

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

AKIO FERNANDO MATSUURA MOTOKI  
BRUNA PAULA SOBREIRO

Análise de sensibilidade para cenários de utilização de energias renováveis na  
Avaliação do Ciclo de Vida do nióbio

São Carlos  
2022



AKIO FERNANDO MATSUURA MOTOKI  
BRUNA PAULA SOBREIRO

Análise de sensibilidade para cenários de utilização de energias renováveis na  
Avaliação do Ciclo de Vida do nióbio

Monografia apresentada ao curso de  
Engenharia Ambiental, da Escola de  
Engenharia de São Carlos da Universidade  
de São Paulo, como parte dos requisitos  
para obtenção do título de Engenheiro  
Ambiental.

Orientador: Prof. Aldo Roberto Ometto

São Carlos

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M917c Motoki, Akio Fernando Matsuura

Análise de sensibilidade para cenários de utilização de energias renováveis na avaliação do ciclo de vida do nióbio / Akio Fernando Matsuura Motoki, Bruna Paula Sobreiro; orientador Alberto Roberto Ometto -- São Carlos, 2022.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. Avaliação do ciclo de vida. 2. Nióbio. 3. Energias renováveis. 4. Economia circular. 5. Indicadores de circularidade. I. Motoki, Akio Fernando Matsuura. II. Sobreiro, Bruna Paula. III. Título.



# FOLHA DE JULGAMENTO

---

Candidato(a): **Akio Fernando Matsuura Motoki e Bruna Paula Sobreiro**

Data da Defesa: 20/06/2022

Comissão Julgadora:

Resultado:

**Aldo Roberto Ometto (Orientador(a))**

Aprovados

---

**Cinthia Rubio Urbano da Silva**

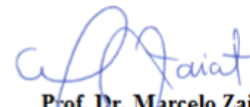
Aprovados

---

**Diego Rodrigues Iritani**

Aprovados

---



**Prof. Dr. Marcelo Zaiat**

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

## RESUMO

SOBREIRO, B. P; MOTOKI, A. F. M. **Análise de sensibilidade para cenários de utilização de energias renováveis na avaliação do ciclo de vida do nióbio.** 2022. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

Na atual conjuntura do aumento da demanda por produtos e maior exploração de recursos naturais, é imprescindível o estudo de modelos que visem o desenvolvimento sustentável e a transição da economia linear para a circular. Esta tem como objetivo principal fechar ciclos de fluxos de recursos, sendo que, atualmente, existem alguns indicadores capazes de mensurar a circularidade de produtos. Uma das técnicas existentes que visa estimar e comparar impactos ambientais provenientes da produção de bens materiais e serviços é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Dentre os produtos considerados críticos e importantes de serem estudados, encontra-se o nióbio (Nb). O uso do metal tem aumentado e tem sido amplamente aplicado na engenharia moderna, uma vez que possui versatilidade e diversas vantagens econômicas. Outro fato importante são as fontes energéticas, uma vez que é incerta a disponibilidade de fontes não renováveis no futuro e sendo de extrema importância avaliar os impactos que elas exercem no meio ambiente. Desta forma, o estudo em questão tem como objetivo avaliar o ciclo de vida do nióbio e comparar impactos ambientais causados pela fonte energética utilizada na cadeia de produção do metal, além de classificar indicadores de circularidade com relação à contemplação do uso de energias renováveis dentro de seus parâmetros. Nesse relatório constam as fases de definição de objetivo e escopo da ACV, Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e interpretação, que foram realizadas seguindo as normas da ABNT 14040 e 14044 durante todo o estudo. Durante a fase de AICV foram desenvolvidos cenários, sendo que um deles continha apenas fontes renováveis e o outro fontes não renováveis. A partir disso, pode-se concluir que o processo de produção do nióbio apresenta como principal etapa crítica a fase de produção de óxido de nióbio, apresentando melhoria de impacto com o uso de fontes de energia renováveis nas categorias Mudanças climáticas, Toxicidade humana, Ecotoxicidade e Acidificação. Além disso, foi realizado um levantamento de 30 indicadores de circularidade do nível micro existentes na literatura, os quais foram classificados quanto à abordagem de energias renováveis dentre seus critérios. Dos analisados, apenas seis indicadores consideram as fontes de energia renováveis, representando 20% dos mesmos e demonstrando a importância de aperfeiçoar e desenvolver novos indicadores.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida. Nióbio. Energias renováveis. Economia circular. Indicadores de circularidade.

## ABSTRACT

SOBREIRO, B. P; MOTOKI, A. F. M. **Sensitivity analysis of niobium life cycle assessment using renewable energy scenarios**. 2022. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

In the current context of increased demand for products and greater exploitation of natural resources, it is essential to study models aimed at sustainable development and the transition from a linear to a circular economy. Its main objective is to close cycles of resource flows, and currently there are some indicators capable of measuring the circularity of products. One of the existing techniques that aims to estimate and compare environmental impacts from the production of material goods and services is the Life Cycle Assessment (LCA). Among the products considered critical and important to be studied, there is niobium (Nb). The use of this metal has increased and it has been widely applied in modern engineering, since it has versatility and several economic advantages. Another important fact is energy sources, since the availability of non-renewable sources in the future is uncertain and it is extremely important to assess the impacts they have on the environment. Therefore, the study in question aims to evaluate the life cycle of niobium and compare environmental impacts caused by the energy source used in the metal production chain, in addition to classifying circularity indicators in relation to the contemplation of the use of renewable energies within its parameters. This report includes the phases of defining the purpose and scope of the LCA, Life Cycle Inventory (LCI), Life Cycle Impact Assessment (LCA) and interpretation, which were carried out following the ABNT 14040 and 14044 standards during the entire study. During the LCI phase, scenarios were developed, one of which contained only renewable sources and the other non-renewable sources. From this, it can be concluded that the niobium production process presents the niobium oxide production phase as the main critical step, presenting an improvement on impact with the use of renewable energy sources in the categories Climate Change, Human Toxicity, Ecotoxicity and Acidification. In addition, a survey of 30 micro level circularity indicators existing in the literature was carried out, which were classified according to the renewable energy approach among their criteria. Of those analyzed, only six indicators consider renewable energy sources, representing 20% of them and demonstrating the importance of improving and developing new indicators.

**Keywords:** Life Cycle Assessment. Niobium. Renewable energy. Circular Economy. Circularity Indicators.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 – Fases da ACV.....                                                                                                    | 14  |
| Figura 2 – Exemplo de combinação do modelo midpoint-endpoint para mudanças climáticas.....                                      | 17  |
| Figura 3 – Consumo global de energia primária por fonte entre 1800 e 2019.....                                                  | 18  |
| Figura 4 - Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil.....                                                          | 19  |
| Figura 5 - Impacto relativo da geração de energia no Brasil em termos de Potencial de Aquecimento Global entre 2016 e 2026..... | 23  |
| Figura 6 - Processo de produção do nióbio .....                                                                                 | 25  |
| Figura 7 - Diagrama borboleta.....                                                                                              | 27  |
| Figura 8 - Sistema de produto .....                                                                                             | 32  |
| Figura 9 - Cenário 1.....                                                                                                       | 47  |
| Figura 10 - Cenário 2.....                                                                                                      | 477 |
| Figura 11 - Impactos de mudanças climáticas nos cenários 1 e 2 .....                                                            | 50  |
| Figura 12 - Impactos de toxicidade humana nos cenários 1 e 2 .....                                                              | 50  |
| Figura 13 - Impactos de ecotoxicidade nos cenários 1 e 2 .....                                                                  | 51  |
| Figura 14 - Impactos de acidificação nos cenários 1 e 2 .....                                                                   | 51  |
| Figura 15 - Impactos de enriquecimento de nutrientes nos cenários 1 e 2.....                                                    | 52  |
| Figura 16 - Impactos de formação de ozônio nos cenários 1 e 2.....                                                              | 52  |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Comparativo de impactos endpoint entre fontes de geração de energia .....                                                                                                      | 21 |
| Tabela 2 - Emissão de dióxido de carbono para cada tipo de sistema de geração de energia (g.C/kWh).....                                                                                   | 22 |
| Tabela 3 - Abrangência de aplicação no Brasil de categorias de impacto dos principais métodos de AICV existentes (Legenda: (✓) - aplicável no Brasil; (✗)- não aplicável no Brasil) ..... | 33 |
| Tabela 4 – Categorias de impacto e métodos utilizados na fase de AICV .....                                                                                                               | 39 |
| Tabela 5 – Inventário do ciclo de vida de uma tonelada de óxido de nióbio .....                                                                                                           | 43 |
| Tabela 6 - Inventário do ciclo de vida de uma tonelada de ferronióbio .....                                                                                                               | 46 |
| Tabela 7 - Valores absolutos dos impactos de cada processo para as categorias de impacto analisadas.....                                                                                  | 49 |
| Tabela 8 - Análise dos indicadores no nível micro encontrados na literatura (Legenda: (✓) – considera as fontes de energia renováveis dentre os critérios) .....                          | 55 |

## SUMÁRIO

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                                               | 11 |
| 2. OBJETIVOS.....                                                | 13 |
| 2.1. Objetivo geral .....                                        | 13 |
| 2.2. Objetivo específico .....                                   | 13 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                    | 13 |
| 3.1. Avaliação do Ciclo de Vida .....                            | 13 |
| 3.2. Metodologias de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida ..... | 15 |
| 3.3. Recursos energéticos.....                                   | 17 |
| 3.4. Avaliação do Ciclo de Vida de fontes de energia .....       | 20 |
| 3.5. Nióbio .....                                                | 23 |
| 3.6. Economia circular .....                                     | 26 |
| 3.7. Indicadores de circularidade .....                          | 28 |
| 4. MÉTODO DE PESQUISA.....                                       | 29 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                  | 31 |
| 5.1. Avaliação do Ciclo de Vida .....                            | 31 |
| 5.1.1. Definição de objetivo e escopo.....                       | 31 |
| 5.1.2. Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) .....        | 43 |
| 5.1.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) .....        | 46 |
| 5.1.4. Interpretação .....                                       | 53 |
| 5.2. Indicadores de circularidade .....                          | 54 |
| 6. CONCLUSÃO.....                                                | 58 |
| REFERÊNCIA .....                                                 | 59 |



## 1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por produtos e o aumento do consumo, há cada vez mais a necessidade do crescimento e aprimoramento de técnicas que visem o desenvolvimento sustentável e a transição da economia linear para a circular. Essas ferramentas devem ser capazes de mensurar e comparar os impactos ambientais provenientes da produção de bens materiais e serviços, como as emissões atmosféricas, mudanças climáticas, poluição hídrica e terrestre, eutrofização, acidificação, além de aspectos relacionados à saúde humana e aos recursos naturais (REBITZER et al., 2004).

Uma das técnicas para quantificar e comparar impactos ambientais é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV focaliza os aspectos e impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento, reciclagem e disposição final (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2009a).

O estudo em questão visa realizar uma Avaliação do Ciclo de Vida do nióbio, que é um sólido metálico com elevado ponto de fusão e extremamente resistente à corrosão, sendo o mesmo utilizado principalmente na forma de ferronióbio, visando o aumento da resistência do aço (COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO, 2018; SOUSA; FERNANDES; GUERRA, 2012).

É importante ressaltar que o Brasil possui as maiores reservas de nióbio do mundo, além de ser também o maior produtor, possuindo cerca de 88% de toda a produção mundial (U.S.GEOLOGICAL SURVEY - USGS, 2022). Enquanto isso, muitos países são grandes importadores do metal, como a China, Holanda, Coreia do Sul e Singapura (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM, 2022).

Sendo assim, é possível justificar a necessidade de um estudo sobre o nióbio evidenciando o fato de que o mesmo é um material crítico para diversos países, que utilizam o nióbio em grande quantidade, porém dependem totalmente da importação desse minério; e é um material estratégico para o Brasil, que possui uma grande reserva e produção.

Há cada vez mais a necessidade, também, de se preocupar com os recursos utilizados durante a cadeia de produção, incluindo os que são utilizados como matéria-prima e os energéticos (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018). Na Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), que é a maior produtora de Nióbio do mundo, 73% da energia

consumida e 100% da energia elétrica utilizada são provenientes de fontes renováveis, sendo as hidrelétricas as principais fontes (CBMM, 2020).

Nesse sentido, esse estudo tem como intuito auxiliar na modelagem do cenário desse minério, buscando quantificar seus impactos ambientais e relacioná-los com as fontes energéticas utilizadas no processo de produção, realizando uma análise de sensibilidade a partir de cenários durante a ACV.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar o ciclo de vida do nióbio (Nb) e realizar uma análise de sensibilidade, comparando impactos ambientais em diferentes cenários de utilização de energia renovável e não renovável na cadeia de produção do metal e propondo sugestões de melhorias ambientais para o ciclo de vida do produto.

### **2.2. Objetivo específico**

- Quantificar os aspectos ambientais do ciclo de vida do nióbio;
- Avaliar o impacto ambiental do nióbio ao longo de seu ciclo de vida;
- Identificar as etapas críticas do processo (hotspots);
- Realizar uma análise de sensibilidade a partir de projeções utilizando diferentes cenários energéticos, tendo como base fontes renováveis e não renováveis;
- Verificar se os indicadores de circularidade existentes na literatura contemplam a utilização de energias renováveis dentre suas variáveis.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1. Avaliação do Ciclo de Vida**

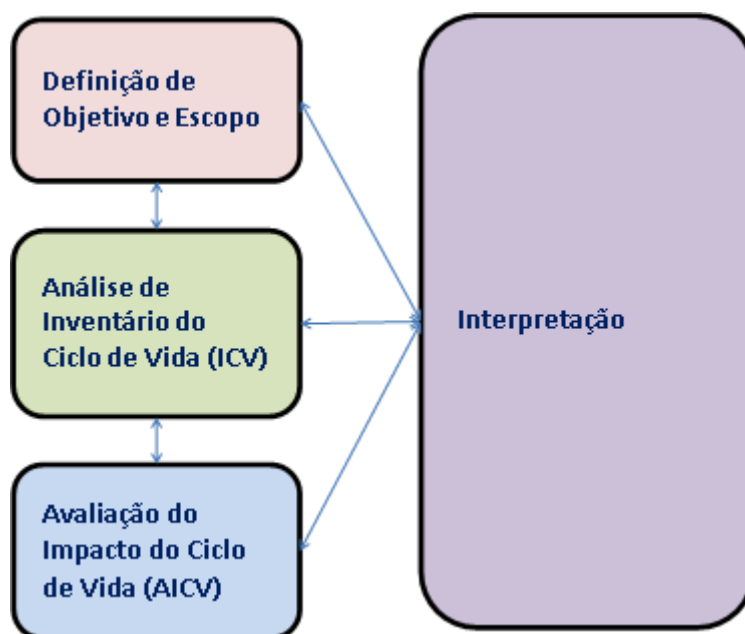
Uma das técnicas existentes que visa quantificar os impactos ambientais e desenvolver métodos para lidar melhor com os mesmos é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV focaliza os aspectos e impactos ambientais potenciais ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição das matérias-primas, produção, uso, tratamento, reciclagem e disposição final (ABNT, 2009a).

A Avaliação do Ciclo de Vida tem como objetivo estimar e avaliar os impactos ambientais potenciais durante todo o ciclo de vida do produto, como mudanças climáticas, depleção do ozônio estratosférico, criação de ozônio troposférico, eutrofização, acidificação, toxicidade humana, ecotoxicidade, depleção de recursos, uso da água, do solo, ruídos, entre outros (REBITZER et al., 2004).

A ACV tem como algumas de suas funções auxiliar: no conhecimento sobre as viabilidades de melhorias ambientais do produto; no nível das informações das indústrias e organizações, a fim de influenciar nas decisões tomadas visando pareceres mais ambientalmente corretos; na seleção de indicadores significativos e até mesmo no marketing de um produto (ABNT, 2009a, 2009b).

Um estudo da Avaliação do Ciclo de Vida é baseado em quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação, vide (ABNT, 2009a).

Figura 1 – Fases da ACV



Fonte: adaptado de ABNT (2009a).

Em síntese, a fase de definição de objetivo e escopo inclui as razões para a realização do estudo, a aplicação pretendida e o público-alvo (FINNVEDEN et al., 2009). É também o local em que são descritos o sistema de produto, as funções e fronteira desse sistema, a unidade funcional, os procedimentos de alocação, o método de avaliação de impacto, as categorias de impacto selecionadas, a interpretação a ser empregue subsequentemente, os requisitos de dados, pressupostos, limitações, requisitos iniciais quanto à qualidade dos dados, além do tipo e formato do relatório requerido para o estudo (ABNT, 2009a, 2009b).

Um importante conceito para o desenvolvimento de uma ACV é a definição de unidade funcional, que é a medida quantitativa das funções que os bens materiais ou serviços fornecem (FINNVEDEN et al., 2009).

A fase de análise de inventário de ciclo de vida (ICV) é a etapa em que ocorre a coleta de dados e a quantificação de entradas e saídas do sistema de produto, compilando as informações para cada processo no ciclo de vida e resumindo-os em todo o sistema, incluindo as emissões e recursos utilizados (ABNT, 2009a, 2009b; HELLWEG; LLORENÇ MILÀ I, 2014). Na fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), emissões e recursos são agrupados de acordo com suas categorias de impacto e convertidos para unidades de impacto comuns, tornando possíveis comparações (HELLWEG; MILA I CANALS, 2014).

Já na fase final, é realizada a interpretação dos resultados do inventário e da avaliação de impactos, com o intuito de atender aos objetivos do estudo (HELLWEG; MILA I CANALS, 2014). Na fase de interpretação, a análise de sensibilidade é utilizada como um procedimento para determinar como mudanças nos dados e nas escolhas metodológicas afetam os resultados da AICV, buscando determinar a influência das alterações sobre os resultados. É um procedimento que consiste em uma comparação entre os resultados obtidos com a utilização de determinados pressupostos, métodos ou dados com os resultados obtidos utilizando pressupostos, métodos ou dados alterados (ABNT, 2009b).

Finalmente, é possível, através das conclusões obtidas, identificar pontos críticos, que necessitam de melhorias e inovações, visando a preservação ambiental (PIEKARSKI et al., 2012). É importante ressaltar também que, apesar de a ACV ser uma técnica de ampla importância e abrangência, seus resultados podem apresentar incertezas significativas, uma vez que grande parte das medidas são simuladas e simplificadas a partir de sistemas ambientais complexos (HELLWEG; LLORENÇ MILÀ I, 2014).

### **3.2. Metodologias de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida**

A fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é realizada através da associação do inventário do ciclo de vida (ICV) a categorias de impacto selecionadas. Essa etapa pode ser auxiliada por diversos métodos de avaliação, como Eco-Indicator 99,

CML 2001, EDIP 2003, Impact 2002+, ReCiPe 2008, entre outros (PIEKARSKI et al., 2012).

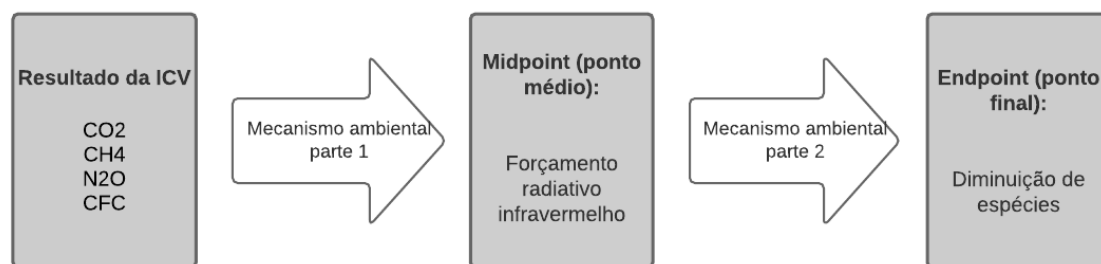
Esses métodos podem abranger diversas categorias de impactos, proporcionando caracterizações individuais (HAUSCHILD et al., 2012). Além disso, nessa etapa, os impactos de cada fluxo são determinados com base em uma modelagem quantitativa baseada em um modelo de caracterização, que realiza cálculos utilizando dados do inventário, tendo como resultado os resultados da categoria de indicadores, com unidade comum a todos os fluxos que contribuem dentro da categoria de impacto (PIEKARSKI et al., 2012).

Os modelos de caracterização citados anteriormente são conhecidos como métodos para AICV. Podem ser classificados como midpoint (ponto médio) e endpoint (ponto final), de acordo com sua abordagem (PIEKARSKI et al., 2012).

As categorias de impacto midpoint são conhecidas como variáveis intermediárias dos mecanismos ambientais de uma categoria de impacto, que se situam entre as intervenções ambientais e as categorias endpoint (FURTADO, 2014). Além disso, a abordagem midpoint apresenta papel prioritário no desenvolvimento de vários dos métodos para AICV, como TRACI, CML, EDIP97 & 2003 e Impact 2002+. Exemplos de categorias midpoints abrangem: mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, entre outros (BARE; GLORIA, 2008).

Já as categorias endpoint consistem na caracterização da severidade ou consequência das categorias de impacto midpoint em relação às áreas de proteção em nível final, como saúde humana, meio ambiente e recursos naturais. O modelo endpoint necessita de uma modelagem de todos os mecanismos ambientais, conectando o inventário com seu respectivo impacto nas áreas de proteção, apresentando-se como um método AICV orientado a danos (CAVALETT et al., 2013). Exemplos de categorias endpoint envolvem o uso de recursos minerais, recursos energéticos, combustíveis fósseis e ocupação do solo (BARE; GLORIA, 2008).

Figura 2 – Exemplo de combinação do modelo midpoint-endpoint para mudanças climáticas



Fonte: adaptado de Goedkoop et al. (2009).

É importante destacar que os métodos para AICV existentes levam em consideração aspectos e impactos das regiões onde foram desenvolvidos. Nenhum dos mesmos foi desenvolvido no Brasil e, portanto, nenhuma metodologia atende completamente às especificidades brasileiras (SILVA, 2012).

### 3.3. Recursos energéticos

O rápido crescimento da população mundial resultou em um aumento da demanda por energia e serviços associados, necessários para o desenvolvimento social e econômico. Nesse cenário, os combustíveis fósseis ainda são os principais contribuintes para o setor energético, mesmo ocasionando graves problemas ambientais e de saúde, através por exemplo da liberação de gases de efeito estufa, como metano, dióxido de carbono e óxido de nitrogênio, em grande quantidade durante o processo de combustão (OLABI; ABDELKAREEM, 2022).

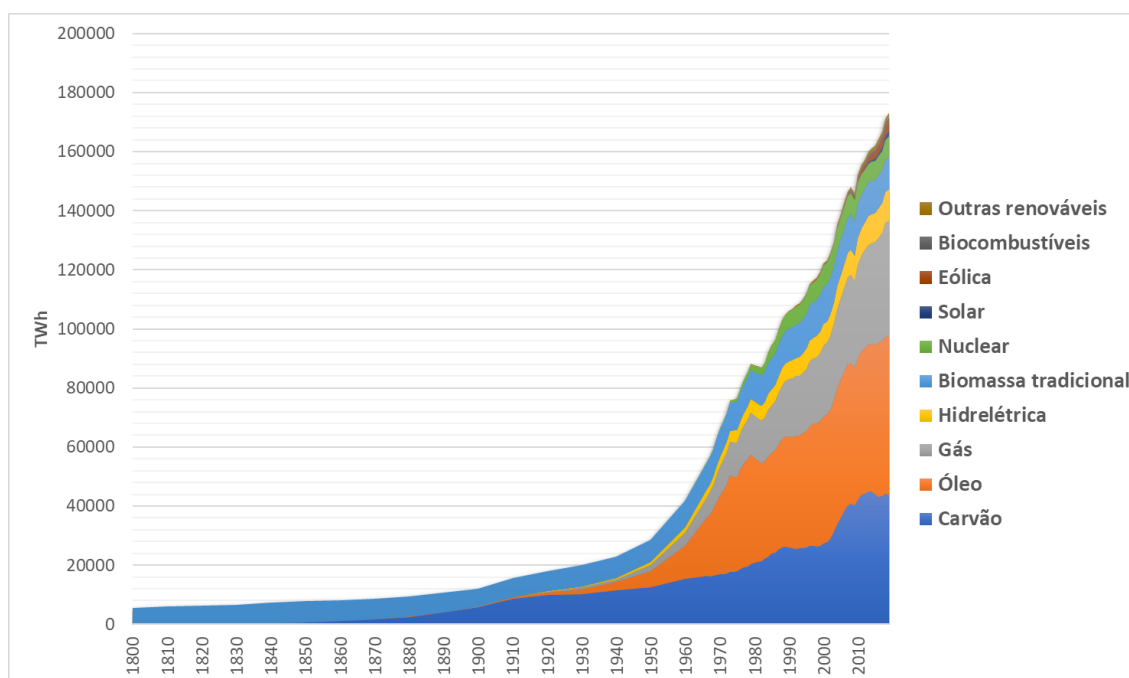
É esperado que as emissões de GEE aumentem ao longo do tempo, devido à rápida taxa de crescimento urbano e industrial. A liberação destes gases irá, cada vez mais, resultar em mudanças climáticas, aumento do nível dos oceanos, mudanças em ecossistemas, entre outros diversos problemas, representando também ameaças para os seres humanos (OLABI; ABDELKAREEM, 2022).

O aumento observado nas emissões de dióxido de carbono relacionadas às atividades antropogênicas é a principal causa do aquecimento global (FRANZEN; MADER, 2021). Ademais, é incerta a disponibilidade de fontes energéticas a longo prazo, devido principalmente ao uso de fontes não renováveis e à exploração em larga escala dos recursos naturais (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018). Com base nisso, os países têm

buscado implementar ações para evitar esses críticos cenários, revisando estratégias e políticas energéticas (OLABI; ABDELKAREEM, 2022).

Em âmbito global, embora fontes energéticas provenientes de combustíveis fósseis representem mais de 80% do consumo primário mundial de energia, pode-se observar uma mudança evidente no consumo de fontes de energia, em que é perceptível um elevado crescimento de fontes renováveis (OUR WORLD IN DATA, 2020).

Figura 3 – Consumo global de energia primária por fonte entre 1800 e 2019



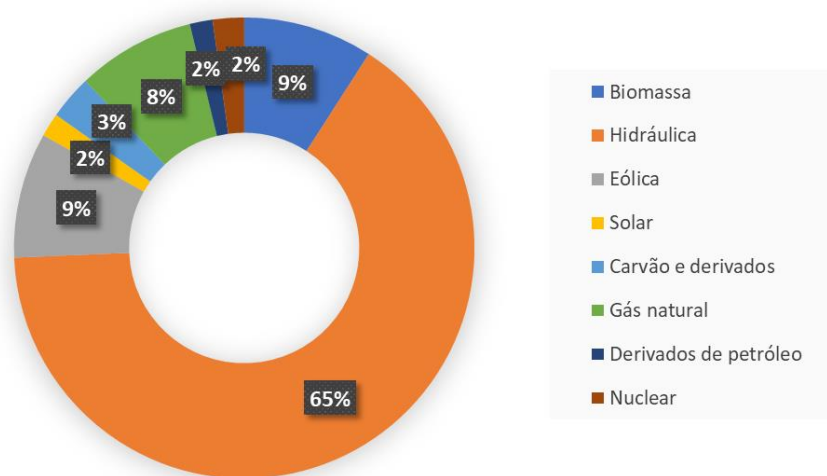
Fonte: adaptado de Our World in Data (2020).

O setor de energia mudou significativamente, principalmente devido ao aumento inesperado nos investimentos no mercado de energia renovável e novas capacidades tecnológicas. Consequentemente, assistimos o desenvolvimento de fontes não convencionais e desenvolvimentos tecnológicos para a exploração de todas as formas de energia (WEC, 2016).

A maioria dos países está buscando alcançar uma maior diversificação de sua matriz energética, com crescimento no setor de microprodução de energia privada e desenvolvimento no sistema de geração descentralizada. Entretanto, apesar de alguns progressos notáveis, as taxas de crescimento da energia mais limpa ainda são mais lentas que o necessário para atender às metas de emissões (WORLD ENERGY COUNCIL (WEC), 2016).

Um dos fundamentos da sustentabilidade econômica de um país é a sua capacidade de atender às demandas de energia para o desenvolvimento de sua produção, com segurança e condições ambientalmente sustentáveis. No caso do Brasil, o país tem conseguido atender às necessidades na área energética, sendo muitas vezes citado como referência na produção de petróleo, etanol, geração hidrelétrica e eólica (TOLMASQUIM, 2012).

Figura 4 - Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil



Fonte: adaptado de Brasil (2021).

É possível observar que o Brasil possui uma matriz de energia predominantemente renovável, com a principal fonte sendo a hidráulica, correspondendo a 65,2% da oferta interna. As fontes renováveis somadas representam 84,8% da oferta de eletricidade, sendo majoritárias na oferta do país (BRASIL, 2021).

O consumo final de energia apresentou uma redução de -1,0% em 2020, quando comparado com o ano de 2019, com destaque para os setores industrial e residencial, principalmente por impactos na economia devido à pandemia (BRASIL, 2021).

Para as próximas décadas, questões relacionadas à sustentabilidade energética se apresentam para o Brasil ao mesmo tempo como um desafio e uma oportunidade. Desafio, uma vez que o desenvolvimento econômico e social vai exigir uma maior quantidade de energia, além de eficiência e segurança. Oportunidade, porque o país possui recursos energéticos renováveis e tecnologias suficientes para conseguir suprir a demanda de

energia, diversificar cada vez mais a matriz energética, além de mitigar impactos causados pela geração, distribuição e consumo de energia, principalmente provenientes de combustíveis fósseis (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018).

### **3.4. Avaliação do Ciclo de Vida de fontes de energia**

A Avaliação do Ciclo de Vida pode contribuir com a metrificação de potenciais impactos ambientais de diferentes fontes e tecnologias de geração de energia elétrica. De acordo com a revisão de literatura de Barros et al. (2020), mudanças climáticas foi a categoria de impacto mais abordada nos estudos de Avaliação do ciclo de vida da geração de energia elétrica de 2013 a 2018 em âmbito mundial, sendo que a energia eólica e solar apresentaram o menor índice de impacto nesta categoria. As demais categorias de impacto abordadas com maior frequência nos estudos de ciclo de vida de geração de energia elétrica foram: potencial de toxicidade humana, acidificação, destruição da camada de ozônio e eutrofização (BARROS et al., 2020).

Ainda de acordo com a revisão de literatura de Barros et al. (2020), os estudos focaram principalmente na utilização de modelos *midpoint* em detrimento de *endpoint*, além disso, foram utilizadas as ferramentas SimaPro, GaBi, GEMIS, Umberto, EASETECH Energy e ECO-it, sendo que SimaPro e Gabi apareceram em cerca de um terço dos 38 estudos levantados. Por fim, também destacou que a norma ISO foi mencionada em cerca de 65% dos estudos e 73% destes utilizaram 1 kWh como unidade funcional.

Considerando o modelo *endpoint*, Mahmud et al. (2020) comparou os impactos de diferentes fontes de geração de energia, onde a energia solar apresentou menor potencial de dano em relação à saúde humana, qualidade do ecossistema e uso de recursos. Já adotando o modelo *midpoint*, comparou os impactos das mesmas fontes de energia em relação à destruição da camada de ozônio, aquecimento global, formação de fumaça, acidificação, eutrofização, carcinogênicos, não-cancerígenos, efeitos respiratórios, ecotoxicidade e esgotamento de combustíveis fósseis.

Tabela 1 - Comparativo de impactos endpoint entre fontes de geração de energia

| <b>Categoria de dano</b> | <b>Fotovoltaica</b> | <b>Hidráulica</b> | <b>Biomassa</b> | <b>Hulha</b> | <b>Gás natural</b> | <b>Nuclear</b> | <b>Unidade de medida</b>                                                                 |
|--------------------------|---------------------|-------------------|-----------------|--------------|--------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Saúde humana             | 6.58E-12            | 6.83E-07          | 1.45E-07        | 9.85E-07     | 5.58E-07           | 1.25E-08       | DALY<br>(ano de vida ajustado por incapacidade)                                          |
| Qualidade do ecossistema | 3.44E-07            | 1.91E-02          | 4.74E-03        | 2.61E-02     | 9.98E-03           | 7.47E-04       | PDF*m2yr<br>(potencial de desaparecimento de uma fração de espécies em determinada área) |
| Recursos                 | 3.61E-13            | 2.18E-07          | 2.68E-03        | 9.81E-01     | 1.01               | 5.58E-09       | MJ excedente                                                                             |

Fonte: adaptado de Mahmud et al. (2020).

Ainda de acordo com o estudo de Mahmud et al. (2020), dados de emissão de gases de efeito estufa de usinas de energia renovável apresentam um grau de incerteza devido a variabilidade nas tecnologias de combustão adotadas. Outros aspectos que geram incerteza nos dados de impacto dessa fonte de energia são os diferentes metais utilizados na construção das plantas e a tecnologia de refrigeração adotada.

Por meio da Avaliação do Ciclo de Vida, Uchiyama (2006) comparou a taxa de emissão de dióxido de carbono por kWh entre diferentes fontes de geração de energia, onde a taxa de emissão da geração hidrelétrica chega a ser aproximadamente 56 vezes menor se comparado a geração por carvão.

Tabela 2 - Emissão de dióxido de carbono para cada tipo de sistema de geração de energia  
(g.C/kWh)

| Sistema de geração de energia | Fabricação de instalações | Manutenção | Combustão | Emissão de metano | Total  |
|-------------------------------|---------------------------|------------|-----------|-------------------|--------|
| Carvão                        | 1,09                      | 9,78       | 246,33    | 12,69             | 269,89 |
| Óleo                          | 0,62                      | 7,21       | 188,41    | 3,10              | 200,06 |
| Gás natural                   | 0,55                      | 24,10      | 137,27    | 16,05             | 177,67 |
| Nuclear                       | 1,00                      | 4,46       | -         | 0,24              | 5,70   |
| Hidráulica                    | 4,63                      | 0,07       | -         | 0,11              | 4,81   |
| Geotérmica                    | 1,39                      | 4,63       | -         | 0,27              | 6,29   |
| Eólica                        | 6,73                      | 2,41       | -         | 0,37              | 9,51   |
| Fotovoltaica (domiciliar)     | 11,91                     | 3,57       | -         | 0,53              | 16,01  |
| Fotovoltaica (no chão)        | 26,24                     | 6,82       | -         | 1,25              | 34,31  |

Fonte: adaptado de Uchiyama (2006).

As fontes de energia renováveis apresentam-se como o método mais acessível para substituição do uso de combustíveis fósseis (OLABI; ABDELKAREEM, 2022). De acordo com Barros, Piekarsi e De Francisco (2018), que utilizaram a Avaliação do Ciclo de Vida para avaliar o sistema de geração de energia elétrica no Brasil, existe um grande potencial de utilização de energia eólica e solar no país, tendo em vista que existem regiões com alto índice de ventos e radiação solar. Ainda de acordo com o estudo, entre 2018 e 2024 haverá um acréscimo na capacidade instalada de fontes de energia renováveis de 55,7% no território brasileiro. Considerando o período de 2016 a 2026, também estimaram o impacto relativo de diferentes fontes de energia na matriz brasileira, em termos de potencial de aquecimento global.

Figura 5 - Impacto relativo da geração de energia no Brasil em termos de Potencial de Aquecimento Global entre 2016 e 2026



Fonte: adaptado de Barros, Piekarsi e De Francisco (2018).

A revisão de Barros et al. (2020) levanta que ainda há espaço para novos estudos na área, avaliando o custo-benefício entre a construção de novos complexos de geração de energia renovável, como eólica e solar, e a manutenção de geração de energia por fontes não renováveis.

O esforço de cientistas em divulgar informações sobre mudanças climáticas, sobretudo as causas do fenômeno para a população em geral, pode estimular políticas públicas de mitigação (SHI et al., 2016). Nesse sentido, estudos de Avaliação do Ciclo de Vida podem ser consideradas uma importante ferramenta para subsidiar a tomada de decisões em relação às mudanças climáticas, como na produção mais limpa de energia (BARROS et al., 2020).

### 3.5. Nióbio

O nióbio (Nb) é um sólido metálico de número atômico 41, com densidade 8,57 g cm<sup>-3</sup>, com elevado ponto de fusão e extremamente resistente à corrosão. O metal, que não é encontrado em abundância no planeta, é encontrado na forma de minerais e não em sua forma elementar (SOUSA; FERNANDES; GUERRA, 2013).

O nióbio possui diversas aplicações e pode ser utilizado tanto em sua forma metálica, como na forma de ferronióbio, de óxido ou em ligas de grau vácuo. O uso do metal tem aumentado aceleradamente e o mesmo tem sido amplamente aplicado na engenharia moderna, uma vez que possui versatilidade, vantagens econômicas e disponibilidade de suprimento a longo prazo (BRASIL, 2010).

Menos de 2% de todo o nióbio é utilizado sob a forma metálica, sendo o mesmo aplicado na indústria química devido a suas características resistentes à corrosão. Além disso, também é utilizado como material supercondutor, se destacando por sua importância em alguns equipamentos médicos de ressonância magnética e em cavidades de microondas em aceleradores de partículas de alta energia (CBMM, 2018).

A principal aplicação do metal é na forma de ferronióbio, que é empregado como elemento de liga, objetivando o aumento da resistência do aço, sem comprometer sua maleabilidade. Esse aço é utilizado para a construção de automóveis, oleodutos, gasodutos e outras estruturas (CBMM, 2018).

O óxido de nióbio é utilizado, principalmente, na fabricação de lentes ópticas, materiais eletrocerâmicos, baterias e catalisadores químicos. Já as ligas de nióbio de grau vácuo são empregadas na fabricação de superligas, que são utilizadas na fabricação de motores de aeronaves e turbinas terrestres de geração de energia elétrica (CBMM, 2018).

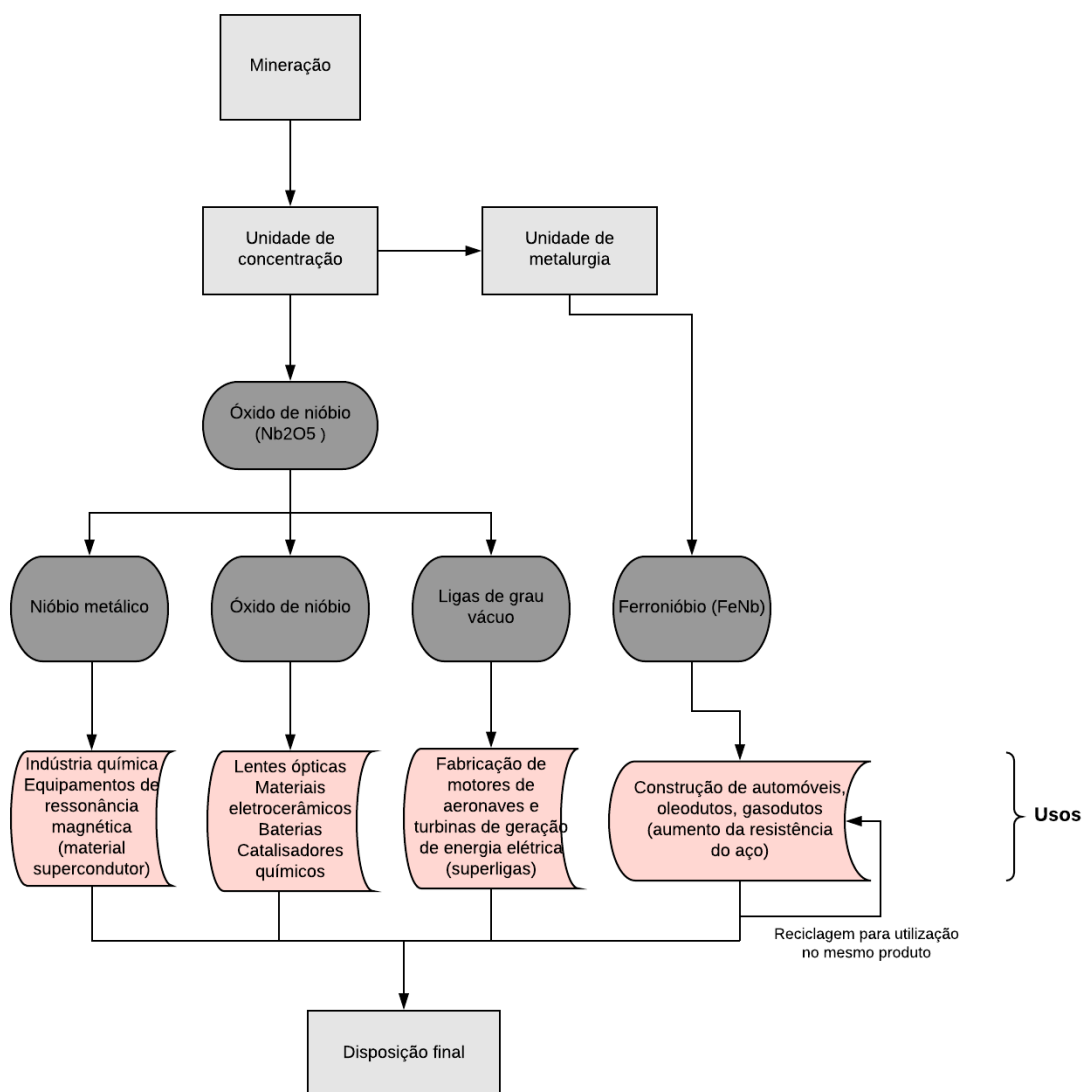
Depois do uso de produtos que contêm nióbio, os mesmos geralmente podem ser reciclados ou descartados. Comparando com o fim de vida de outros produtos, o nióbio apresenta um uso pós-descarte baixo, sendo o mesmo limitado à mesma área de aplicação inicial (KREKHOVETCKII, 2018).

O Brasil se destaca por possuir as maiores reservas de nióbio do mundo. É também o maior produtor mundial, representando aproximadamente 88% da produção global, seguido pelo Canadá com cerca de 10% (USGS, 2022). Em 2021, a exportação de minério de nióbio representou 0,3% do faturamento do setor de mineração no Brasil, com um montante de cerca de 2 bilhões de dólares. Além disso, entre 2020 e 2021, houve um aumento de aproximadamente 39,2% no faturamento e de 29,8% na produção de nióbio a nível nacional (IBRAM, 2022).

Os principais importadores da liga Fe-Nb em 2021 foram a China, Holanda, Coreia do Sul e Singapura, com participação de 35,4%, 23,1%, 9,6% e 9% do valor total, respectivamente (IBRAM, 2022). No Brasil, as principais empresas produtoras de nióbio e seus produtos são a CBMM e a Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais – CODEMIG (DIÁLOGOS SETORIAIS UE-BRASIL, 2020).

No trabalho em questão, iremos abordar os processos de produção da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (Figura 6).

Figura 6 - Processo de produção do nióbio



Fonte: Elaboração própria.

A mina de pirocloro da CBMM localiza-se no complexo do barreiro, estando circundada por uma cobertura laterítica, composta por elementos como apatita e barita (PEREIRA JÚNIOR, 2012). A lavra é realizada a céu aberto, em bancadas de 10 metros de altura, sem necessidade do uso de explosivos na operação, uma vez que o minério e o estéril são muito friáveis e de fácil desmonte (CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL, 1989).

A partir disso, caminhões transportam o minério da frente da lavra até a estação de alimentação da correia transportadora, que por sua vez, leva o minério até a unidade de concentração (CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL, 1989). Na unidade de concentração, o minério já se encontra desagregado, não sendo necessária a britagem, salvo para pequenos blocos. O minério passa por uma peneira vibratória e os blocos retidos vão para um britador. O que foi britado e o passante na peneira juntam-se numa mesma correia transportadora e seguem para o silo de minério da concentração (CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL, 1989).

Depois, passam pela fase de separação magnética, onde a magnetita é removida do minério de Araxá por dois separadores magnéticos de baixa intensidade. A parte não magnética segue para a deslamagem e a fração magnética é bombeada para o depósito de rejeito (CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL, 1989). A parte magnética, depois da deslamagem, passa pela etapa de flotação, onde é realizada a flotação seletiva do pirocloro, através da adição dos reagentes em duas etapas de condicionamento. O concentrado de flotação segue para um espessador e em seguida para um filtro a disco (CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL, 1989).

Todos os rejeitos da usina de concentração, após ajuste do pH para 7, com a adição de cal, são bombeados para uma bacia de sedimentação (CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL, 1989). O processo de produção da liga ferronióbio, denominado redução aluminotérmica, é realizado através da redução dos teores de fósforo, enxofre e chumbo no concentrado de flotação. Isso é conseguido através de calcinação e lixiviação seletiva dessas impurezas (CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL, 1989).

### **3.6. Economia circular**

A economia atual pode ser amplamente descrita como linear, sendo a mesma dependente de um fluxo ininterrupto de recursos naturais e minerais, incluindo água, produtos agrícolas, madeira, metais e energia. Esse modelo, em que os materiais virgens são extraídos da natureza, utilizados para produção e depois descartados, gera muito desperdício de recursos, além de lixo e poluição para o meio ambiente (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION; GRANTA DESIGN, 2015).

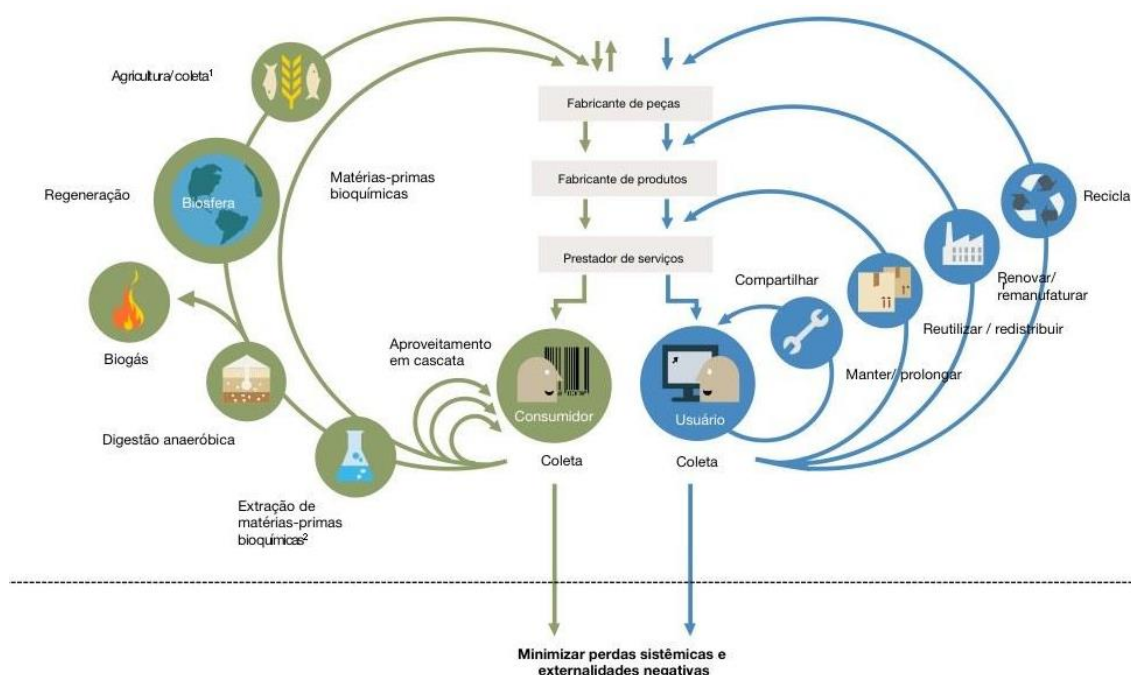
Em um mundo de recursos finitos, esse modelo econômico não pode funcionar por muito mais tempo e há indícios de que o mesmo já está chegando ao seu limite (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION; GRANTA DESIGN, 2015).

Em oposição, a economia circular é uma estratégia que objetiva a redução da entrada de materiais virgens como matéria-prima e a diminuição da geração de resíduos, modificando e fechando ciclos econômicos e ecológicos de fluxos de recursos (HAAS et al., 2015). Esse conceito visa aliviar a contradição entre o rápido crescimento econômico e a curta idade de matérias-primas e energia, além de promover o desenvolvimento sustentável da economia e da sociedade (YUAN; BI; MORIGUICHI, 2006).

A Fundação Ellen MacArthur define economia circular como aquela que objetiva manter a utilidade dos produtos, componentes e materiais, retendo seus valores. Dessa forma, é diminuída a necessidade de novas matérias-primas e energia, assim como a pressão ambiental da extração de recursos, emissões e desperdício (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY - EEA, 2016).

Eco-design, manutenção, reuso, remodelação, remanufatura, compartilhamento de produtos, diminuição e reciclagem de resíduos são todos aspectos importantes da economia circular (EEA, 2016).

Figura 7 - Diagrama borboleta



Fonte: adaptado de Ellen Macarthur Foundation (2014).

Segundo a Ellen Macarthur Foundation (2014), são três os princípios da economia circular:

- 1) Preservar e aumentar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2014).
- 2) Otimizar a produção de recursos fazendo circular produtos, componentes e materiais no mais alto nível de utilidade o tempo todo, tanto no ciclo técnico quanto no biológico (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2014).
- 3) Fomentar a eficácia do sistema revelando e excluindo as externalidades negativas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2014).

Cinco características chaves da economia circular foram também descritas no Relatório 2 – “*Circular Economy in Europe: Developing the knowledge base*” da European Environment Agency, sendo as mesmas (EEA, 2016):

- 1) Redução de insumos e uso de recursos naturais;
- 2) Aumento da utilização de recursos renováveis e recicláveis;
- 3) Redução dos níveis de emissões;
- 4) Redução das perdas de materiais;
- 5) Aumento da durabilidade dos produtos.

Hoje, muitas companhias e empresas já veem uma oportunidade no modelo da economia circular, que permite tanto a captura de valor adicional de seus produtos e materiais, como também previne a volatilidade de preços e matérias-primas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION; GRANTA DESIGN, 2015). Além disso, destaca-se que a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser uma ferramenta valiosa para quantificar e reportar os benefícios da Economia Circular (STROTHMAN; SONNEMAN, 2017).

### **3.7. Indicadores de circularidade**

A circularidade de um produto pode ser definida como a fração do produto que provém de produtos usados, por meio de ciclos fechados ou abertos (LINDER; SARASINI; VAN LOON, 2017). Métricas de circularidade são importantes para avaliar

empiricamente os efeitos de uma economia circular em termos de lucratividade, criação de empregos e impactos ambientais. Atualmente, no entanto, não existe um método padronizado para medir a circularidade de produtos (LINDER; SARASINI; VAN LOON, 2017).

O desenvolvimento de indicadores de circularidade é relevante no contexto da transição da economia linear para a circular. Entretanto, o desenvolvimento desses indicadores e a aplicação do mesmo em empresas são desenvolvidos hoje, principalmente, por empresas de consultoria, que não estão fortemente ligadas a rigorosos métodos científicos (SAIDANI et al., 2017a). Alguns acadêmicos estão começando a preencher a lacuna, mas ainda não existe consenso (LONCA et al., 2018).

A circularidade pode ser avaliada em diferentes níveis espaciais, variando entre os níveis macro (nacional, regional), meso (cidade, parque industrial e cadeia de suprimentos) e micro (empresa, produto) (LINDER; SARASINI; VAN LOON, 2017).

#### **4. MÉTODO DE PESQUISA**

Primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica, através das bases de dados Scopus e Web of science, de todos os conceitos tratados no estudo, visando melhor compreensão e base para o desenvolvimento da pesquisa sobre o tema evidenciado.

O projeto em questão contém as quatro fases da ACV: definição de objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impactos e interpretação. Foram seguidas as normas da ABNT 14040 (2009a) e 14044 (2009b) durante todo o estudo e as mesmas correspondem também à estrutura metodológica do presente trabalho.

O objetivo contém a aplicação pretendida da ACV, as razões para a realização do estudo, o público para quem se pretende divulgar os resultados e se há ou não a intenção de utilizar os resultados em afirmações comparativas. O escopo inclui o sistema de produto, as funções desse sistema, a unidade funcional, a fronteira do sistema, o método de avaliação de impacto e as categorias de impacto selecionadas, os requisitos de dados, limitações, além do tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

Foi realizada, através de revisão bibliográfica, uma análise crítica das metodologias de avaliação de impacto existentes, com o intuito de determinar qual ou quais métodos para AICV existentes são os mais adequados para serem utilizados em uma ACV

realizada no Brasil. Para a realização da análise, a primeira etapa foi um levantamento dos principais métodos de avaliação de impacto utilizados (JOINT RESEARCH CENTER-EUROPEAN COMMISSION, 2010), incluindo: CML 2002, Eco-Indicator 99, EDIP (1997-2003), EPS2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, ReCiPe, Swiss Ecoscarcity or Ecological scarcity, TRACI e MEEuP methodology.

Para comparação dos métodos e escolha dos mais adequados para o Brasil, foi realizada uma comparação das categorias de impacto analisadas por cada uma das metodologias e uma comparação da validade regional dessas categorias (JOINT RESEARCH CENTER-EUROPEAN COMMISSION, 2010; MENDES; BUENO; OMETTO, 2015). A fase de análise de inventário de ciclo de vida (ICV) contém as quantificações de entradas e saídas do sistema de produto. No estudo em questão, foi utilizado como fonte de pesquisa o artigo Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis (NUSS; ECKELMAN, 2014).

Foram realizadas também visitas técnicas, para as quais foram desenvolvidos questionários e estudos prévios sobre o processo de produção. As visitas sucedidas foram de grande importância para o conhecimento aprofundado sobre o metal e sua cadeia de produção, além de também fornecer dados importantes para o inventário realizado. Além disso, foram realizados cálculos para relacionar os dados coletados com os processos elementares, fluxos de referência e unidade funcional. As informações obtidas podem ser encontradas em (DIÁLOGOS SETORIAIS UE-BRASIL, 2020).

Foi utilizado o software GaBi thinkstep 7.3.0.40 versão da base de dados 6.115 para todo o estudo da ACV, incluindo a modelagem do sistema de produto e os cenários energéticos, modificando o mix energético da cadeia produtiva. Foi feita uma comparação entre o mix energético brasileiro e outros dois cenários, sendo um deles composto por fontes renováveis e outro por fontes não renováveis, tendo como intuito a comparação dos impactos ambientais provenientes das fontes energéticas.

Na fase de Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) foram estudados e quantificados os impactos ambientais, utilizando os dados coletados na ICV e relacionando com categorias de impacto e indicadores de categoria, buscando compreender tais impactos. Já na fase de Interpretação do ciclo de vida, foram feitas constatações com relação aos impactos ambientais potenciais e, no caso do estudo, foram avaliados principalmente os causados pelas fontes energéticas. Foi avaliado se as etapas

de ICV e AICV realizadas anteriormente atendiam ao objetivo e escopo previamente definidos.

Ademais, através de revisão bibliográfica, foi realizado um levantamento de 30 indicadores de circularidade existentes na literatura. A partir disso, os indicadores foram analisados e observados com relação à abrangência da utilização de energias renováveis dentre seus parâmetros, sendo que foram divididos entre os que consideram os recursos energéticos renováveis dentre suas variáveis, sendo os mesmos utilizados para o cálculo; e os que não consideram as fontes de energia renováveis.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Avaliação do Ciclo de Vida**

#### **5.1.1. Definição de objetivo e escopo**

A definição de objetivo e escopo é a primeira fase de uma ACV, sendo a mesma de extrema importância, uma vez que orienta e serve como base para todas as outras fases. No estudo em questão, toda a metodologia utilizada seguiu as normas da ABNT 14040 (ABNT, 2009a) e 14044 (ABNT, 2009b).

##### **5.1.1.1. Objetivo**

A finalidade desse estudo é quantificar os impactos ambientais ocorrentes no início da cadeia de produção de ferronióbio, incluindo desde a extração do minério, até a saída da fábrica, ou seja, realizando uma análise *cradle to gate*. Além disso, o intuito da realização dessa Avaliação do Ciclo de Vida do nióbio (Nb) é comparar impactos ambientais potenciais causados pela fonte energética utilizada na cadeia de produção do metal, criando projeções utilizando diferentes cenários energéticos, tomando como base fontes renováveis e não renováveis.

As razões para a execução desse estudo estão no fato de que o nióbio é um recurso não renovável, de ampla utilização, e que pode ser considerado um material crítico para diversos países, que utilizam o nióbio em grande quantidade, porém dependem totalmente da importação desse minério; e um material estratégico para o Brasil, que possui uma

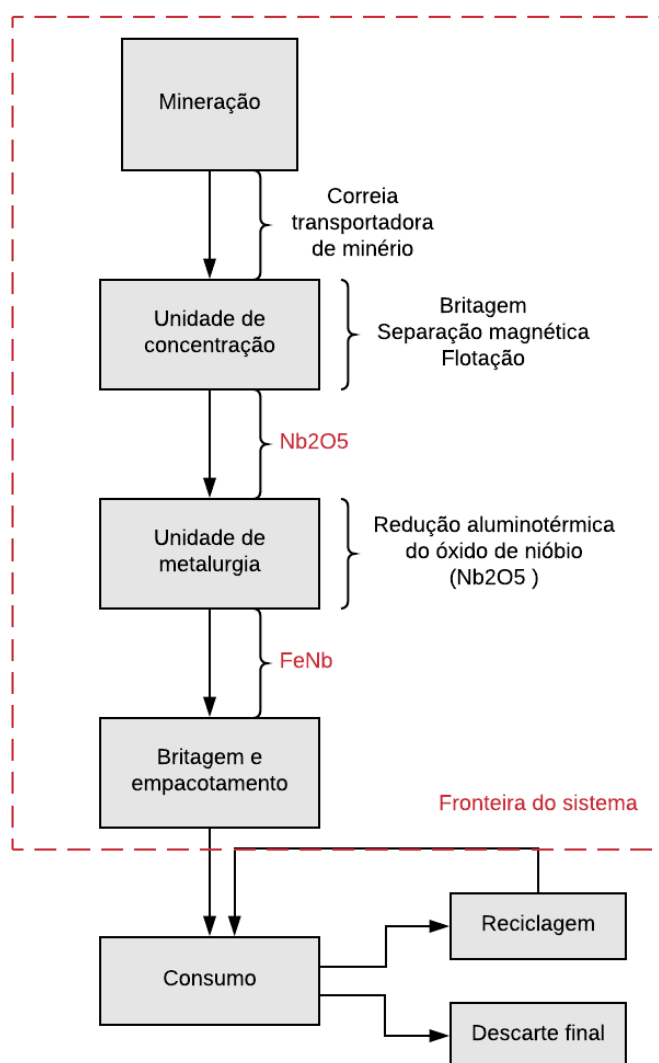
grande reserva e produção. Ainda, é importante comparar e quantificar os impactos e melhorias ambientais da utilização de fontes energéticas renováveis na metalurgia. Sendo assim, a ACV pode ser classificada como não comparativa e tem como público alvo o setor industrial, mineral e energético.

#### 5.1.1.2. Escopo

- Sistema de produto

O sistema de produto em questão pode ser evidenciado através da Figura 8.

Figura 8 - Sistema de produto



Fonte: Elaboração própria.

- Fronteira do sistema

A fronteira do sistema inclui o sistema desde a extração até o portão da fábrica (*cradle to gate*), como representado na Figura 8.

- Função do sistema

Fornecer ferronióbio, que por sua vez é empregado como elemento de liga, tendo como principal objetivo o aumento da resistência do aço.

- Unidade funcional

A unidade funcional estabelecida é uma tonelada de ferronióbio.

- Metodologia de avaliação de impacto

O resultado da análise crítica das metodologias de AICV está representado na Tabela 3.

Tabela 3 - Abrangência de aplicação no Brasil de categorias de impacto dos principais métodos de AICV existentes (Legenda: (✓) - aplicável no Brasil; (×)- não aplicável no Brasil)

(continua)

| <b>Método</b> | <b>Categorias de impacto principais</b> | <b>Abrangência de aplicação no Brasil *</b> |
|---------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| CML 2002      | Depleção de recursos abióticos          | ✓                                           |
|               | Depleção de recursos bióticos           | ✓                                           |
|               | Uso da terra                            | ✓                                           |
|               | Mudança climática                       | ✓                                           |
|               | Depleção do ozônio estratosférico       | ✓                                           |
|               | Toxicidade humana                       | ✓                                           |
|               | Ecotoxicidade aquática de água doce     | ✓                                           |
|               | Ecotoxicidade aquática marinha          | ✓                                           |
|               | Ecotoxicidade terrestre                 | ✓                                           |
|               | Formação de foto-oxidantes              | ×                                           |
|               | Acidificação                            | ×                                           |
|               | Eutrofização                            | ✓                                           |

Tabela 3 - Abrangência de aplicação no Brasil de categorias de impacto dos principais métodos de AICV existentes (Legenda: (✓) - aplicável no Brasil; (×)- não aplicável no Brasil)

(continua)

| <b>Método</b>    | <b>Categorias de impacto principais</b> | <b>Abrangência de aplicação no Brasil *</b> |
|------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| Eco-Indicator 99 | Mudança climática                       | ✓                                           |
|                  | Depleção da camada de ozônio            | ✓                                           |
|                  | Acidificação e eutrofização combinadas  | ×                                           |
|                  | Ecotoxicidade                           | ×                                           |
|                  | Uso da terra                            | ×                                           |
|                  | Recursos minerais                       | ✓                                           |
|                  | Recursos fósseis                        | ✓                                           |
| EDIP 1997        | Aquecimento global                      | ✓                                           |
|                  | Depleção de ozônio                      | ✓                                           |
|                  | Acidificação                            | ✓                                           |
|                  | Enriquecimento de nutrientes            | ✓                                           |
|                  | Formação de ozônio fotoquímico          | ✓                                           |
|                  | Toxicidade humana                       | ✓                                           |
|                  | Ecotoxicidade                           | ✓                                           |
|                  | Consumo de recursos                     | ✓                                           |
|                  | Aquecimento global                      | ✓                                           |
|                  | Depleção de ozônio                      | ✓                                           |
| EDIP 2003        | Acidificação                            | ×                                           |
|                  | Eutrofização terrestre                  | ×                                           |
|                  | Eutrofização aquática                   | ×                                           |
|                  | Formação de ozônio fotoquímico          | ×                                           |
|                  | Toxicidade humana                       | ×                                           |
|                  | Ecotoxicidade                           | ×                                           |

Tabela 3 - Abrangência de aplicação no Brasil de categorias de impacto dos principais métodos de AICV existentes (Legenda: (✓) - aplicável no Brasil; (×)- não aplicável no Brasil)

(continua)

| <b>Método</b> | <b>Categorias de impacto principais</b> | <b>Abrangência de aplicação no Brasil *</b> |
|---------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|
| LIME          | Aquecimento global                      | ✓                                           |
|               | Depleção da camada de ozônio            | ✓                                           |
|               | Toxicidade humana                       | ×                                           |
|               | Ecotoxicidade                           | ×                                           |
|               | Acidificação                            | ×                                           |
|               | Eutrofização                            | ×                                           |
|               | Formação de oxidantes fotoquímicos      | ×                                           |
|               | Uso da terra                            | ×                                           |
|               | Consumo de minerais                     | ×                                           |
|               | Consumo de energia                      | ×                                           |
|               | Consumo de recursos bióticos            | ×                                           |
| LUCAS         | Mudança climática                       | ✓                                           |
|               | Depleção de ozônio                      | ✓                                           |
|               | Acidificação                            | ×                                           |
|               | Neblina fotoquímica (smog)              | ×                                           |
|               | Eutrofização aquática                   | ×                                           |
|               | Eutrofização terrestre                  | ×                                           |
|               | Ecotoxicidade (aquática e terrestre)    | ×                                           |
|               | Toxicidade humana                       | ×                                           |
|               | Uso da terra                            | ×                                           |
|               | Destruição de recursos abióticos        | ×                                           |

Tabela 3 - Abrangência de aplicação no Brasil de categorias de impacto dos principais métodos de AICV existentes (Legenda: (✓) - aplicável no Brasil; (×)- não aplicável no Brasil)

(continua)

| <b>Método</b>       | <b>Categorias de impacto principais</b>       | <b>Abrangência de aplicação no Brasil *</b> |
|---------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| ReCiPe              | Mudança climática                             | ✓                                           |
|                     | Depleção de ozônio                            | ✓                                           |
|                     | Acidificação terrestre                        | ×                                           |
|                     | Eutrofização (água doce e marinha)            | ×                                           |
|                     | Toxicidade humana                             | ×                                           |
|                     | Formação de oxidantes fotoquímicos            | ×                                           |
|                     | Formação de matéria particulada               | ×                                           |
|                     | Ecotoxicidade (terrestre, água doce, marinha) | ×                                           |
|                     | Uso do solo agrícola                          | ×                                           |
|                     | Uso do solo urbano                            | ×                                           |
|                     | Esgotamento de recursos fósseis               | ✓                                           |
|                     | Esgotamento de recursos minerais              | ✓                                           |
|                     | Esgotamento de recursos de água doce          | ✓                                           |
| Ecological Scarcity | Mudança climática                             | ×                                           |
|                     | Depleção de ozônio                            | ×                                           |
|                     | Formação de oxidantes fotoquímicos            | ×                                           |
|                     | Consumo de água                               | ×                                           |
|                     | Consumo de areia/cascalho                     | ×                                           |
|                     | Perda de biodiversidade por ocupação do solo  | ×                                           |

Tabela 3 - Abrangência de aplicação no Brasil de categorias de impacto dos principais métodos de AICV existentes (Legenda: (✓) - aplicável no Brasil; (×)- não aplicável no Brasil)

| (conclusão)   |                                                 |                                             |
|---------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Método</b> | <b>Categorias de impacto principais</b>         | <b>Abrangência de aplicação no Brasil *</b> |
| TRACI         | Depleção de ozônio                              | ✓                                           |
|               | Aquecimento global                              | ✓                                           |
|               | Formação de fumaça (smog)                       | ×                                           |
|               | Acidificação                                    | ×                                           |
|               | Eutrofização                                    | ×                                           |
|               | Saúde humana (carcinogênicos)                   | ×                                           |
|               | Saúde humana (não carcinogênicos)               | ×                                           |
|               | Saúde humana (poluentes)                        | ×                                           |
|               | Ecotoxicidade                                   | ×                                           |
|               | Esgotamento de combustíveis fósseis             | ✓                                           |
|               | Uso da terra                                    | ×                                           |
| MEEuP         | Acidificação                                    | ×                                           |
|               | Toxicidade humana                               | ×                                           |
|               | Formação de partículas                          | ×                                           |
|               | Eutrofização aquática                           | ×                                           |
| USEtox        | Toxicidade humana                               | ✓                                           |
|               | Ecotoxicidade aquática de água doce             | ✓                                           |
| ILCD 2011     | Mudança climática                               | ✓                                           |
|               | Depleção de ozônio                              | ✓                                           |
|               | Toxicidade humana                               | ✓                                           |
|               | Material particulado/ Inorgânicos respiratórios | Dados não encontrados                       |
|               | Radiação ionizante                              | Dados não encontrados                       |
|               | Formação de ozônio fotoquímico                  | ×                                           |
|               | Acidificação                                    | ×                                           |
|               | Eutrofização                                    | ×                                           |
|               | Ecotoxicidade                                   | ✓                                           |
|               | Uso da terra                                    | ×                                           |
|               | Depleção de recursos                            | ×                                           |

Fonte: adaptado de Joint Research Center-European Commission (2010, 2012) e Mendes, Bueno e Ometto (2015)

É possível observar, portanto, que apenas as metodologias EDIP 1997, EPS 2000 e USEtox têm abrangência de aplicação no Brasil para todas as categorias de impacto abordadas. Por outro lado, os métodos Impact 2002+, Ecological Scarcity e MEEuP não possuem abrangência de aplicação no Brasil para nenhuma das categorias de impacto e, conseqüentemente, não podem ser utilizados em um estudo no Brasil.

Com relação às metodologias que possuem categorias aplicáveis e não aplicáveis, é possível utilizá-las selecionando as categorias que são adequadas ao seu estudo e localização.

Sendo assim, a metodologia utilizada no estudo em questão é composta por categorias selecionadas do ILCD 2011 e do EDIP 1997. O ILCD 2011 é composto por recomendações de métodos para determinadas categorias de impacto, não sendo um método próprio, e sim uma união de métodos, midpoint e endpoint, já existentes e considerados como os mais adequados. Essa metodologia é atual e atende aos requisitos da norma ISO 14044 (JOINT RESEARCH CENTER-EUROPEAN COMMISSION, 2011). Entretanto, a mesma não apresenta apenas categorias de impacto com abrangência de aplicação no Brasil e será, portanto, utilizada apenas com a seleção das categorias que podem ser aplicadas no país.

O EDIP 1997, por sua vez, apresenta abrangência de aplicação global para todas as categorias de impacto, e será utilizado nas categorias em que o ILCD não é considerado adequado para o Brasil.

- Categorias de impacto

As categorias de impacto consideradas pelo estudo são: Mudanças climáticas, Depleção de ozônio, Toxicidade humana, Ecotoxicidade, Acidificação, Enriquecimento de nutrientes e Formação de ozônio fotoquímico, como representado na Tabela 4.

Tabela 4 – Categorias de impacto e métodos utilizados na fase de AICV

| <b>Categoria de impacto</b>       | <b>Método</b> |
|-----------------------------------|---------------|
| Mudanças climáticas               | ILCD          |
| Depleção de ozônio                | ILCD          |
| Toxicidade humana                 | ILCD          |
| Ecotoxicidade                     | ILCD          |
| Acidificação                      | EDIP 1997     |
| Enriquecimento de nutrientes      | EDIP 1997     |
| Formação de ozônio<br>fotoquímico | EDIP 1997     |

Fonte: Elaboração própria.

#### ➤ Mudanças climáticas

A atmosfera terrestre absorve parte da energia emitida como radiação infravermelha e isso provoca o seu aquecimento. Esse efeito pode ser considerado natural e é o responsável pela manutenção da vida no planeta (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Entretanto, na medida em que as atividades antrópicas possibilitaram a emissão acentuada de gases de efeito estufa, esse efeito agrava-se e traz o aumento da temperatura média global e demais variações climáticas repentinas. Dentre alguns desses gases de efeito estufa (GEEs), estão: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), clorofluorcarbonos (CFCs), hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), hidrofluorcarbonos (HFCs), halogênios associados a cadeias carbônicas, tetraclorometano (CCl<sub>4</sub>), 1,1,1- tricloroetano (CCl<sub>3</sub>CH<sub>3</sub>) e monóxido de carbono (CO) (STRANDDORF; HOFFMANN; SCHMIDT, 2003). Salienta-se que o CO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub> contribuem com mais de 80% com o aquecimento global. O aquecimento global é considerado um impacto global e o resultado da ICV deve ser expresso em termos de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>-eq), correspondendo ao fator de caracterização da categoria (ROSSI, 2013).

➤ Depleção de ozônio

A categoria resulta no aumento da quantidade de raios ultravioletas que atingem a superfície da terra, provocados pelo aumento da concentração de determinados gases na camada da ozonoesfera provenientes de emissões atmosféricas geradas por ações humanas. A redução da camada de ozônio pode resultar no crescimento de doenças, interferências com o ecossistema e danos a diversos tipos de materiais. É medida em relação ao efeito de 1kg de CFC-11 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBICT, 2019).

➤ Toxicidade humana

Para a toxicidade humana, avalia-se a contribuição das substâncias químicas ocasionadas pelas atividades antrópicas via exposição do ser humano ao meio. A toxicidade humana é uma categoria de impacto regional/local e atividades antrópicas podem emitir substâncias que podem influenciar negativamente a saúde humana.

O fator de caracterização corresponde ao volume do compartimento ambiental afetado (ar, água ou solo) necessário para neutralizar ou diluir a substância tóxica a fim de que seus efeitos não causem danos ao homem (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997). É expresso em unidades de tóxicos comparativas (CTU), proporcionando a estimativa do aumento da mortalidade humana total por unidade de massa de um produto químico emitido (casos/kg emitido) (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

➤ Ecotoxicidade

As atividades antrópicas podem emitir substâncias químicas, que podem contribuir para alterar a estrutura dos ecossistemas e causar efeitos tóxicos nos organismos vivos. A ecotoxicidade é uma categoria de impacto regional/local e está inserida no contexto devido à emissão de substâncias como hidrocarbonetos, metais, poluentes orgânicos persistentes (POPs), etc. (ROSSI, 2013).

O fator de caracterização permeia o volume do compartimento ambiental afetado (água ou solo) necessário para neutralizar ou diluir a substância tóxica a fim de que seus efeitos não causem danos toxicológicos (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997). É expresso em unidades de tóxicos comparativas (CTU) e fornece uma estimativa da fração potencialmente afetada (PAF) de espécies ao longo do tempo e de volume por unidade de massa de um produto químico emitido (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015).

Atualmente, a ecotoxicidade é representada apenas pelos efeitos tóxicos em espécies de água doce na coluna d'água. Impactos em outros ecossistemas, incluindo sedimentos, não são refletidos na prática atual (JOINT RESEARCH CENTER-EUROPEAN COMMISSION, 2012).

➤ Acidificação

Quando compostos podem ser emitidos e convertidos em ácidos na atmosfera, devido ao ciclo hidrológico, estes podem ser depositados novamente na água e no solo, ocasionando baixa de pH e favorecendo a acidificação do meio. Como consequência, pode ocorrer o desaparecimento de florestas, declínio da população de peixes, corrosão de monumentos arquitetônicos, entre outras (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

A acidificação é causada principalmente pelas emissões atmosféricas de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_x$  (JOINT RESEARCH CENTER-EUROPEAN COMMISSION, 2012). Essa categoria enquadra-se na escala regional/local e está atrelada ao estudo pelos compostos potenciais de geração da acidificação também serem resultantes da queima incompleta de combustíveis fósseis. O fator de caracterização perfaz o dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) (ROSSI, 2013).

➤ Enriquecimento de nutrientes

A eutrofização é o enriquecimento de nutrientes na água ou no solo principalmente por compostos de fósforo e nitrogênio. Ela impacta os ecossistemas, preferencialmente os ambientes aquáticos, pois a diminuição da concentração de oxigênio nas águas, devido à decomposição desses nutrientes, pode levar à extinção de peixes e demais organismos. O fator de caracterização utilizado no EDIP 1997 é  $\text{kg NO}_3\text{-eq}$  (ROSSI, 2013).

Com relação à eutrofização terrestre e aquática marinha, apenas a concentração de nitrogênio é o fator limitante. Já com relação à eutrofização em ambientes aquáticos de água doce, o fator limitante considerado é o fósforo (JOINT RESEARCH CENTER-EUROPEAN COMMISSION, 2012).

➤ Formação de ozônio fotoquímico

Quando solventes e outros componentes orgânicos voláteis são emitidos para a atmosfera, geralmente são degradados em poucos dias por meio de sua oxidação. Na

presença de óxidos de nitrogênio (Nox), essa reação pode resultar na formação de ozônio (O<sub>3</sub>) e é denominada por formação fotoquímica de ozônio, por ocorrer com o auxílio da luz solar. O O<sub>3</sub> é um gás benéfico na estratosfera por proteger a terra da radiação ultravioleta (UV), entretanto, na troposfera pode causar muitos problemas aos seres vivos (WENZEL; HAUSCHILD; ALTING, 1997).

Essa categoria de impacto foi escolhida por ser resultante da combustão incompleta de combustíveis fósseis. O fator de caracterização perfaz o eteno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) equivalente, representando o potencial de formação fotoquímica de ozônio que seria causado pelo eteno. O método EDIP divide essa categoria em duas: alto Nox e baixo Nox. No presente estudo adotou-se os valores para alto Nox (ROSSI, 2013).

- Requisitos de dados

Os dados utilizados no estudo em questão foram obtidos, principalmente, através de revisão bibliográfica, utilizando dados do artigo Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis (NUSS; ECKELMAN, 2014), da base de dados GaBi, Ecoinvent e outros artigos científicos.

- Limitações

Como limitação, pode ser citada a dificuldade para conseguir dados energéticos e sobre o metal.

- Tipo de análise crítica

Não está prevista análise crítica por terceiros.

- Tipo e formato do relatório

O relatório em questão é do tipo convencional, contendo todos os dados e resultados detalhados, além de apresentar imagens, gráficos e tabelas.

### 5.1.2. Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

Após a definição de objetivo e escopo, foi realizada a etapa de ICV, previamente descrita na metodologia.

- Validação e correlação dos dados

O inventário permeou a quantificação de entradas e saídas dos fluxos de materiais e energia incluídos na fronteira do estudo. Foram feitos ajustes nas entradas e saídas quanto à unidade dimensional adequada para se enquadrarem na unidade funcional estabelecida.

- Inventário

O inventário foi baseado em dados retirados do relatório de Nuss; Eckelman (2014).

#### Óxido de nióbio:

Tabela 5 – Inventário do ciclo de vida de uma tonelada de óxido de nióbio

(continua)

| <b>Fluxos</b>                                                           | <b>Teor</b> | <b>Quantidade</b> | <b>Unidade dimensional</b> |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------|----------------------------|
| Ocupação, arável                                                        | Entrada     | 3,03              | m2a                        |
| Biomassa                                                                | Entrada     | 2,79              | kg                         |
| Ocupação, área industrial                                               | Entrada     | 90,7              | m2a                        |
| Transformação, origem desconhecida                                      | Entrada     | 0,713             | m2                         |
| Energia potencial (no reservatório de energia hidrelétrica), convertida | Entrada     | 878               | MJ                         |
| Energia do carvão                                                       | Entrada     | 1929              | MJ                         |
| Energia do urânio                                                       | Entrada     | 773               | MJ                         |
| Energia não especificada                                                | Entrada     | 0,0545            | MJ                         |
| Água, refrigerando, bebendo                                             | Entrada     | 10192             | kg                         |
| Nióbio                                                                  | Entrada     | 13,4              | ton                        |

Tabela 5 – Inventário do ciclo de vida de uma tonelada de óxido de nióbio

(continua)

| <b>Fluxos</b>                                                                                        | <b>Teor</b> | <b>Quantidade</b> | <b>Unidade dimensional</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------|----------------------------|
| Metais, extraídos para uso                                                                           | Entrada     | 0,0328            | ton                        |
| Metais, extração não utilizada                                                                       | Entrada     | 0,0245            | ton                        |
| Óxido de nióbio (57,6% de Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , 1,88% de Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | Saída       | 1                 | ton                        |
| Tricloroetano                                                                                        | Saída       | 2,20E-10          | kg                         |
| Etano, 1-2 dicloroetano                                                                              | Saída       | 2,40E-05          | kg                         |
| Arsênico                                                                                             | Saída       | 6,90E-05          | kg                         |
| Benzo (a) pireno                                                                                     | Saída       | 0,0012            | kg                         |
| Benzeno                                                                                              | Saída       | 0,0012            | kg                         |
| Chumbo                                                                                               | Saída       | 0,00041           | kg                         |
| Cádmio                                                                                               | Saída       | 4,30E-06          | kg                         |
| Fluorocarbonetos clorados                                                                            | Saída       | 4,60E-06          | kg                         |
| Metano biogênico                                                                                     | Saída       | 0,00353           | kg                         |
| Metano                                                                                               | Saída       | 0,336             | kg                         |
| Cromo                                                                                                | Saída       | 0,0101            | kg                         |
| Monóxido de carbono                                                                                  | Saída       | 1,23              | kg                         |
| Dióxido de carbono fóssil                                                                            | Saída       | 153               | kg                         |
| Monóxido de carbono biogênico                                                                        | Saída       | 3,35              | kg                         |
| Diclorometano                                                                                        | Saída       | 9,00E-09          | kg                         |
| Dioxinas (não especificadas)                                                                         | Saída       | 1,00E-10          | kg                         |
| Eteno                                                                                                | Saída       | 0,00091           | kg                         |
| Partículas < 10 um                                                                                   | Saída       | 5,55              | kg                         |
| Formaldeído                                                                                          | Saída       | 0,00021           | kg                         |

Tabela 5 – Inventário do ciclo de vida de uma tonelada de óxido de nióbio

(conclusão)

| <b>Fluxos</b>                | <b>Teor</b> | <b>Quantidade</b> | <b>Unidade dimensional</b> |
|------------------------------|-------------|-------------------|----------------------------|
| Ozônio                       | Saída       | 0                 | kg                         |
| Sulfato de hidrogênio        | Saída       | 0,00055           | kg                         |
| Cloreto de hidrogênio        | Saída       | 0,0136            | kg                         |
| Fosfato                      | Saída       | 0                 | kg                         |
| Hexaclorobenzeno             | Saída       | 8,30E-08          | kg                         |
| Fluoreto de hidrogênio       | Saída       | 0,00205           | kg                         |
| Cobre                        | Saída       | 0,00066           | kg                         |
| Monóxido de dinitrogênio     | Saída       | 0,0527            | kg                         |
| Níquel                       | Saída       | 0,00066           | kg                         |
| Óxidos de nitrogênio         | Saída       | 4,3               | kg                         |
| Bifenilas policloradas       | Saída       | 1,20E-07          | kg                         |
| Metoxibenzeno, pentacloreto  | Saída       | 6,60E-07          | kg                         |
| Mercúrio                     | Saída       | 1,80E-05          | kg                         |
| Hexafluoreto de enxofre      | Saída       | 1,00E-05          | kg                         |
| Dióxido de enxofre           | Saída       | 0,534             | kg                         |
| Zinco                        | Saída       | 0,0021            | kg                         |
| Triclorofluorometano, CFC-11 | Saída       | 0,0107            | kg                         |

Fonte: adaptado de (NUSS: ECKELMAN, 2014).

Tabela 6 - Inventário do ciclo de vida de uma tonelada de ferronióbio

| <b>Fluxos</b>                                                       | <b>Teor</b> | <b>Quantidade</b> | <b>Unidade dimensional</b> |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------|----------------------------|
| Pirocloro concentrado (60% Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )         | Entrada     | 1640              | kg                         |
| Minério de ferro (65% Fe), no beneficiamento                        | Entrada     | 360               | kg                         |
| Alumínio, primário, na planta                                       | Entrada     | 550               | kg                         |
| Fluorite, 97%, na planta                                            | Entrada     | 68                | kg                         |
| Calcário, moído, solto, na fábrica                                  | Entrada     | 45                | kg                         |
| Fundição de metais não rochosos                                     | Entrada     | 7,55E-09          | unidade                    |
| Ferronióbio                                                         | Saída       | 1                 | ton                        |
| Resíduos, lodo de refinaria, 89,5% de água, para o aterro sanitário | Saída       | 1820              | kg                         |

Fonte: adaptado de (NUSS: ECKELMAN, 2014).

### 5.1.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Foi utilizado o software GaBi thinkstep 7.3.0.40 versão da base de dados 6.115 para todo o estudo da ACV, incluindo a modelagem do sistema de produto e dos cenários energéticos.

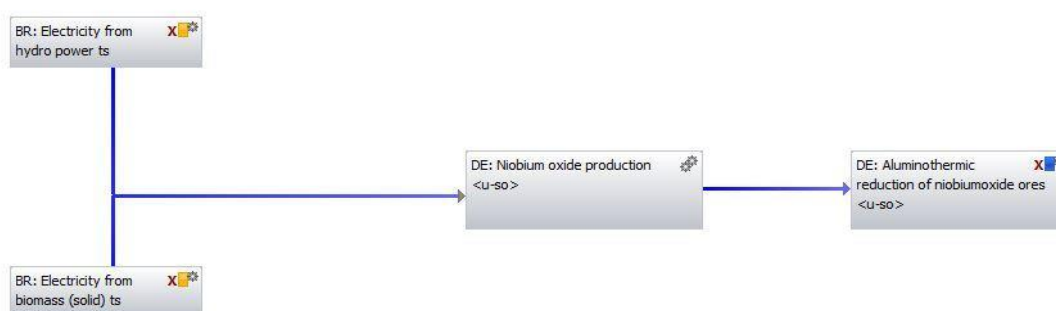
Realizou-se a união de todas as quantidades de energia presentes como entradas no inventário, independente de sua fonte, sendo todas consideradas como energia elétrica sem fonte específica. Essa modificação, entretanto, pode causar alterações nas saídas do processo. Não foi possível realizar modificações com relação às saídas e, portanto, essa é uma limitação do estudo.

Para a análise de sensibilidade, foram desenvolvidos dois cenários energéticos durante a modelagem do sistema de produto no software GaBi. A partir dos cenários, foi possível realizar a etapa de avaliação de impacto do ciclo de vida, tendo como enfoque os impactos causados pelas fontes energéticas utilizadas no processo.

Para a determinação dos cenários, foram utilizados dados existentes na base de dados do software e informações do livro Sustainability Performance Evaluation of Renewable Energy Sources: The Case of Brazil (OLIVEIRA; TRINDADE, 2018). Analisaram-se as principais fontes de energia renováveis e não renováveis utilizadas no Brasil e, a partir destas, foram consideradas as que apresentavam dados disponíveis para o país na base de dados do GaBi. Para cada cenário, foram escolhidas duas fontes energéticas.

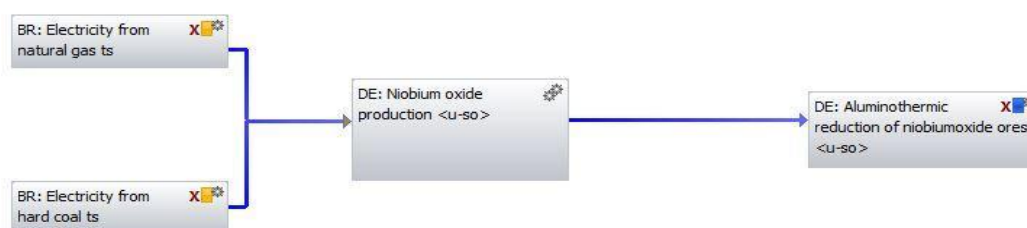
No cenário 1, foram consideradas fontes de energia renováveis, sendo estas a energia hidráulica e da biomassa, cada uma representando 50% da energia necessária para a produção. Já no cenário 2, foram consideradas fontes de energia não renováveis, sendo estas a energia proveniente do gás natural e do carvão mineral, com proporção de 50% cada, como no cenário 1. Os cenários 1 e 2 estão representados nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

Figura 9 - Cenário 1



Fonte: Elaboração própria.

Figura 10 - Cenário 2



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados dos impactos para cada uma das categorias de impacto analisadas, em ambos os cenários, estão representados na Tabela 7.

A partir disso, é possível observar que a etapa que apresentou maiores valores de impactos, em todas as categorias, foi a produção de óxido de nióbio, se mostrando como a etapa mais crítica do processo. Para a categoria Mudanças climáticas, a mesma apresentou o impacto de 374,32 kg CO<sub>2</sub> eq.

É importante ressaltar que a etapa de redução aluminotérmica de óxido de nióbio apresentou em seu inventário entradas pouco significativas, que não foram suficientes para quantificar os impactos nas categorias analisadas. Esse fato justifica o valor zero presente em todas as categorias e é uma limitação do estudo, ocasionada pela indisponibilidade de informações.

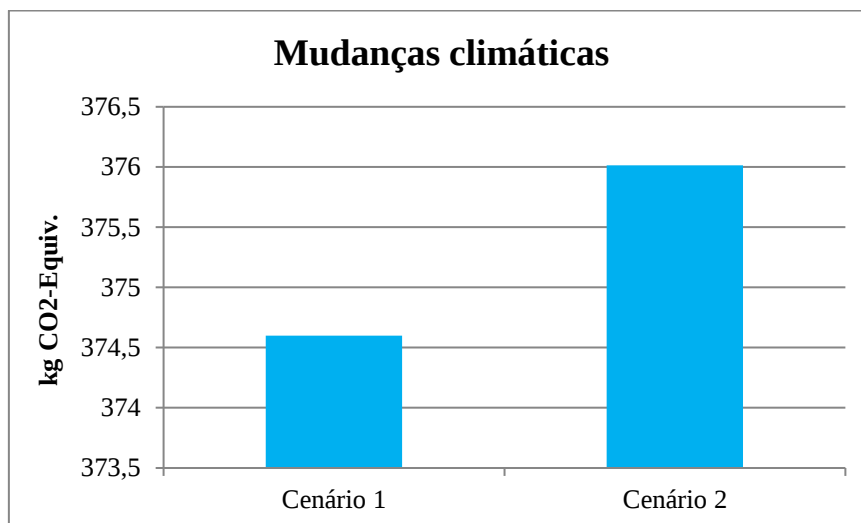
Os resultados, considerando apenas os impactos causados pelas fontes energéticas e comparando ambos os cenários, estão representados nas Figuras 11, 12, 13, 14, 15 e 16.

Tabela 7 - Valores absolutos dos impactos de cada processo para as categorias de impacto analisadas

| Processos<br>Categorias de impacto                    | Eletricidade proveniente de fontes renováveis (Cenário 1) | Eletricidade proveniente de fontes não renováveis (Cenário 2) | Produção de óxido de nióbio | Redução aluminotérmica de óxido de nióbio |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|
| Mudanças climáticas (kg CO <sub>2</sub> eq)           | 0,275415                                                  | 1,690097                                                      | 374,3232                    | 0                                         |
| Depleção de ozônio (kg CFC-11 eq)                     | 1,23E-12                                                  | 1,79E-12                                                      | 0,017548                    | 0                                         |
| Toxicidade humana (CTUh)                              | 1,77E-09                                                  | 3,81E-09                                                      | 3,95E-07                    | 0                                         |
| Ecotoxicidade (CTUe)                                  | 0,079434                                                  | 0,18319                                                       | 135,4471                    | 0                                         |
| Acidificação (kg SO <sub>2</sub> eq)                  | 0,003968                                                  | 0,015094                                                      | 5,838862                    | 0                                         |
| Enriquecimento de nutrientes (kg NO <sub>3</sub> -eq) | 0,007171                                                  | 0,006088                                                      | 9,763927                    | 0                                         |
| Formação de ozônio fotoquímico (kg Ethene-eq)         | 0,000422                                                  | 0,000243                                                      | 0,232906                    | 0                                         |

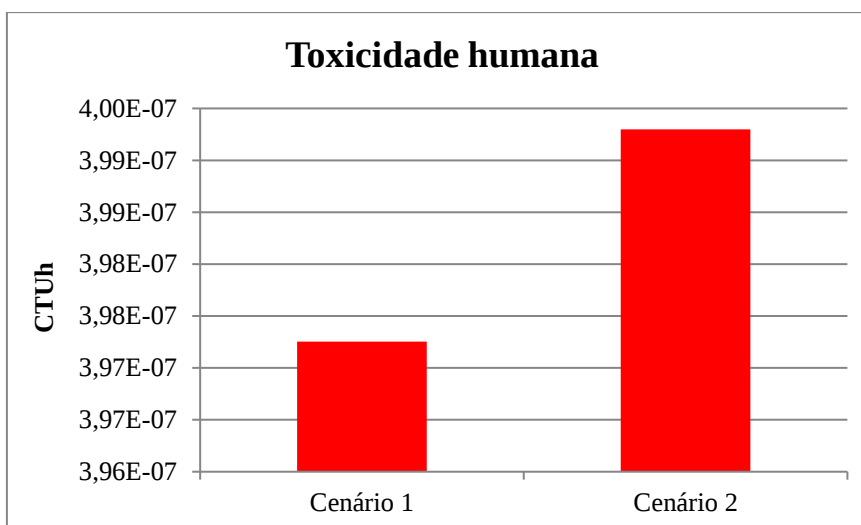
Fonte: Elaboração própria.

Figura 11 - Impactos de mudanças climáticas nos cenários 1 e 2



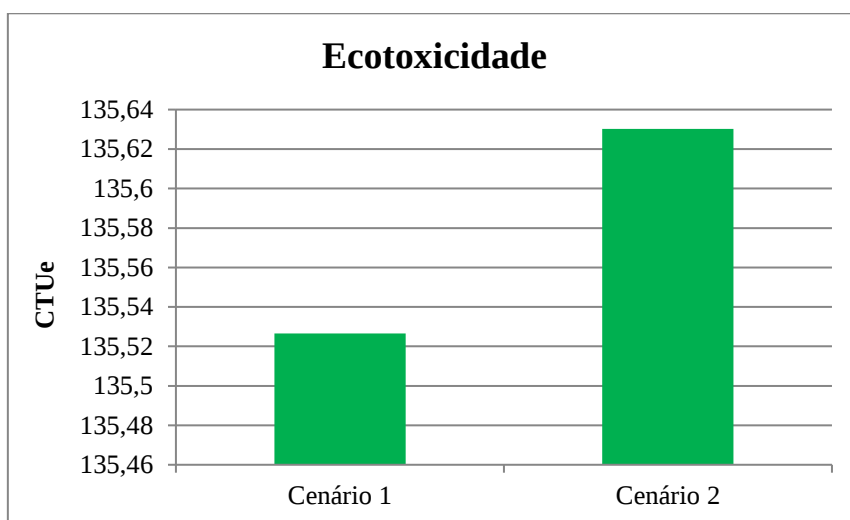
Fonte: Elaboração própria.

Figura 12 - Impactos de toxicidade humana nos cenários 1 e 2



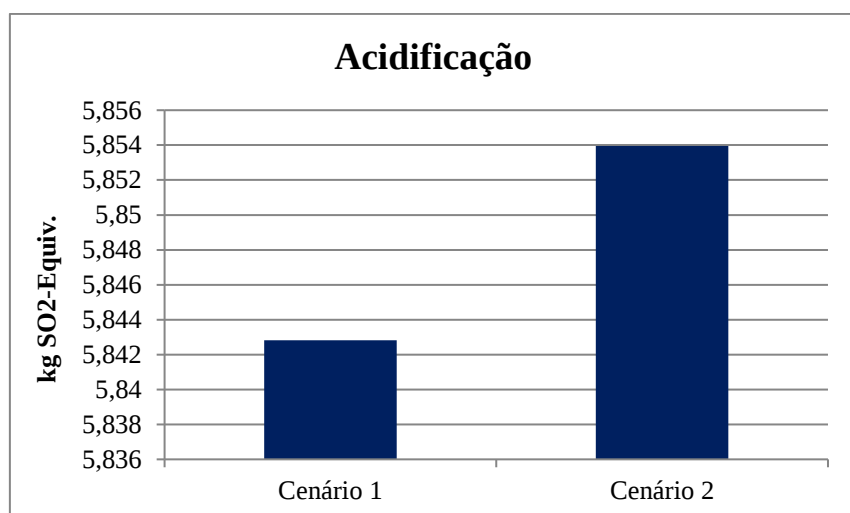
Fonte: Elaboração própria.

Figura 13 - Impactos de ecotoxicidade nos cenários 1 e 2



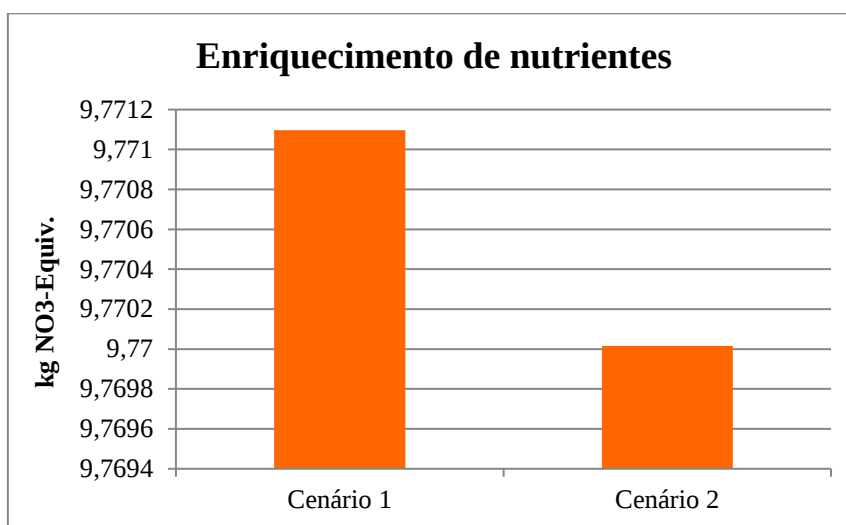
Fonte: Elaboração própria.

Figura 14 - Impactos de acidificação nos cenários 1 e 2



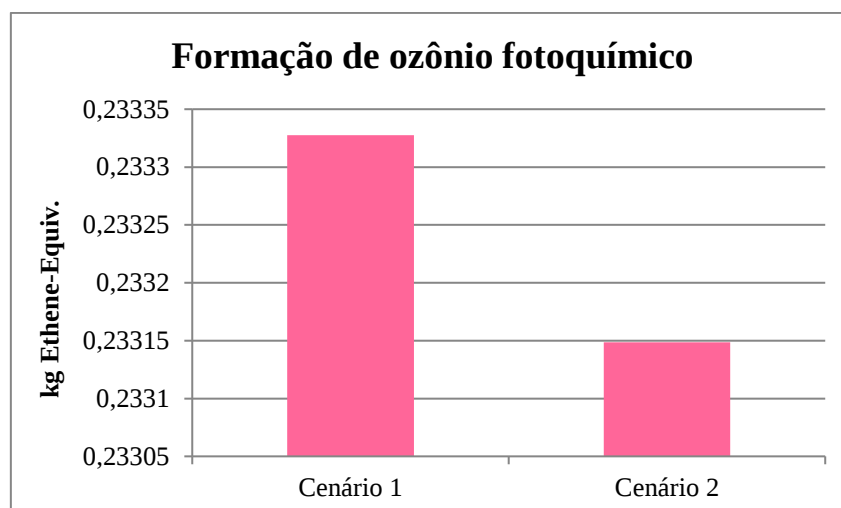
Fonte: Elaboração própria.

Figura 15 - Impactos de enriquecimento de nutrientes nos cenários 1 e 2



Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 - Impactos de formação de ozônio nos cenários 1 e 2



Fonte: Elaboração própria.

Na categoria de impacto Depleção de ozônio, os impactos encontrados foram iguais para ambos os cenários e, portanto, não foram representados graficamente. Com relação às outras categorias analisadas, as categorias Mudanças climáticas, Toxicidade humana, Ecotoxicidade e Acidificação mostraram menores impactos quando utilizadas as fontes de energia renováveis (cenário 1). Já as categorias Enriquecimento de nutrientes e Formação de ozônio fotoquímico apresentaram menores impactos quando utilizadas as fontes não renováveis.

#### 5.1.4. Interpretação

Os objetivos do estudo foram alcançados, uma vez que foi realizada a quantificação dos impactos ambientais das fases iniciais do ciclo de vida do ferronióbio, indicando os pontos críticos (hotspots). O principal hotspot encontrado foi o processo de produção de óxido de nióbio, principalmente com relação às categorias Mudanças climáticas e Ecotoxicidade. O escopo do projeto foi seguido durante todo o estudo, sendo considerados apenas os aspectos relacionados à produção de nióbio, realizando uma análise *cradle to gate*.

Além disso, as principais limitações encontradas para o desenvolvimento do estudo foram:

- Os dados que estavam disponíveis no *Gabi* para a formulação dos cenários;
- A união de dois métodos, EDIP 1997 e ILCD 2011, para levantar categorias de impacto;
- Dados de entrada poucos significativos na etapa de redução aluminotérmica do óxido de nióbio;
- Consideração dos cenários energéticos com divisão de 50% para cada uma das energias.

No que tange aos resultados dos cenários, é importante ressaltar que a diferença absoluta dos valores de impacto entre os cenários pode não ser tão significativa. Sendo assim, há uma oportunidade em verificar esta análise de significância em futuros estudos, tendo em vista que ela não está contemplada no escopo deste trabalho. Ademais, destaca-se também a oportunidade de levantar os motivos de o cenário de energia renovável apresentar menor impacto em 4 das categorias e maior impacto em 2 das categorias, se comparado ao cenário de energia não renovável.

A partir dos resultados levantados, é possível propor melhorias nos processos para mitigação de impactos ambientais. Algumas oportunidades levantadas pelo estudo foram as de:

- Ampliação da atuação na cadeia de valor;
- Recuperação dos materiais (logística reversa);
- Novos modelos de negócio circulares (recuperação de recursos, serviços e insumos circulares)
- Melhorias nos processos críticos (hotspots);

- Criação de métricas para os negócios, processos e demais produtos;
- Aplicação de princípios de EC na empresa e nível de maturidade.

## **5.2. Indicadores de circularidade**

O levantamento dos indicadores de circularidade foi desenvolvido em parceria com a Efigênia Rossi, como parte de sua tese de doutorado em Engenharia Ambiental, que está disponível em (ROSSI, 2020). Foram levantados, através de revisão bibliográfica, 30 indicadores de circularidade do nível micro. A partir disso, foram analisados quais consideravam as fontes de energia renováveis dentre seus critérios, e as informações obtidas estão representadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Análise dos indicadores no nível micro encontrados na literatura (Legenda: (✓) – considera as fontes de energia renováveis dentre os critérios)

(continua)

| <b>Indicador</b>                                  | <b>Formato</b>             | <b>Referência</b>                   | <b>Análise</b> |
|---------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------|
| BIM-based Whole-life Performance Estimator (BWPE) | Fórmulas para calcular     | (AKANBI et al., 2018)               |                |
| Building Circularity Indicators (BCI)             | Planilha dinâmica do excel | (VERBERNE, 2016)                    |                |
| Circular Economy Index (CEI)                      | Fórmulas para calcular     | (DI MAIO; REM, 2015)                |                |
| Circular Economy Indicator Prototype (CEIP)       | Planilha dinâmica do excel | (CAYZER; GRIFFITHS; BEGHETTO, 2017) | ✓              |
| Circular Economy Measurement Scale (CEMS)         | Fórmulas para calcular     | (NUNEZ-CACHO et al., 2018)          | ✓              |
| Circular Economy Performance Indicator (CEPI)     | Fórmulas para calcular     | (HUYSMAN et al., 2017)              |                |
| Circular Economy Toolkit (CET)                    | Website                    | (EVANS; BOCKEN, 2013)               |                |
| Circular Pathfinder (CP)                          | Website                    | (RESCOM, 2017a)                     |                |
| Circularity Calculator (CC)                       | Website                    | (RESCOM, 2017b)                     |                |
| Circularity Index (CI)                            | Fórmulas para calcular     | (CULLEN, 2017)                      |                |
| Circularity Potential Indicator (CPI)             | Planilha dinâmica do excel | (SAIDANI et al., 2017b)             |                |
| Closed Loop Calculator (CLC)                      | Ferramenta computacional   | (KINGFISHER, 2014)                  |                |

Tabela 8 - Análise dos indicadores no nível micro encontrados na literatura (Legenda: (✓) – considera as fontes de energia renováveis dentre os critérios)

(continua)

| <b>Indicador</b>                             | <b>Formato</b>             | <b>Referência</b>                          | <b>Análise</b> |
|----------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|----------------|
| Ease of Disassembly Metric (eDiM)            | Planilha dinâmica do excel | (VANEGAS et al., 2018)                     |                |
| Eco-efficient Value Ratio (EVR)              | Fórmulas para calcular     | (SCHEEPENS; VOGTLÄNDER; BREZET, 2016)      | ✓              |
| Economic-Environmental Indicators (EEI)      | Fórmulas para calcular     | (FREGONARA et al., 2017)                   | ✓              |
| Economic-environmental remanufacturing (EER) | Fórmulas para calcular     | (VAN LOON; VAN WASSENHOVE, 2018)           |                |
| End-of-Life Recycling Rates (EoL-RRs)        | Fórmulas para calcular     | (GRAEDEL et al., 2011)                     |                |
| Input-Output Balance Sheet (IOBS)            | Ferramenta computacional   | (MARCOCAPELLINI, 2017)                     | ✓              |
| Longevity and Circularity (L&C)              | Fórmulas para calcular     | (FIGGE et al., 2018)                       |                |
| Material Circularity Indicator (MCI)         | Planilha dinâmica do excel | (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION; GRANTA, 2015) |                |
| Material Reutilization Part (C2C)            | Fórmulas para calcular     | (C2C, 2014)                                | ✓              |
| Mine site MFA Indicator (MI)                 | Fórmulas para calcular     | (LÈBRE; CORDER; GOLEV, 2017)               |                |
| Multidimensional Indicator Set (MIS)         | Fórmulas para calcular     | (NELEN et al., 2014)                       |                |

Tabela 8 - Análise dos indicadores no nível micro encontrados na literatura (Legenda: (✓) – considera as fontes de energia renováveis dentre os critérios)

(conclusão)

| <b>Indicador</b>                                  | <b>Formato</b>           | <b>Referência</b>                        | <b>Análise</b> |
|---------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|----------------|
| Product-Level Circularity Metric (PCM)            | Fórmulas para calcular   | (LINDER; SARASINI; VAN LOON, 2017)       |                |
| Recycling Indices (RIs)                           | Ferramenta computacional | (VAN SCHAIK; REUTER, 2016)               |                |
| Recycling Rates (RRs)                             | Fórmulas para calcular   | (HAUPT; VADENBO; HELLWEG, 2017)          |                |
| Resource Duration Indicator (RDI)                 | Fórmulas para calcular   | (FRANKLIN-JOHNSON; FIGGE; CANNING, 2016) |                |
| Reuse Potential Indicator (RPI)                   | Fórmulas para calcular   | (PARK; CHERTOW, 2014)                    |                |
| Set of Indicators to Assess Sustainability (SIAS) | Fórmulas para calcular   | (GOLINSKA et al., 2015)                  |                |
| Sustainability Indicators (SI)                    | Fórmulas para calcular   | (MESA; ESPARRAGOZA; MAURY, 2018)         |                |

Fonte: Elaboração própria.

Analisando os 30 indicadores levantados, é possível observar que apenas quatro consideram as fontes de energia renováveis dentre seus critérios, sendo os mesmos Circular Economy Indicator Prototype (CEIP), Circular Economy Measurement Scale (CEMS), Eco-efficient Value Ratio (EVR), Economic-Environmental Indicators (EEI), Input-Output Balance Sheet (IOBS) e Material Reutilization Part (C2C). Todos os indicadores que consideram o fazem de forma quantitativa, ou seja, consideram os valores, ou porcentagem, do uso de fontes renováveis para a realização do cálculo da circularidade.

## 6. CONCLUSÃO

É possível concluir, portanto, que o processo de produção do nióbio apresenta como principal etapa crítica a fase de produção de óxido de nióbio, apresentando maior impacto nas categorias Mudanças climáticas e Ecotoxicidade. É imprescindível, portanto, que alguns processos sejam repensados, visando a diminuição dos impactos e dos recursos, garantindo a disponibilidade do minério e de outros materiais por muito mais tempo. Esse fato deve ser visto também como uma oportunidade de ampliação da atuação da cadeia de valor, aplicação de logística reversa e novos modelos de negócio circulares, além da implantação de métricas para constante acompanhamento das atividades e impactos.

A partir da análise de sensibilidade, foi possível notar uma diminuição de impacto em quatro das categorias analisadas (Mudanças climáticas, Toxicidade humana, Ecotoxicidade e Acidificação) quando utilizado o cenário de fontes de energia renovável, demonstrando a importância do uso das mesmas nos processos. Além disso, também foi possível observar um aumento de impacto em duas das categorias (Enriquecimento de nutrientes e Formação de ozônio fotoquímico).

Entretanto, destaca-se a importância de se realizar dois estudos adicionais a partir dos resultados obtidos neste trabalho: análise de significância da diferença absoluta entre os cenários nas categorias de impacto e análise de causa e efeito para entender o maior ou menor impacto entre os cenários.

Com relação aos indicadores de circularidade, apesar de o uso de fontes renováveis ser um princípio relevante para a economia circular, apenas seis dos trinta indicadores levantados consideram as fontes de energia renováveis dentre seus critérios (20%), demonstrando a importância de aperfeiçoar e desenvolver novos indicadores, inclusive para apoiar a formulação, entendimento e propostas de melhoria em avaliações de ciclo de vida.

## REFERÊNCIA

- AKANBI, L. A. et al. Salvaging building materials in a circular economy: a BIM-based whole-life performance estimator. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 175–186, Feb. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14040**: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14044**: gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.
- BARE, J. C.; GLORIA, T. P. Environmental impact assessment taxonomy providing comprehensive coverage of midpoints, endpoints, damages, and areas of protection. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 10, p. 1021–1035, July 2008.
- BARROS, M.; PIEKARSKI, C.; DE FRANCISCO, A. Carbon footprint of electricity generation in Brazil: an analysis of the 2016–2026 period. **Energies**, v. 11, n. 6, p. 1412, 2018.
- BARROS, M.V. et al. Life cycle assessment of electricity generation: a review of the characteristics of existing literature. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.25, p. 36-54, 2020.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário mineral 2015**. Brasília: DNPM, 2016.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Relatório técnico 78**: análise-síntese da mineração brasileira. Brasília, MME, 2010. Consultor E. Braz. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P11\\_RT20\\_Perfil\\_de\\_Minexo\\_do\\_Nixbio.pdf/48860760-63f2-489e-b4b9-e16236fd1413](http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1256650/P11_RT20_Perfil_de_Minexo_do_Nixbio.pdf/48860760-63f2-489e-b4b9-e16236fd1413). Acesso em 24 set. 2018.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético nacional 2020**. Brasília: MME, 2021.

C2C – CENTRE. **Impact study**: technical report—pilot study impact study of the cradle to cradle certified products program. Venlo: Cradle to Cradle Products Information Institute, 2014. Disponível em: [www.c2ccertified.org/impact-study](http://www.c2ccertified.org/impact-study). Acesso em: 19 abr. 2018.

CAVALETT, O. et al. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 647-658, 2013.

CAYZER, S.; GRIFFITHS, P.; BEGHETTO, V. Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 10, n. 4–5, p. 289–298, 2017.

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL. **Manual de usinas de beneficiamento**. Rio de Janeiro, CTM, 1989.

COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO. **Nióbio e Produtos CBMM**. 2018. Disponível em: <http://cbmm.com.br/pt/Paginas/niobium.aspx>. Acesso em: 10 abr. 2018.

COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO. **Relatório de Sustentabilidade 2020**. Araxá: CBMM, 2020.

CULLEN, J. M. Circular economy: theoretical benchmark or perpetual motion machine?. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 483–486, June 2017.

DIÁLOGOS SETORIAIS UE-BRASIL. **Estudo das cadeias produtivas dos materiais críticos: oportunidades e ameaças da economia circular**. Rio de Janeiro, 2020. (Relatório Técnico Final).

DI MAIO, F.; REM, P. C. A Robust indicator for promoting circular economy through recycling. **Journal of Environmental Protection**, v. 6, n. 10, p. 1095-1104, Oct. 2015.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY. **Circular economy in Europe: developing the knowledge base**. Copenhagen: EEA, 2016. (EEA Report).

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy**. 2014.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION; GRANTA DESIGN. **Circularity indicators: an approach to measuring circularity**. 2015.

EVANS, J.; BOCKEN, N. **Circular economy toolkit**. 2013. Disponível em: <http://www.circulareconomytoolkit.com>. Acesso em: 19 abr. 2018.

FIGGE, F. et al. Longevity and circularity as indicators of eco-efficient resource use in the circular economy. **Ecological Economics**, v. 150, p. 297–306, 2018.

FINNVEDEN, G. et al. Recent developments in life cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 1, p. 1–21, 2009.

FRANKLIN-JOHNSON, E.; FIGGE, F.; CANNING, L. Resource duration as a managerial indicator for Circular economy performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 589–598, 2016.

FRANZEN, A.; MADER, S. The Development of global CO2 emissions. *In*:

FRANZEN, A.; MADER, S. (Ed.). **Research handbook on environmental sociology**. Cheltenham: Edward Elgar, 2021.

FREGONARA, E. et al. Economic-environmental indicators to support investment decisions: a focus on the buildings' end-of-life stage. **Buildings**, v. 7, n. 3, p. 65-85, July 2017.

FURTADO, J. M. S. **Comparação de métodos e ferramentas de análise de impacto de ciclo de vida, aplicados a processos químicos alternativos**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Instituto Técnico Lisboa, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2014.

GOEDKOOPE M. et al. ReCiPe 2008: **A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level / Report I: Characterization**. Holanda: Ministerie van VROM, Den Haag, 2009.

GOLINSKA, P. et al. Grey decision making as a tool for the classification of the sustainability level of remanufacturing companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 28–40, Oct. 2015.

GRAEDEL, T. E. et al. What do we know about metal recycling rates?. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 3, p. 355–366, June 2011.

HAAS, W. et al. How circular is the global economy? An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European union and the world in 2005. **Journal of Industrial Ecology**, v. 19, n. 5, p. 765–777, 2015.

HAUPT, M.; VADENBO, C.; HELLWEG, S. Do We have the right performance indicators for the circular economy? insight into the swiss waste management system. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 615–627, June, 2017.

HAUSCHILD, M. Z. et al. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, p. 683-697, 2013.

HELLWEG, S.; MILA I CANALS, L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1109–1113, 2014.

HUYSMAN, S. et al. Performance indicators for a circular economy: a case study on post-industrial plastic waste. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 120, p. 46–54, May 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Setor mineral 2021**. Brasília: IBRAM, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Renewable energy sources and climate change mitigation**. Geneva: IPCC, 2011.

JOINT RESEARCH CENTER-EUROPEAN COMMISSION. **ILCD Handbook: analysing of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment**, 2010. Disponível em: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2018.

JOINT RESEARCH CENTER-EUROPEAN COMMISSION. **ILCD Handbook: recommendations for life cycle impact assessment in the european contexto – based on existing environmental impact assessment models and factors**. Luxemburgo: Publications Office of European Union, 2011.

JOINT RESEARCH CENTER-EUROPEAN COMMISSION. **Characterisation factors of the ILCD recommended life cycle impact assessment methods: database and supporting information**. Luxemburgo: Publications Office of European Union, 2012.

KINGFISHER: the business opportunity of closed loop innovation. 2014. Disponível em:

[https://www.kingfisher.com/sustainability/files/downloads/kingfisher\\_closed\\_loop\\_innovation.pdf](https://www.kingfisher.com/sustainability/files/downloads/kingfisher_closed_loop_innovation.pdf). Acesso em: 15 mar. 2018.

KREKHOVETCKII, N. **Economic and environmental aspects of niobium recycling**. Finlândia: Lappeenranta University of Technology, 2018.

LÈBRE, É.; CORDER, G.; GOLEV, A. The Role of the mining industry in a circular economy: a framework for resource management at the mine site level. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 662–672, June 2017.

LINDER, M.; SARASINI, S.; VAN LOON, P. A Metric for quantifying product-level circularity. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 545–558, June 2017.

LONCA, G. et al. Does material circularity rhyme with environmental efficiency? Case studies on used tires. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 424–435, May 2018.

MAHMUD, M. A. P. et al. life-cycle impact assessment of renewable electricity generation systems in the United States. **Renewable Energy**, v. 151, n. 7, p. 1028–1045, 2020.

MARCOCAPELLINI. **Measuring the products circularity**. 2017. Disponível em: <https://www.capcon.it/en/measuring-the-products-circularity-meeting-at-italian-council-presidency>. Acesso em: 12 abr. 2018.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production Journal**, v. 26, n. 1, p. 160–175, 2015.

MESA, J.; ESPARRAGOZA, I.; MAURY, H. Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model. **Journal of Cleaner Production**, v. 196, p. 1429–1442, Sept. 2018.

NELEN, D. et al. A Multidimensional indicator set to assess the benefits of WEEE material recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 305–316, Nov. 2014.

NUNEZ-CACHO, P. et al. What gets measured, gets done: development of a circular economy measurement scale for building industry. **Sustainability**, v. 10, n. 7, July 2018. DOI: 10.3390/su10072340.

NUSS, P.; ECKELMAN, M. J. Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis. **PLoS ONE**, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>.

OLABI, A. G.; ABDELKAREEM, M.A. Renewable energy and climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 158, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112111.

OLIVEIRA, J. F. G.; TRINDADE, T. C. G. Sustainability performance evaluation of renewable energy sources: the case of Brazil. Berlin: Springer, 2018.

OUR WORLD IN DATA. Energy mix. 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/energy-mix>. Acesso em: 15 maio 2022.

PARK, J.; CHERTOW, M. R. Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. **Journal of Environmental Management**, v. 137, p. 45–53, May 2014.

PEREIRA JÚNIOR, R. F. **Nióbio**. [S.l.:s.n.], 2012.

PIEKARSKI, C. M. et al. Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, n. 3, p. 220-240, nov. 2012.

REBITZER, G. et al. Life cycle assessment part 1: framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, v. 30, n. 5, p. 701–720, 2004.

RESCOM. Circular pathfinder. 2017a. Disponível em: <https://rescomd58.eurostep.com/idealco/pathfinder>. Acesso em: 10 mar. 2018.

RESCOM. Circularity calculator. 2017b. Disponível em: <http://www.circularitycalculator.com>. Acesso em: 10 mar. 2018.

ROSSI, E. **Avaliação do Ciclo de Vida da Brita Para a Construção Civil**: estudo de caso. São Carlos, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

ROSSI, E. **Desenvolvimento e aplicação de indicadores e índice de produtos e de modelos de negócio para a Economia Circular**. Dissertação (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

SAIDANI, M. et al. How to assess product performance in the circular economy? Proposed requirements for the design of a circularity measurement framework. **Recycling**, v. 2, n. 1, 2017a. DOI: <https://doi.org/103390/recycling2010006>.

SAIDANI, M. et al. Hybrid top-down and bottom-up framework to measure products' circularity performance. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING DESIGN*, 2017b, Vancouver. **Proceedings [...]**. Hall Id: hal-01571581.

SCHEEPENS, A. E.; VOGTLÄNDER, J. G.; BREZET, J. C. Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: making water tourism more sustainable. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 257–268, 2016.

SHI, J. et al. Knowledge as a driver of public perceptions about climate change reassessed. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 759–762, 2016.

SILVA, D. A. L. S. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SOUSA, R. M. F.; FERNANDES, L.; GUERRA, W. Nióbio. **Química Nova na Escola**. V. 35, n. 1, p. 68-69, fev. 2013. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/?agrep=jbcs,qn,qnesc,qnint,rvq>. Acesso em: 20 mar. 2018.

STRANDDORF H.K.; HOFFMANN L.; SCHMIDT A. **LCA technical report: Impact categories, normalisation and weighting in LCA**. Update on selected EDIP97-data. FORCE Technology, Denmark. 2003.

STROTHMAN, P.; SONNEMANN, G. **Circular economy, resource efficiency, life cycle innovation: same objectives, same impacts?** *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 22, No. 8, pp. 1327–1328. 2017.

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 247–260, jan. 2012.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos estudos CEBRAP**, n. 79, p. 47–69, nov. 2007.

UCHIYAMA, Y. Life cycle assessment of renewable energy generation technologies. **IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, v. 2, n. 1, p. 44- 48, Dec. 2006.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral commodity summaries**. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3133/mcs2022>.

VAN LOON, P.; VAN WASSENHOVE, L. N. Assessing the economic and environmental impact of remanufacturing: a decision support tool for OEM suppliers. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 4, p. 1662–1674, Feb. 2018.

VAN SCHAIK, A.; REUTER, M. A. Recycling indices visualizing the performance of the circular economy. **World of Metallurgy – ERZMETALL**, v. 69, n. 4, p. 201–216, July 2016.

VANEGAS, P. et al. Ease of disassembly of products to support circular economy strategies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, p. 323–334, 2018.

VERBERNE, J. J. H. **Building circularity indicators an approach for measuring circularity of a building**. 2016. Thesis (MSc) - Eindhoven University of Technology, Holanda, 2016.

WENZEL, H.; HAUSCHILD M. Z.; ALTING L. **Environmental assessment in product development**. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 1997.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World energy resources 2016**. Londres, 2016.

YUAN, Z.; BI, J.; MORIGUICHI, Y. The Circular economy: a new development strategy in China. **Journal of Industrial Ecology**, v. 10, n. ½, p. 4-8, Feb. 2006.