíduo em termos de volume é o lodo galvânico, o qual contém metais pesados e outros elementos cancerígenos. Destaca-se ainda que a área da planta fabril corresponde a um importante polo de mineração brasileiro, deste modo, os passivos ambientais são somatizados. A Figura 26 apresenta a evolução de um aterro de resíduo industrial, localizado no entorno do LABFABITR, onde pode se observar a sua expansão, sendo esta mais expressiva para o ano de 2012. Segundo Perlin et al. (2018), temas como consumo de energia, impactos das mudanças climáticas, emissões de gases ácidos e volumes de resíduos sólidos, contenção de efluentes, degradação de vistas panorâmicas e a perda de conveniência, são fortemente associados ao setor de mineração.

Figura 26 – Evolução de um aterro de resíduos industriais, no entorno do LABFABITR.



Fonte: Google Earth (2019).

Além da geração de resíduos, o processo de revestimento destaca-se negativamente em relação às águas residuais, refletindo em aproximadamente 16.000 litros de água/ano, contendo elementos tóxicos. Deste modo, evidencia-se um potencial de contaminação de solo e água. Apesar dos elementos químicos envolvidos no processo, de modo geral, não possuem persistências significativa no meio ambiente, possuem boa mobilidade e facilmente podem atingir o lençol freático. Segundo dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) há 152 poços de águas subterrâneas no município de Araxá, destes,

11 em operação para uso humano e irrigação. É importante destacar que o projeto LABFAITR, prevê dispositivos de controle ambiental com base na legislação vigente, no entanto, como mencionado, não foi avaliada a conformidade ambiental do projeto, sendo destacados no trabalho apenas os potenciais impactos evidenciados.

Em termos de elementos químicos, o atual cenário foi considerado o ideal. Quanto ao fornecimento, a implementação de fornecimento 100% nacional representa redução de 2% nas emissões, quando comparada ao cenário atual de fornecimento. Apesar de que no contexto atual não dispor de fornecedores nacionais para os elementos Fluoreto de Didímio e Fluoreto de Lítio, inviabilizando a implementação do cenário, dentre os fornecedores internacionais identificados dois dispõem de sede no Brasil. Outro fator que pode viabilizar a produção nacional dos elementos referidos é o fato de o Brasil dispor de reservas das matérias primas passíveis de produção nacional (BRAGA; FRANÇA, 2013; CGEE, 2013; USGS, 2018). No entanto para garantir a viabilidade de produção nacional é necessário um estudo sobre o processo de extração química destes elementos.

Com base nas simulações de cenários, o tipo de transporte adotado tem mais impacto nas emissões do que a distância percorrida. A descarbonização é um dos principais desafios para o setor de transporte de carga, e entre as práticas para alcance desse objetivo estão: tecnologias limpas de veículos, otimização de redes e transferência modal (JONKEREN; FRANCKE; VISSER, 2019), com destaque para a transferência modal, conforme confirmado na análise de cenários. A seleção de fornecedores e a redução emissões indiretas de energia são o foco para o alcance de melhorias do desempenho ambiental neste cenário. A posição geográfica do LABFAITR viabiliza a implementação do transporte ferroviário e fonte de energia solar, pois está inserido em uma posição estratégica frente as ferrovias e localizado em uma área com alto potencial na geração de energia solar com médias de 6,0 a 6,5 kWh/m² (CODEMIG, 2012).

6 CONCLUSÕES

A estratégia de sustentabilidade corporativa deve se adaptar ao contexto de cada empresa. O objetivo desta dissertação foi desenvolver um método para avaliar a sustentabilidade ambiental da produção de ITR no Brasil em fase de projeto, com base em metas e padrões globais, frente à sustentabilidade corporativa. Inicialmente foram conduzidas duas revisões de literatura, a primeira abrangendo a sustentabilidade ao contexto de ITR, e a segunda envolvendo o uso de GRI na avaliação da sustentabilidade corporativa. Esta etapa forneceu subsídios para elaboração da dissertação evidenciando os fatores a serem considerados frente à sustentabilidade da produção de ITR. O problema de pesquisa, bem como os objetivos delineados nesta dissertação, foram identificados por meio da análise de literatura.

O objetivo geral da dissertação foi obtido por meio de cinco objetivos específicos. O primeiro consistiu na seleção do conjunto de indicadores ambientais que permitiram avaliar a produção de ITR, evidenciando os impactos da produção, alinhado as estratégias globais para uma produção mais sustentável. Para seleção foi consolidada por meio da literatura existente, orientações setoriais do GRI e o levantamento de indicadores reportados pelo setor. Como produto desta etapa obteve-se um conjunto de 14 indicadores ambientais passíveis de avaliar a produção.

O segundo objetivo consistiu em estruturar a proposta metodológica para avaliar a sustentabilidade ambiental do processo. A proposta foi estruturada com base na metodologia de matriz de relação, onde, quando cruzadas com as características ambientais e operacionais da atividade, levam a determinação dos impactos do processo avaliado. A metodologia foi construída em cinco planilhas vinculadas, as quais integram e organizam a coleta e o tratamento dos dados, resultando em um valor de desempenho das distintas etapas do processo.

O terceiro objetivo específico retrata a aplicação do método aos dados do fluxo produtivo do LABFABITR. Por meio da aplicação do modelo proposto, foi possível evidenciar quais etapas do processo e quais fatores interferem no desempenho ambiental, de forma a permitir o direcionamento de estratégias, quanto a construção de uma cadeia produtiva sobre os aspectos da sustentabilidade. O processo de redução eletrolítica registra o pior desempenho, seguido do processo de revestimento.

A quarto objetivo avaliou a proposta metodológica por meio de reuniões com pesquisadores de ITR atuantes no LABFABITR. Com base nas considerações destes, o modelo foi então ajustado e apresentado na sua versão consolidada. Ainda nas reuniões foi possível identificar fatores a serem considerados que permitiram a construção de cenários, visando identificar um direcionamento quanto a metas ambientais para a construção da cadeia produtiva de ITR nacional, em consonância com padrões internacionais de sustentabilidades, envolvendo o alcance do quinto objetivo específico.

Os principais resultados quanto às estratégias se concentraram na seleção de fornecedores, estratégias de logística e desenvolvimento e implementação de processos como o de reciclagem, já em fase de pesquisa. Ainda, foi observado a relevância de investimentos em fontes renováveis de energia e/ou eficiência energética.

Apesar do crescente interesse, ainda são escassas as considerações da sustentabilidade em ITR. No entanto, a literatura direciona para otimização dos processos e etapas envolvidas na cadeia de ETR, com destaque para a reciclagem. Neste sentido, esta pesquisa apresenta contribuições quanto ao tema abordado, mapeando os fatores que influenciam no desempenho ambiental da produção de ITR, por meio de um conjunto de indicadores de sustentabilidade ambiental que representam os impactos associados à produção brasileira.

A pesquisa ainda contribui para métodos de avaliação da sustentabilidade em fase de projeto, aplicadas ao processo. Entre os diferenciais do LABFABITR, está a possibilidade de implementação de novas tecnologias, como a fabricação de ITR por moldagem de pós por injeção e manufatura aditiva. Ter uma metodologia adaptada ao processo permite visualizar a viabilidade ambiental desses novos processos. Desta forma, o método proposto poderá ser utilizado ainda na fase de pesquisa, permitindo avaliar os ganhos ambientais dos distintos métodos, sendo este um direcionamento quanto a pesquisas futuras, bem como avanços quanto a critérios para seleção dos fornecedores, caracterização e otimização de logística e mapeamento de canais reversos dos ITR.

Dentre as limitações do estudo está a avaliação restringida ao pilar ambiental da sustentabilidade. Além do mais, esse trabalho não considerou os aspectos de *design* dos ITR nas simulações, e essa variável pode exercer influência no que tange o desempenho ambiental do processo. Distintos processos também não foram considerados na simulação, uma vez que,

esses, encontram-se atualmente em fase de desenvolvimento e estudo. Outra limitação tange a não incorporação das emissões da extração de matérias primas nacionais, que pode apresentar grande relevância na contribuição final do desempenho ambiental do processo de ITR.

As limitações destacadas poderão ser utilizadas como direcionamento de estudos futuros, completando e aprimorando o método aqui apresentado. Ou seja, esses direcionamentos inferem na integração dos aspectos sociais e econômicos ao método. Diferentes processos e rotas de produção também são pautados como estudos futuros, bem como a avaliação ambiental dos fornecedores nacionais envolvidos ao processo de ITR, permitindo posterior integração dos dados ao método desenvolvido.

As contribuições deste trabalho alinhado com o direcionamento de pesquisas futuras sugeridas, podem auxiliar no desempenho da cadeia de suprimentos em sua totalidade, apoiando estratégias para uma cadeia mais sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14064**: Guia De Implementação Gestão De Emissões E Remoções De Gases De Efeito Estufa (GEE). Brasil, 2015.
- ALONSO, E.; SHERMAN, A. M.; WALLINGTON, T. J.; EVERSON, M. P.; FIELD, F. R.; ROTH, R.; KIRCHAIN, R. E. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 6, p. 3406-3414, 2012.
- ARAS, G.; TEZCAN, N.; FURTUNA, O. K. Multidimensional comprehensive corporate sustainability performance evaluation model: Evidence from an emerging market banking sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 185, p. 600-609, 2018.
- ARSHI, P. S.; VAHIDI, E.; ZHAO, F. Behind the scenes of clean energy—the environmental footprint of rare earth products. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 3, p. 3311-3320, 2018.
- ASHBY, M.; COULTER, P.; BALL, N.; BREAM, C. The CES EduPack Eco Audit Tool—A White Paper. 2009.
- AZEVEDO, J. M.C.; SERRENHO, A. C.; ALLWOOD, J. M. Energy and material efficiency of steel powder metallurgy. **Powder Technology**, v. 328, p. 329-336, 2018.
- BATISTA, Alamo; FRANCISCO, Antonio. Organizational sustainability practices: A study of the firms listed by the corporate sustainability index. **Sustainability**, v. 10, n. 1, p. 226, 2018.
- BATISTA, Alamo; FRANCISCO, Antonio. Organizational sustainability practices: A study of the firms listed by the corporate sustainability index. **Sustainability**, v. 10, n. 1, p. 226, 2018.
- BELLANTUONO, N.; PONTRANDOLFO, P.; SCOZZI, B. Capturing the stakeholders' view in sustainability reporting: a novel approach. **Sustainability**, v. 8, n. 4, p. 379, 2016.
- BINNEMANS, K.; JONES, P. T.; BLANPAIN, B.; VAN GERVEN, T.; YANG, Y.; WALTON, A; BUCHERT, M. Recycling of rare earths: a critical review. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 1-22, 2013.
- BOIRAL, O.; HENRI, J.F. Is sustainability performance comparable? A study of GRI reports of mining organizations. **Business & Society**, v. 56, n. 2, p. 283-317, 2017.
- BOIRAL, O.; HERAS-SAZARBITORIA, I. Corporate commitment to biodiversity in mining and forestry: Identifying drivers from GRI reports. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 153-161, 2017.

BOUTKHOUM, O.; HANINE, M., BOUKHRISS, H.; AGOUTI, T.; TIKNIOUINE, A. Multi-criteria decision support framework for sustainable implementation of effective green supply chain management practices. **SpringerPlus**, v. 5, n. 1, p. 664, 2016.

BRAAM, G. J.; WEERD, L. U., HAUCK, M.; HUIJBREGTS, M. A. Determinants of corporate environmental reporting: The importance of environmental performance and assurance. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 724-734, 2016.

BRAGA, Paulo Fernando Almeida; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. Lítio: um mineral estratégico. II **Simpósio De Minerais Industriais Do Nordeste**, 2013.

BRASIL, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações. Brasília, DF, 2018b. Fator médio inventário corporativo. Acesso em: 12 fev 2019. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>.

BRASIL, Ministério de Infraestrutura. **Mapa Multimodais**. Brasília, DF, 2018a. Acesso em: 25 fev 2019. Disponível em: <www.transportes.gov.br/conteudo/63-bit/5124-bitpublic.html#maprodo>.

BRUNDAGE, M. P.; BERNSTEIN, W. Z.; HOFFENSON, S.; CHANG, Q.; NISHI, H.; KLIKS, T.; MORRIS, K. C. Analyzing environmental sustainability methods for use earlier in the product lifecycle. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 877-892, 2018.

BÜYÜKÖZKAN, G.; KARABULUT, Y. Sustainability performance evaluation: Literature review and future directions. **Journal of Environmental Management**, v. 217, p. 253-267, 2018.

CALABRESE, A.; COSTA, R.; LEVIALDI, N.; MENICHINI, T. A fuzzy analytic hierarchy process method to support materiality assessment in sustainability reporting. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 248-264, 2016.

CANTELE, S.; TSALIS, T. A.; NIKOLAOU, I. E. A new framework for assessing the sustainability reporting disclosure of water utilities. **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 433, 2018.

CARDONI, A.; KISELEVA, E.; TERZANI, S.. Evaluating the Intra-Industry Comparability of Sustainability Reports: The Case of the Oil and Gas Industry. **Sustainability**, v. 11, n. 4, p. 1093, 2019.

CARNEVALLI, J. A.; MIGUEL, P. C.. Review, analysis and classification of the literature on QFD—Types of research, difficulties and benefits. **International Journal of Production Economics**, v. 114, n. 2, p. 737-754, 2008.

CEMIG, COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Sustentabilidade. Acesso em: 06 fev. 2019. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/sustentabilidade/Paginas/sustentabilidade.aspx>.

CEMIG, COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2012.

CERTI - Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras. **Relatório Técnico Final do Projeto Executivo de Engenharia do LABFABITR**. CERTI, 2017.

CEULEMANS, K.; LOZANO, R.; ALONSO-ALMEIDA, M. D. M. Sustainability reporting in higher education: Interconnecting the reporting process and organisational change management for sustainability. **Sustainability**, v. 7, n. 7, p. 8881-8903, 2015.

CGEE, CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Usos e aplicações de Terras Raras no Brasil: 2012-2030. Brasília: CGEE, 2013.

CHAUVEY, J. N.; GIORDANO-SPRING, S.; CHO, C. H.; PATTEN, D. M. The normativity and legitimacy of CSR disclosure: Evidence from France. **Journal of Business Ethics**, v. 130, n. 4, p. 789-803, 2015.

CHEN, L.; TANG, O.; FELDMANN, A. Applying GRI reports for the investigation of environmental management practices and company performance in Sweden, China and India. **Journal of Cleaner Production**, v. 98, p. 36-46, 2015.

CHRISTOFI, A.; CHRISTOFI, P.; SISAYE, S. Corporate sustainability: historical development and reporting practices. **Management Research Review**, v. 35, n. 2, p. 157-172, 2012.

CIACCI, Luca et al. Recovering the “new twin”: Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 142, p. 143-152, 2019.

COMYNS, B. Determinants of GHG reporting: an analysis of global oil and gas companies. **Journal of Business Ethics**, v. 136, n. 2, p. 349-369, 2016.

CRUZ-HERNÁNDEZ, Y; RUIZ-GARCÍA, M., VILLALOBOS, M.; ROMERO, F. M.; MEZA-FIGUEROA, D.; GARRIDO, F.; PI-PUIG, T. Fractionation and mobility of thallium in areas impacted by mining-metallurgical activities: Identification of a water-soluble Tl (I) fraction. **Environmental Pollution**, v. 237, p. 154-165, 2018.

DE LIMA, R. G.; LINS, H. N.; PFITSCHER, E. D.; GARCIA, J.; SUNI, A.; DE ANDRADE, J. B. S. O.; DELLE, F. C. R. A sustainability evaluation framework for Science and Technology Institutes: an international comparative analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 125, p. 145-158, 2016.

DELGADO, F.; ABREU, M. W.; SILVA, T. B. D. A geopolítica das energias renováveis: considerações iniciais. 2018.

DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral 2015. Brasília: DNPM 2015.

DU P., J.; BAM, W. Comparing the sustainable development potential of industries: a role for sustainability disclosures?. **Sustainability**, v. 10, n. 3, p. 878, 2018.

ELKINGTON, J. Towards the sustainable corporation: Win-win-win business strategies for sustainable development. **California Management Review**, v. 36, n. 2, p. 90-100, 1994.

ELLIS, J. I.; CLARK, M. R.; ROUSE, H. L.; LAMARCHE, G. Environmental management frameworks for offshore mining: the New Zealand approach. **Marine Policy**, v. 84, p. 178-192, 2017.

EPA-UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Lean Manufacturing and Environment - Toolkits**. 2007. Disponível em: <<https://www.epa.gov/lean/lean-environment-toolkit-chapter-3>>. Acesso em 17 de abril de 2018.

ERKER, S.; STANGL, R.; STOEGLEHNER, G.. Resilience in the light of energy crises–Part II: Application of the regional energy resilience assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 495-507, 2017.

FAHIMNIA, B.; SARKIS, J.; DAVARZANI, H. Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. **International Journal of Production Economics**, v. 162, p. 101-114, 2015.

FAULKNER, W.; BADURDEEN, F. Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. **Journal of cleaner production**, v. 85, p. 8-18, 2014.

FERNANDEZ-FEIJOO, B.; ROMERO, S.; RUIZ, S. Commitment to corporate social responsibility measured through global reporting initiative reporting: Factors affecting the behavior of companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 81, p. 244-254, 2014.

FERREIRA, F. A.; NASCIMENTO, M. Terras Raras: Aplicações atuais e reciclagem. 2013.

FTHENAKIS, V.; WANG, W.; KIM, H. C. Life cycle inventory analysis of the production of metals used in photovoltaics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 3, p. 493-517, 2009.

FUENTE, J. A.; GARCÍA-SÁNCHEZ, I. M.; LOZANO, M. B. The role of the board of directors in the adoption of GRI guidelines for the disclosure of CSR information. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 737-750, 2017.

FUSS, M.; BONFANTE, M. C.; FERNANDES, S.; CAMPOS, L. M. S; ALARCON, O. E. Designing framework conditions for a sustainable supply chain of Niobium in Brazil – a critical material. In: conference; 6th International EurOMA conference: Sustainable Operations and Supply Chains Forum; 2019-03-18; 2019-03-19. EurOMA, 2019.

GALLEGO-ÁLVAREZ, I.; LOZANO, M. B.; RODRÍGUEZ-ROSA, M. An analysis of the environmental information in international companies according to the new GRI standards. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, p. 57-66, 2018.

GARCÍA-PÉREZ, I.; MUÑOZ-TORRES, M.; FERNÁNDEZ-IZQUIERDO, M. Microfinance literature: A sustainability level perspective survey. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3382-3395, 2017.

GAVANA, G.; GOTTARDO, P.; MOISELLO, A. M. Sustainability reporting in family firms: A panel data analysis. **Sustainability**, v. 9, n. 1, p. 38, 2016.

GBEDEDU, M. A.; LIYANAGE, K.; GARZA-REYES, J. A. Towards a Life Cycle Sustainability Analysis: A systematic review of approaches to sustainable manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 1002-1015, 2018.

GRI, GLOBAL REPORTING, INICIATE. Manual de Implementação das Diretrizes para relato de sustentabilidade–G4, 2013.

GUESSER, T.; HEIN, N.; PFITSCHER, E. D.; LUNKES, R. J. Environmental impact management of Brazilian companies: Analyzing factors that influence disclosure of waste, emissions, effluents, and other impacts. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 148-160, 2015.

GWENZI, W.; MANGORI, L.; DANHA, C.; CHAUKURA, N.; DUNJANA, N.; SANGANYADO, E. Sources, behaviour, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants. **Science of The Total Environment**, v. 636, p. 299-313, 2018.

HAHN, R.; KÜHNEN, M. Determinants of sustainability reporting: a review of results, trends, theory, and opportunities in an expanding field of research. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 5-21, 2013.

HAMMOND, A.; WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development**. Washington, DC: World Resources Institute, 1995.

HAYDT, RCC. Técnicas e instrumentos de avaliação. **Avaliação do processo**, 1997.

HELLENO, A. L.; DE MORAES, A. J. I.; SIMON, A. T. Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: Application case studies in Brazilian industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 405-416, 2017.

HERNÁNDEZ PAJARES, Julio. Influencia de la naturaleza internacional de empresas peruanas en su información de sostenibilidad. **Revista de Comunicación**, v. 17, n. 1, p. 74-92, 2018.

HERNANDEZ-PERLINES, F.; RUNG-HOCH, N. Sustainable entrepreneurial orientation in family firms. **Sustainability**, v. 9, n. 7, p. 1212, 2017.

IEA International Energy Agency. CO2 Emissions from Fuel Combustion; 2017. Disponível em:

<<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustionHighlights2017.pdf>>. Acesso em 08 de maio de 2018.

IMHOLTE, D. D. NGUYEN, R. T., VEDANTAM, A., BROWN, M., IYER, A., SMITH, B. J., O'Kelley, B. An assessment of US rare earth availability for supporting US wind energy growth targets. **Energy Policy**, v. 113, p. 294-305, 2018.

JIANG, Q.; LIU, Z.; LIU, W.; LI, T.; CONG, W., ZHANG, H.; SHI, J. A principal component analysis based three-dimensional sustainability assessment model to evaluate corporate sustainable performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 625-637, 2018.

JIN, H.; AFIUNY, P.; DOVE, S.; FURLAN, G.; ZAKOTNIK, M.; YIH, Y.; SUTHERLAND, J. W. Life Cycle Assessment of Neodymium-Iron-Boron Magnet-to-Magnet Recycling for Electric Vehicle Motors. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 6, p. 3796-3802, 2018.

JIN, H.; YIH, Y.; SUTHERLAND, J. W. Modeling operation and inventory for rare earth permanent magnet recovery under supply and demand uncertainties. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 46, p. 59-66, 2018.

JONKEREN, O., FRANCKE, J., VISSER, J. A shift-share based tool for assessing the contribution of a modal shift to the decarbonisation of inland freight transport. **European Transport Research Review**, v. 11, n. 1, p. 8, 2019.

JOSEPH, C.; GUNAWAN, J.; SAWANI, Y.; RAHMAT, M.; NOYEM, J. A.; DARUS, F. A comparative study of anti-corruption practice disclosure among Malaysian and Indonesian Corporate Social Responsibility (CSR) best practice companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2896-2906, 2016.

KUMARASINGHE, Sriyalatha; WILL, Mitchell; HOSHINO, Yasuo. Enhancing performance by disclosing more: some evidence from Japanese companies. **Pacific Accounting Review**, v. 30, n. 1, p. 110-128, 2018.

KUZEY, C.; UYAR, A. Determinants of sustainability reporting and its impact on firm value: Evidence from the emerging market of Turkey. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 27-39, 2017.

LEONG, S.; HAZELTON, J.; TAPLIN, R.; TIMMS, W.; LAURENCE, D. Mine site-level water reporting in the Macquarie and Lachlan catchments: A study of voluntary and mandatory disclosures and their value for community decision-making. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, p. 94-106, 2014.

LI, Y.; YE, F.; SHEU, C.; YANG, Q. Linking green market orientation and performance: Antecedents and processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 924-931, 2018.

- LIERN, V.; PÉREZ-GLADISH, B. Ranking corporate sustainability: a flexible multidimensional approach based on linguistic variables. **International Transactions in Operational Research**, v. 25, n. 3, p. 1081-1100, 2018.
- LIMA, F. M.; LOVON-CANCHUMANI, G. A.; SAMPAIO, M.; TARAZONA-ALVARADO, L. M. Life Cycle Assessment of the Production of Rare Earth Oxides from a Brazilian Ore. **Procedia CIRP**, v. 69, p. 481-486, 2018.
- LIMA, P. C. R. Terras Raras: elementos estratégicos para o Brasil. **Senado Federal**, 2012.
- LINTON, J. D.; KLASSEN, R.; JAYARAMAN, V. Sustainable supply chains: An introduction. **Journal of Operations Management**, v. 25, n. 6, p. 1075-1082, 2007.
- LLOBERAS-VALLS, J.; PÉREZ, G. B.; GOMIS-BELLMUNT, O. Life-Cycle Assessment Comparison Between 15-MW Second-Generation High-Temperature Superconductor and Permanent-Magnet Direct-Drive Synchronous Generators for Offshore Wind Energy Applications. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 25, n. 6, p. 1-9, 2015.
- LOZANO, R.; NUMMERT, B.; CEULEMANS, K. Elucidating the relationship between sustainability reporting and organisational change management for sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 125, p. 168-188, 2016.
- LUGERT, A.; BATZ, A.; WINKLER, H. Empirical assessment of the future adequacy of value stream mapping in manufacturing industries. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 29, n. 5, p. 886-906, 2018.
- MAHMOOD, Z.; KOUSER, R.; ALI, W.; AHMAD, Z.; SALMAN, T. Does Corporate Governance Affect Sustainability Disclosure? A Mixed Methods Study. **Sustainability**, v. 10, n. 1, p. 207, 2018.
- MANSO, M.; CASTRO-GOMES, J.; PAULO, B.; BENTES, I.; TEIXEIRA, C. A. Life cycle analysis of a new modular greening system. **Science of The Total Environment**, v. 627, p. 1146-1153, 2018.
- MARX, Josefine et al. Comparative life cycle assessment of NdFeB permanent magnet production from different rare earth deposits. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 5, p. 5858-5867, 2018.
- MASUD, M. D. A. K.; HOSSAIN, M. S.; KIM, J. D. Is Green Regulation Effective or a Failure: Comparative Analysis between Bangladesh Bank (BB) Green Guidelines and Global Reporting Initiative Guidelines. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 1267, 2018.
- MIGDADI, Y. K. A. Identifying the best practices of airlines' green operations strategy: A cross-regional worldwide survey. **Environmental Quality Management**, v. 28, n. 1, p. 21-32, 2018.

MIGDADI, Y. K. A.; OMARI, A. A. Identifying the best practices in green operations strategy of hospitals. **Benchmarking: An International Journal**, 2019.

MORENO-LEIVA, S.; DÍAZ-FERRÁN, G.; HAAS, J.; TELSNIIG, T.; DÍAZ-ALVARADO, F. A.; PALMA-BEHNKE, R.; ELTROP, L. Towards solar power supply for copper production in Chile: Assessment of global warming potential using a life-cycle approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 242-249, 2017.

MUMTAZ, U.; ALI, Y.; PETRILLO, A. A linear regression approach to evaluate the green supply chain management impact on industrial organizational performance. **Science of the Total Environment**, v. 624, p. 162-169, 2018.

NAWANIR, G.; FERNANDO, Y.; TEONG, L. K. A Second-order Model of Lean Manufacturing Implementation to Leverage Production Line Productivity with the Importance-Performance Map Analysis. **Global Business Review**, v. 19, n. 3_suppl, p. S114-S129, 2018.

NORDELÖF, Anders et al. Life cycle assessment of permanent magnet electric traction motors. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 67, p. 263-274, 2019.

OBER, J. A. **Mineral commodity summaries 2018**. US Geological Survey, 2018.

ORAZALIN, N.; MAHMOOD, M. Economic, environmental, and social performance indicators of sustainability reporting: Evidence from the Russian oil and gas industry. **Energy policy**, v. 121, p. 70-79, 2018.

ORAZALIN, N.; MAHMOOD, M.; NARBAEV, T.. The impact of sustainability performance indicators on financial stability: evidence from the Russian oil and gas industry. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-12, 2019.

PEIRÓ, L. T.; MÉNDEZ, G. V. Material and energy requirement for rare earth production. **Journal of Operation Management**, v. 65, n. 10, p. 1327-1340, 2013.

PERLIN, Ana Paula et al. Practices of energy use management and sustainable performance in Brazilian mineral industries. **Environmental Quality Management**, v. 27, n. 4, p. 143-153, 2018.

PHILIPPI JÚNIOR, A.; MALHEIROS, T. F.; AGUIAR, A. O. Indicadores de desenvolvimento sustentável. In: **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. p. 761-808, 2005.

RAO, P.; HOLT, D. Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance?. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 25, n. 9, p. 898-916, 2005.

RIDAURA, G.; LLORENS-CERVERA, S.; CARRILLO, C.; BUJ-CORRAL, I.; RIBAROMEVA, C. Equipment suppliers integration to the redesign for emissions reuse in industrial processes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 131, p. 75-85, 2018.

ROBINSON, O. J.; TEWKESBURY, A.; KEMP, S.; WILLIAMS, I. D. Towards a universal carbon footprint standard: a case study of carbon management at universities. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 4435-4455, 2018.

RÖNNLUND, I.; REUTER, M.; HORN, S.; AHO, J.; AHO, M.; PÄÄLLYSAHO, M.; PURSULA, T. Eco-efficiency indicator framework implemented in the metallurgical industry: part 1—a comprehensive view and benchmark. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 10, p. 1473-1500, 2016.

RÖSCH, C.; BRÄUTIGAM, K. R.; KOPFMÜLLER, J.; STELZER, V.; FRICKE, A. Sustainability assessment of the German energy transition. **Energy, Sustainability and Society**, v. 8, n. 1, p. 12, 2018.

ROSENBAUM, S.; TOLEDO, M.; GONZÁLEZ, V. Improving environmental and production performance in construction projects using value-stream mapping: case study. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 140, n. 2, p. 04013045, 2013.

ROTHER, M.; SHOOK, J. **Learning to see: value stream mapping to add value and eliminate muda**. Lean Enterprise Institute, 2003.

SAEED, A.; JUN, Y.; NUBUOR, S. A.; PRIYANKARA, H. P. R.; JAYASURIYA, M. P. F. Institutional Pressures, Green Supply Chain Management Practices on Environmental and Economic Performance: A Two Theory View. **Sustainability**, v. 10, n. 5, p. 1517, 2018.

SANTIAGO-BROWN, I.; METCALFE, A.; JERRAM, C.; COLLINS, C. Sustainability assessment in wine-grape growing in the new world: Economic, environmental, and social indicators for agricultural businesses. **Sustainability**, v. 7, n. 7, p. 8178-8204, 2015.

SARTORI, S.; WITJES, S.; CAMPOS, L. M.S. Sustainability performance for Brazilian electricity power industry: An assessment integrating social, economic and environmental issues. **Energy Policy**, v. 111, p. 41-51, 2017.

SCHULZE, R.; WEIDEMA, B. P.; SCHEBEK, L.; BUCHERT, M. Recycling and its effects on joint production systems and the environment—the case of rare earth magnet recycling—Part I—Production model. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 134, p. 336-346, 2018.

SETHI, S. P., MARTELL, T. F., DEMIR, M. Enhancing the role and effectiveness of corporate social responsibility (CSR) reports: The missing element of content verification and integrity assurance. **Journal of Business Ethics**, v. 144, n. 1, p. 59-82, 2017.

SETHI, S. P.; MARTELL, T. F.; DEMIR, M. Enhancing the role and effectiveness of corporate social responsibility (CSR) reports: The missing element of content verification and integrity assurance. **Journal of Business Ethics**, v. 144, n. 1, p. 59-82, 2017.

SEURING, S.; MÜLLER, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 15, p. 1699-1710, 2008.

SHAHARUDIN, M. S. FERNANDO, Y. JABBOUR, C. J. C., SROUFE, R., JASMI, M. F. Past, present, and future low carbon supply chain management: A review of content scrutiny using social network analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 629-643, 2019.

SONG, Z.; MOON, Y. Sustainability metrics for assessing manufacturing systems: a distance-to-target methodology. **Environment, Development and Sustainability**, p. 1-24, 2018.

SUREEYATANAPAS, P.; POOPHIUKHOK, P.; PATHUMNAKUL, S. Green initiatives for logistics service providers: An investigation of antecedent factors and the contributions to corporate goals. **Journal of Cleaner Production**, v. 191, p. 1-14, 2018.

SWART, P.; DEWULF, J. Quantifying the impacts of primary metal resource use in life cycle assessment based on recent mining data. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 73, p. 180-187, 2013.

TALBOT, D.; BOIRAL, O. GHG reporting and impression management: An assessment of sustainability reports from the energy sector. **Journal of Business Ethics**, v. 147, n. 2, p. 367-383, 2018.

TALEIZADEH, A. A.; HAGHIGHI, F.; NIAKI, S. T. A.. Modeling and solving a sustainable closed loop supply chain problem with pricing decisions and discounts on returned products. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 163-181, 2019.

TARQUINIO, L.; RAUCCI, D.; BENEDETTI, R. An Investigation of Global Reporting Initiative Performance Indicators in Corporate Sustainability Reports: Greek, Italian and Spanish Evidence. **Sustainability**, v. 10, n. 4, p. 897, 2018.

TESTA, F.; IRALDO, F.; DADDI, T. The Effectiveness of EMAS as a Management Tool: A Key Role for the Internalization of Environmental Practices. **Organization & Environment**, v. 31, n. 1, p. 48-69, 2018.

THIJSSSENS, T.; BOLLEN, L.; HASSINK, H. Managing sustainability reporting: many ways to publish exemplary reports. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 86-101, 2016.

TOST, M.; HITCH, M.; CHANDURKAR, V.; MOSER, P.; FEIEL, S. The state of environmental sustainability considerations in mining. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, p. 969-977, 2018.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003.

TRAXLER, A. A.; GREILING, D. Sustainable public value reporting of electric utilities. **Baltic Journal of Management**, v. 14, n. 1, p. 103-121, 2019.

TRUANT, E.; CORAZZA, L.; SCAGNELLI, S. D. Sustainability and risk disclosure: An exploratory study on sustainability reports. **Sustainability**, v. 9, n. 4, p. 636, 2017.

TSALIS, T.; AVRAMIDOU, A.; NIKOLAOU, I. E. A social LCA framework to assess the corporate social profile of companies: Insights from a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 1665-1676, 2017.

TSCHOPP, D.; NASTANSKI, M. The harmonization and convergence of corporate social responsibility reporting standards. **Journal of Business Ethics**, v. 125, n. 1, p. 147-162, 2014.

VAHIDI, E.; NAVARRO, J.; ZHAO, F. An initial life cycle assessment of rare earth oxides production from ion-adsorption clays. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 113, p. 1-11, 2016.

VELEVA, V.; BODKIN, G.; TODOROVA, S. The need for better measurement and employee engagement to advance a circular economy: Lessons from Biogen's "zero waste" journey. **Journal of Cleaner Production**, v. 154, p. 517-529, 2017.

VIGNEAU, L.; HUMPHREYS, M.; MOON, J. How do firms comply with international sustainability standards? Processes and consequences of adopting the global reporting initiative. **Journal of Business Ethics**, v. 131, n. 2, p. 469-486, 2015.

VILLARES, M.; İŞILDAR, A.; VAN DER GIESEN, C.; GUINÉE, J. Does ex ante application enhance the usefulness of LCA? A case study on an emerging technology for metal recovery from e-waste. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 10, p. 1618-1633, 2017.

VINODH, S.; ARVIND, K. R.; SOMANAATHAN, M. Tools and techniques for enabling sustainability through lean initiatives. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 13, n. 3, p. 469-479, 2011.

VINODH, S.; RUBEN, R. B.; ASOKAN, P. Life cycle assessment integrated value stream mapping framework to ensure sustainable manufacturing: a case study. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 18, n. 1, p. 279-295, 2016.

WAAS, T.; HUGÉ, J.; BLOCK, T.; WRIGHT, T.; BENITEZ-CAPISTROS, F.; VERBRUGGEN, A. Sustainability assessment and indicators: Tools in a decision-making strategy for sustainable development. **Sustainability**, v. 6, n. 9, p. 5512-5534, 2014.

WAGNER, R.; SEELE, P. Uncommitted deliberation? Discussing regulatory gaps by comparing GRI 3.1 to GRI 4.0 in a political CSR perspective. **Journal of Business Ethics**, v. 146, n. 2, p. 333-351, 2017.

WANG, W. H.; LIU, T.; LIU, Y. H.; GUO, S. H. Evaluation on contribution of steel products to environmental improvement from life cycle assessment perspectives. **Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)**, v. 17, n. 3, p. 370-372, 2012.

WCED -World Commission on Environment and Development **Our Common Future (The Brundtland Report)** (1987).

WESCHENFELDER, F.; PAULETTI, P.; BITTENCOURT, S. D.; PELEGRINI, L.; ITO, D. K.; SCHAEFFER, L. Situação atual e perspectivas da produção de Ímãs permanentes e reservas de terras raras: Brasil× Mundo. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 9, n. 4, p. 309, 2012.

WOŹNIAK, J.; PACTWA, K. Environmental Activity of Mining Industry Leaders in Poland in Line with the Principles of Sustainable Development. **Sustainability**, v. 9, n. 11, p. 1903, 2017.

WRI, World Resources Institute. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard, 2011. Disponível em:<http://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-ReportingStandard-EReader_041613_0.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2019.

WULF, C.; ZAPP, P.; SCHREIBER, A.; MARX, J.; SCHLÖR, H. Lessons learned from a life cycle sustainability assessment of rare earth permanent magnets. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 6, p. 1578-1590, 2017.

XIAO, X.; SONGWEN, X.; XUEYI, G.; KELONG, H.; RYOICHI, Y. LCA case study of zinc hydro and pyro-metallurgical process in China. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 3, p. 151, 2003.

YADAVA, R. N.; SINHA, B. Scoring sustainability reports using GRI 2011 guidelines for assessing environmental, economic, and social dimensions of leading public and private indian companies. **Journal of Business Ethics**, v. 138, n. 3, p. 549-558, 2016.

YANG, Z.; LIU, W.; SUN, J.; ZHANG, Y. Corporate environmental responsibility and environmental non-governmental organizations in China. **Sustainability**, v. 9, n. 10, p. 1756, 2017.

YAWAR, S. A.; SEURING, S. Management of social issues in supply chains: a literature review exploring social issues, actions and performance outcomes. **Journal of Business Ethics**, v. 141, n. 3, p. 621-643, 2017.

ZAIMES, G. G.; HUBLER, B. J.; WANG, S.; KHANNA, V. Environmental life cycle perspective on rare earth oxide production. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 3, n. 2, p. 237-244, 2015.

ZANOLETTI, A.; BILO, F.; DEPERO, L. E.; ZAPPA, D.; BONTEMPI, E. The first sustainable material designed for air particulate matter capture: An introduction to Azure Chemistry. **Journal of Environmental Management**, v. 218, p. 355-362, 2018.

ZAPP, P.; MARX, J.; SCHREIBER, A.; FRIEDRICH, B.; VOBENKAUL, D. Comparison of dysprosium production from different resources by life cycle assessment. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 130, p. 248-259, 2018.

ZHOU, B.; LI, Z.; CHEN, C.. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. **Minerals**, v. 7, n. 11, p. 203, 2017.

ZHOU, S.; LI, X.; DU, N.; PANG, Y.; CHEN, H. A multi-objective differential evolution algorithm for parallel batch processing machine scheduling considering electricity consumption cost. **Computers & Operations Research**, v. 96, p. 55-68, 2018.

APÊNDICE B– Caracterização Dos Fornecedores E Estimativas De Emissões Para Os Diferentes Transportes.

Caracterização dos Fornecedores											
Matéria Prima	Fornecedor	UF	País	RS	ISO	Distância (Km)	CO2Caminhão	Caminhão*		CO2Trem	CO2Navio
								CO2Navio	CO2Avião		
Ácido bórico (H3BO3)	Lab Synth	SP	Brasil	Não	Sim	638	0,039			0,015	
Ácido bórico (H3BO3)	Casaquímica	SP	Brasil	Não	Não	638	0,039			0,015	
Ácido bórico (H3BO3)	Quimidrol	PR	Brasil	Não	Não	1038	0,063			0,023	
Ácido bórico (H3BO3)	Química Credie	M A	Brasil	Não	Não	3982	0,241			0,110	
Ácido sulfúrico (H2SO4)	Casaquímica	SP	Brasil	Não	Não	638	0,039			0,015	
Ácido sulfúrico (H2SO4)	Sigma Aldrich	SP	Brasil	Não	Não	639	0,039			0,015	
Ácido sulfúrico (H2SO4)	Del Monte										
Gás Argônio	White Martins	M G	Brasil	Não	Sim	59,1	0,004			0,002	
Gás Argônio	Oximil	M G	Brasil	Não	Não	60,3	0,004			0,002	
Gás Argônio	Oxigas	M G	Brasil	Não	Não	62,6	0,004			0,002	
Carbonato de cálcio (CaCO3)	Mineração Terra Nova	M G	Brasil	Não	Não	259	0,016			0,006	
Carbonato de cálcio (CaCO3)	Quimisa	SP	Brasil	Não	Não	677	0,041			0,015	
Carbonato de cálcio	Serra Branca Mineração	Go	Brasil	Não	Não	921	0,056			0,021	

Caracterização dos Fornecedores											
Matéria Prima	Fornecedor	UF	País	RS	ISO	Distância (Km)	Caminhão*			Trem**	
							CO2Caminhão	CO2 Navio	CO2 Avião	CO2Trem	CO2 Navio
(CaCO3)											
Carbonato de cálcio (CaCO3)	Quimidrol	PR	Brasil	Não	Não	1038	0,063			0,023	
Carbonato de cálcio (CaCO3)	Dipa Química	PR	Brasil	Não	Não	1054	0,064			0,024	
Cloreto de níquel (NiCl2)	Electrochemical	SP	Brasil	Não	Não	610	0,037			0,014	
Cloreto de níquel (NiCl2)	Sigma Aldrich	SP	Brasil	Não	Não	639	0,039			0,015	
Cloreto de níquel (NiCl2)	Domingos Araújo Neto	CE	Brasil	Não	Não	2369	0,143			0,052	
Dídímio metálico (Nd,Pr)	LABFABITR										
Disprósio metálico (Dy)	LABFABITR										
Disprósio metálico (Dy)	LABFABITR										
Esterato de zinco	Ouro Branco	SP	Brasil	Não	Não	613	0,037			0,017	
Esterato de zinco	Quimidrol	PR	Brasil	Não	Não	1038	0,063			0,023	
FeB (Ferro-Boro)	Giro Metais	SP	Brasil	Não	Não	566	0,034			0,014	
FeB (Ferro-Boro)	Masterligas	SP	Brasil	Não	Não	635	0,038			0,015	
FeB (Ferro-Boro)	Global Powder	SP	Brasil	Não	Não	639	0,039			0,015	
Ferramenta Diamante	Techmar	SP	Brasil	Não	Não	638	0,039			0,015	
Ferramenta Diamante	WT Ferramentas	SC	Brasil	Não	Não	1180	0,071			0,026	

Caracterização dos Fornecedores											
Matéria Prima	Fornecedor	UF	País	RS	ISO	Distância (Km)	Caminhão*			Trem**	
							CO2 Caminhão	CO2 Navio	CO2 Avião	CO2 Trem	CO2 Navio
Ferro metálico (Fe)	Vale	M G	Brasil	Sim	Não	145	0,009			0,004	
Ferro metálico (Fe)	Basf	SP	Brasil	Sim	Não	644	0,039			0,015	
Ferro metálico (Fe)	Hoganas	SP	Brasil	Sim	Não	660	0,040			0,015	
Fluido de Corte*	Kation Raiden	SP	Brasil	Não	Não	638	0,039			0,015	
Fluoreto de didímio (PrNdF3)	Sigma Aldrich		EUA	Não	Não	7312		0,110	4,061		0,083
Fluoreto de didímio (PrNdF3)	American Elements		EUA	Não	Não	7312		0,110	4,061		0,083
Fluoreto de didímio (PrNdF3)	Metall		China	Não	Não	102012		1,190	56,714		1,163
Fluoreto de Lítio (LiF)	Sigma Aldrich		EUA	Não	Não	7312		0,110	4,061		0,083
Fluoreto de Lítio (LiF)	American Elements		EUA	Não	Não	7312		0,110	4,061		0,083
Fluoreto de Lítio (LiF)	Carl Roth		Alemanha	Não	Não	9426		0,134	5,236		0,107
Grafite (Ânodo)	Eutetic do Brasil	M G	Brasil	Não	Não	55,7	0,003			0,002	
Grafite (Ânodo)	Mersen do Brasil	SP	Brasil	Não	Não	632	0,038			0,015	
Grafite (Ânodo)	General Carbon Grafite Industrial	SP	Brasil	Não	Não	661	0,040			0,015	
Grafite (Ânodo)	Schunk do Brasil Eletrografite	SP	Brasil	Não	Sim	707	0,043			0,016	

Caracterização dos Fornecedores											
Matéria Prima	Fornecedor	UF	País	RS	ISO	Distância (Km)	Caminhão*			Trem**	
							CO2 Caminhão	CO2 Navio	CO2 Avião	CO2 Trem	CO2 Navio
Hidrogênio	White Martins	M G	Brasil	Não	Sim	59,1	0,004			0,002	
Hidrogênio	Oximil	M G	Brasil	Não	Não	60,3	0,004			0,002	
Hidrogênio	Oxigas	M G	Brasil	Não	Não	123	0,007			0,003	
Hidróxido de sódio (NaOH)	Merck	SP	Brasil	Não	Não	492	0,030			0,011	
Hidróxido de sódio (NaOH)	Solvay	SP	Brasil	Não	Não	631	0,038			0,014	
Hidróxido de sódio (NaOH)	Rodo Química	RS	Brasil	Não	Não	1834	0,111			0,041	
Nitrogênio	White Martins	M G	Brasil	Não	Sim	59,1	0,004			0,002	
Nitrogênio	Oximil	M G	Brasil	Não	Não	60,3	0,004			0,002	
Nitrogênio	Oxigas	M G	Brasil	Não	Não	123	0,007			0,003	
Óleo Solúvel	Quimatic	SP	Brasil	Não	Não	648	0,039			0,015	
Óleo Solúvel	Almon	RJ	Brasil	Não	Não	479	0,029			0,011	
Óxido de Didmínio	CBMM	M	Brasil	Sim	Sim	406	0,025			0,009	

Caracterização dos Fornecedores											
Matéria Prima	Fornecedor	UF	País	RS	ISO	Distância (Km)	Caminhão*			Trem**	
							CO2 Caminhão	CO2 Navio	CO2 Avião	CO2 Trem	CO2 Navio
		G									
Óxido de Didmínio	Steenkampskraal		África do Sul	Não	Não	7772		0,115	4,317		0,089
Óxido de Didmínio	Lynas Corporation Limited		Austrália	Não	Sim	15569		0,204	8,652		0,177
Óxido de Didmínio	Baotou Xinyuan		China	Não	Não	16622		0,216	9,237		0,189
Óxido de Didmínio	Molycorp Silmet		Estonia	Não	Não	102012		1,190	56,714		1,163
Plástico PP / PE*	Poliestplastic	M G	Brasil	Não	Não	55,3	0,003			0,002	
Sulfato de cobre (CuSO4)	Eletrochemical	SP	Brasil	Não	Não	610	0,037			0,014	
Sulfato de cobre (CuSO4)	SuperQuímica	SP	Brasil	Não	Não	612	0,037			0,014	
Sulfato de cobre (CuSO4)	Resimapi	SP	Brasil	Não	Sim	617	0,037			0,014	
Sulfato de cobre (CuSO4)	Sigma Aldrich	SP	Brasil	Não	Não	639	0,039			0,015	
Sulfato de níquel (NiSO4)	Eletrochemical	SP	Brasil	Não	Não	610	0,037			0,014	
Sulfato de níquel (NiSO4)	Resimapi	SP	Brasil	Não	Sim	617	0,037			0,014	
Sulfato de níquel (NiSO4)	Atotech	SP	Brasil	Não	Não	656	0,040			0,016	

Para os nacionais o transporte considerado foi o caminhão

Para os internacionais foi considerado a distância entre o porto ou aeroporto até a sede LABFABITR como transporte caminhão

*Distância do Aeroporto/Porto ao LABFABITR considerado o transporte caminhão

** Distância do Porto ao LABFABITR considerando transporte ferroviário. A distância da linha ferroviária ao LABFABITR (9km) considerado transporte por caminhão