

# Série Estudos e Documentos

## Avaliação do Ciclo de Vida na Mineração: Estudos da produção de minério de ferro

Giancarlo Alfonso Lovón-Canchumani

Francisco Mariano da Rocha de Souza Lima

Pedro Palhano de Oliveira

# **SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS**

**Avaliação do Ciclo de Vida na Mineração: Estudo da produção de minério de ferro**

## **PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA**

**Dilma Vana Rousseff**

Presidente

**Michel Miguel Elias Temer Lulia**

Vice-Presidente

## **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO**

**Celso Pansera**

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação

**Emília Maria Silva Ribeiro Curi**

Secretária-Executiva

**Kayo Julio Cesar Pereira**

Coordenador-Geral das Unidades de Pesquisa

## **CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL**

**Fernando Antonio Freitas Lins**

Diretor

**Arnaldo Alcover Neto**

Coordenador de Análises Minerais

**Claudio Luiz Schneider**

Coordenador de Processos Minerais

**Durval Costa Reis**

Coordenador de Administração

**Cosme Antonio de Moraes Regly**

Coordenador de Planejamento, Gestão e Inovação

**Francisco Wilson Hollanda Vidal**

Coordenador de Apoio Tecnológico às Micro e Pequenas Empresas

**Ronaldo Luiz Corrêa dos Santos**

Coordenador de Processos Metalúrgicos e Ambientais

# **SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS**

ISSN 0103-6319

ISBN – 978-85-8261-045-9

**SED - 89**

## **Avaliação do Ciclo de Vida na Mineração: Estudo da produção de minério de ferro**

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

Administrador de Empresas, D.Sc. em Planejamento Energético e Ambiental pela COPPE-UFRJ.

### **Francisco Mariano da Rocha de Souza Lima**

Eng. Metalúrgico e Industrial, D.Sc. em Engenharia Mineral pela POLI-USP.

### **Pedro Palhano de Oliveira**

Bolsista de PIBIC do CETEM/MCTI.

**CETEM/MCTI**

2015

## **SÉRIE ESTUDOS E DOCUMENTOS**

**Carlos Cesar Peiter**

Editor

**Ana Maria Botelho M. da Cunha**

Subeditora

### **CONSELHO EDITORIAL**

Francisco R. C. Fernandes (CETEM), Gilson Ezequiel Ferreira (CETEM), Alfredo Ruy Barbosa (consultor), Gilberto Dias Calaes (ConDet), José Mário Coelho (CPRM), Rupen Adamian (UFRJ).

A Série Estudos e Documentos publica trabalhos na área minerometalúrgica. Tem como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes dos projetos desenvolvidos no CETEM.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

**Valéria Cristina de Souza**

Coordenação Editorial

**João Henrique de Castro Rocha**

Programação Visual

**Valéria Cristina de Souza**

Editoração Eletrônica

**Andrezza Milheiro**

Revisão

---

Lovón-Canchumani, Giancarlo Alfonso

Avaliação do ciclo de vida na mineração: estudos da produção de minério de ferro / Giancarlo Alfonso Lovón-Canchumani [et al.]. —Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2015.

80p.: il (Série Estudos e Documentos, 89)

1. Pelotização. 2. Avaliação de impacto ambiental. I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Lima, Francisco Mariano da R. de Souza. III. Oliveira, Pedro Palhano. IV. Título. V. Série.

---

CDD – 622.7

---

# SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| RESUMO   | 7  |
| ABSTRACT   | 8  |
| 1   INTRODUÇÃO   | 9  |
| 2   AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)                         | 12 |
| 2.1   A ACV no Âmbito Internacional                          | 12 |
| 2.2   A ACV no Brasil  | 14 |
| 2.3   Metodologias de ACV                                    | 17 |
| 2.4   ACV na Mineração                                       | 20 |
| 2.5   Desafios e Limitações das Metodologias de ACV          | 29 |
| 3   EXPERIMENTAL   | 35 |
| 3.1   Desenho da Pesquisa                                    | 35 |
| 3.2   Definição do Escopo do Estudo de Caso                  | 40 |
| 3.3   Inventário de Ciclo de Vida                            | 43 |
| 3.4   Método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida - AICV | 44 |
| 4   RESULTADOS E DISCUSSÕES                                  | 46 |
| 4.1   Inventário de Ciclo de Vida                            | 46 |
| 4.2   Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida                  | 50 |
| 4.3   Interpretação dos Resultados da AICV                   | 58 |
| 5   CONSIDERAÇÕES FINAIS                                     | 72 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS                                   | 74 |



## **RESUMO**

A indústria da mineração do ferro brasileira ocupa posição relevante no cenário mundial, exportando para os principais mercados. Esta indústria tem consumo elevado de recursos e de energia, o que conseqüentemente gera grandes quantidades de emissões, líquidas e sólidas, contaminantes do meio ambiente. Nesse contexto, destaca-se a importância de se realizar estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), ferramenta de avaliação do impacto ambiental associado a um produto ou processo, desde a retirada das matérias-primas oriundas da natureza que entram no sistema produtivo até a disposição do produto final após uso. O estudo avalia os impactos ambientais associados à produção de pelotas de minério de ferro, através de um estudo de caso, utilizando a metodologia de ACV baseado na norma ISO 14040. Os dados utilizados foram coletados a partir de visitas técnicas e relatórios de produção do caso de estudo. De acordo com os resultados obtidos, os principais impactos ambientais do processo de pelotização são referentes às categorias de formação fotoquímica, acidificação terrestre e ocupação da terra urbana. O processo de beneficiamento é relevante nas categorias de ocupação da terra agrícola, ecotoxicidade terrestre e da água. Quanto ao processo de lavra, os impactos mais relevantes apontam para material particulado e a depleção de recursos naturais.

### **Palavras-chave**

Avaliação do ciclo de vida - ACV, pelotização, avaliação de impacto ambiental.



## **ABSTRACT**

The Brazilian iron ore mining industry occupies a relevant position internationally, exporting to the main consumer markets. The industry consumes high quantities of energy resources, which in turn, generates large amounts of liquid and solid emissions that are contaminating the environment. In this context, we emphasize importance of carrying out a Life Cycle Analysis (LCA), which is a tool to evaluates the environmental impact associated to a product or process. The LCA collect the information from the raw materials present in nature through beneficiation system until the final disposal of the product after use. The objective of the study is to increase the knowledge of LCA applied to the mining sector, and more specifically, the iron ore mining sector. Moreover, this study evaluates the environmental impact associated to the production of iron ore pellets, by means of a case study using the Life Cycle Analysis (LCA) methodology, which is based on standard ISO 14040. The data used was collected during technical visits and production reports by the company being studied. According to the results obtained, the main environmental impact derived from pelletizing refers to the categories of photochemical formation, terrestrial acidification and urban land occupation. The beneficiating process is relevant in the Agricultural Land Occupation, Terrestrial Ecotoxicity and Freshwater Ecotoxicity categories. As for the mining process, the most relevant impact factors point at Particulate Matter and depletion of natural resources.

### **Keywords**

Life cycle analysis – LCA, pelletization, environmental impact evaluation.

## 1 | INTRODUÇÃO

O setor mineral tem consumo elevado de recursos naturais e energia, o que conseqüentemente gera grandes quantidades de emissões gasosas, líquidas e sólidas, contaminantes do meio ambiente. É de grande importância fazer uma avaliação do setor no que se refere às questões ambientais, tornando-se necessário conhecer, quantificar e qualificar os recursos utilizados, os resíduos, bem como as emissões geradas.

Nesse contexto, destaca-se a importância de se realizar estudos de Avaliação do Ciclo de Vida - ACV aplicados ao setor mineral. A ACV é um instrumento de avaliação do impacto ambiental associado a um produto ou processo, que compreende etapas. Estas etapas vão desde a retirada das matérias-primas, elementares da natureza, que entram no sistema produtivo (berço) até a disposição do produto final após uso (túmulo). A ACV tem se mostrado um dos métodos mais promissoras para avaliar e classificar os aspectos e impactos ambientais de um produto (BLENGINI *et al.* 2012).

Awuah-Offei e Adekpedjou (2011), em um artigo sobre a ACV em mineração, ressaltam que apesar da crescente aplicação da ACV na avaliação de sistemas e produtos em geral, ocorre uma limitação do seu uso para o setor mineral. Os autores recomendam que pesquisas sejam realizadas em parcerias empresas-universidades para o desenvolvimento de uma metodologia específica de ACV em mineração, que permita a análise da sensibilidade e incertezas associadas com a coleta de dados cobrindo as dimensões espacial e temporal.

Para Durucan *et al.* (2006) o número limitado de ACV de mineração é devido à falta de análise do ciclo de vida no setor industrial. Os autores consideram que pouco tem sido feito para melhorar a qualidade dos dados dos processos de mineração, denotando que alguns fatores de relevante impacto ambiental são raramente levados em consideração.

No que se refere especificamente à indústria de minério de ferro, ainda é necessário dispor de estudos e bancos de dados consolidados que representem a real dimensão dos impactos ambientais da cadeia produtiva.

A experiência internacional na realização de ACV na produção do minério de ferro é ainda pouco aprofundada. Em geral, a abordagem ao referido minério é realizada como insumo em estudos de ACV da produção de aço. (MARKUS ENGINEERING SERVICES, 2002; CHEN, YANG, & OUYANG, 2011; BURCHART-KOROL, 2013).

Nesse sentido, o presente estudo tem por objetivo aprofundar o conhecimento sobre ACV aplicados ao setor mineral, especificamente ao setor de minério de ferro. O estudo avalia os impactos ambientais associados à produção de pelotas de minério de ferro, através de um estudo de caso, utilizando a metodologia de (ACV), baseado na norma ISO 14040. A unidade funcional foi definida como uma tonelada de pelotas de minério de ferro e os dados utilizados foram coletados a partir de visitas técnicas e relatórios de produção da empresa em estudo.

O trabalho está dividido em 5 capítulos. Após a introdução, o Capítulo 2 apresenta o estado da arte da avaliação do ciclo de vida, seu contexto histórico, aplicação ao setor mineral e principais limitações da aplicação da ACV. O Capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada no estudo, definição de escopo, modelagem do sistema e metodologia utilizada para avaliação de impacto. O Capítulo 4 apresenta os resultados do estudo de caso da ACV aplicado à produção de pelotas de minério de ferro e interpretação dos resultados. No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais do estudo.

## 2 | AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

### 2.1 | A ACV no Âmbito Internacional

A primeira ferramenta a quantificar energia, materiais e consequências ambientais ao longo do ciclo de vida de um produto foi criada em 1970, nos EUA, sob o nome de *Resources and Environmental Profile Analysis* (REPA), utilizada inicialmente para avaliar opções de embalagens para a Coca-Cola (ZOCHE, 2014; LOVÓN-CANCHUMANI, 2013; LIMA, 2007).

Entre as décadas de 70 e 90, algumas iniciativas de ACV ocorreram, no entanto, com abordagens e terminologias diversas, o que acabou limitando a aplicação da metodologia de ACV nesse período (ARAÚJO, 2013; CANCHUMANI, 2013).

O esforço de padronização na década seguinte assegurou o fortalecimento da ACV como uma ferramenta da gestão ambiental. Foi na década de 90 que se deu a publicação das normas da série ISO 14040, resultado da convergência conduzida pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC). Nesse período, também foram consolidados os softwares e banco de dados que foram, então, disponibilizados comercialmente, permitindo uma maior disseminação da metodologia (LIMA, 2007).

A partir de 2000, ocorreu um período de elaboração, incentivado pela SETAC pelo *United Nations Environmental Programme* (UNEP), como o programa “*Life Cycle Initiative*” (LCI). O objetivo do LCI era a disseminação do conceito de Filosofia do Ciclo de Vida. É desse mesmo período o manual de Guinée e colegas da Universidade de Leiden (Holanda), detalhando as normas ISO 14040 (ARAÚJO, 2013; LOVÓN-CANCHUMANI, 2013; LIMA, 2007).

Após esse período, o conceito de ACV foi se incorporando às políticas regionais e às Políticas Integradas de Produtos. Além disso, sob a demanda do Plano de Ação de Consumo e Produção Sustentável de assegurar qualidade e consistência para os dados, o *Institute of Environmental and Sustainability* do JRC/EC elaborou os manuais ILCD, *International Reference Life Cycle Data System*, que se tornaram referência mundial em banco de dados para ACV (ARAÚJO, 2013; LOVÓN-CANCHUMANI, 201; LIMA, 2007).

Nesse período, a aplicação da ACV mudou do nível micro para abarcar também o nível macro. Além disso, passou também de uma abordagem simplesmente descritiva dos processos (chamada de atribucional) para um enfoque também voltado à análise das possíveis consequências no mercado a partir de processos alternativos (chamada abordagem consequential) (ARAÚJO, 2013).

Hoje, várias novas abordagens para a ACV ainda têm surgido. A maioria tem o intuito de reduzir as incertezas associadas à ferramenta, tanto por meio de ferramentas de análise de incerteza, como com a aquisição de dados regionais adicionais, com o uso inclusive de dados georreferenciados (HELLWEG & CANALS, 2014).

Há também as abordagens visando à ampliação dos aspectos contemplados na metodologia, como a consideração dos efeitos *boomerang* (também conhecidos como *rebound effects*) e a inserção das variáveis social e econômica – além da ambiental tradicional (HELLWEG & CANALS, 2014).

## 2.2 | A ACV no Brasil

No Brasil, a história da ACV começa com a criação, em 1994, do subcomitê de ACV pelo Grupo de Apoio à Normalização Ambiental (GANNA) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Estabelecido a partir dos esforços de empresas, associações e entidades representativas de importantes segmentos econômicos e técnicos do país, o GANNA tinha como objetivo acompanhar e analisar os trabalhos desenvolvidos pelo Comitê Técnico 207 da ISO e avaliar o impacto das normas ambientais em elaboração nas organizações brasileiras (ZOCCHÉ, 2014; LOVÓN-CANCHUMANI, 2011; LIMA, 2007).

Outro importante marco da ACV no Brasil foi o lançamento do primeiro livro sobre essa temática, escrito originalmente em português, com o título, “Análise de Ciclo de Vida de Produtos – Ferramenta Gerencial da ISO 14000”. Nele, o autor, José Ribamar Chehebe, explica e comenta as normas da série ISO relativas à ACV (LIMA, 2007).

O primeiro estudo de ACV completo foi desenvolvido em caráter confidencial pelo Centro de Tecnologia de Embalagem (CETEA) do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), denominado “Análise do Ciclo de Vida de embalagens para o mercado brasileiro”, que decorreu entre o período de 1997 a 2000 (LIMA, 2007).

No ano de 2001, foi lançada pela ABNT a tradução da primeira norma da ISO da série 14040 (NBRISO 14040). A intenção era fazer com que empresas e instituições brasileiras passassem a implementar essa ferramenta como uma técnica para a avaliação dos seus processos produtivos sempre sobre com um foco ambiental.

A partir da necessidade de algumas intuições, entidades e empresas discutirem as questões relativas à Avaliação do Ciclo de Vida, foi criada, em 2002, a Associação Brasileira do Ciclo de Vida (ABCV). Os principais atos dessa associação foram a coordenação da “Conferência Internacional de Avaliação de Ciclo de Vida (CIACV)” em 2007, em São Paulo, e a realização de *workshops* sobre a temática no eixo Rio - São Paulo. Em 2008, foi realizado o primeiro Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida em Curitiba (LIMA, 2007).

A primeira proposta de criação de base de dados de inventário de ciclo de vida brasileira foi em 2006, com o objetivo de diminuir os custos desse processo na ACV e, principalmente, prover uma base metodológica que torne comparáveis as avaliações de produtos e processos equivalentes realizadas por diferentes atores. Isso porque, apesar da metodologia preconizada pelas normas ISO 14040, a coleta e a análise de informações dependiam de fatores técnicos diversos, o que conduzia cada especialista a adotar métodos próprios de coleta, análise e avaliação de impacto (CANCHUMANI, 2013; LIMA, 2007). Chamado de Sistema Brasileiro de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil), a sua primeira versão saiu em 2009 com um inventário piloto para o óleo diesel brasileiro.

Já em 2010, foi criado, no âmbito do Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (SINMETRO), o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV) para dar continuidade e sustentabilidade às ações de ACV no Brasil, com vistas ao desenvolvimento sustentável e à competitividade ambiental da produção industrial brasileira nos mercados interno e externo (INMETRO, 2010).



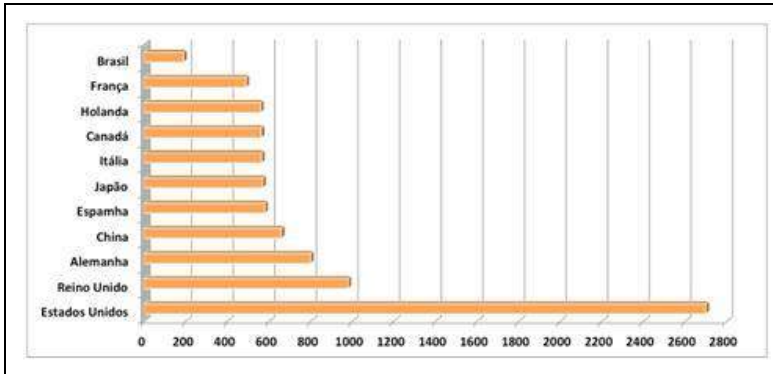
A segunda versão do repositório de inventário do Brasil, SICV Brasil, foi concluída em 2011. Ano em que foi editado o livro Ontologia Terminológica em ACV e no qual ocorreu a primeira reunião do Comitê Gestor do PBACV.

Atualmente, o cenário mundial da ACV continua profícuo. O número de aplicações se multiplicou, assim como aumentaram o número de bases de dados, de *software* e de métodos de avaliação de impacto. Estados Unidos é o país que mais produz estudos de ACV, com mais de 2500 já desenvolvidos. No Brasil, contudo, a situação ainda é desfavorável, na Figura 1 será exposta a quantidade de estudos de ACV dos dez primeiros países e do Brasil que está no 19º lugar.

Das quase 200 pesquisas acadêmicas (mestrado e doutorado) em ACV realizadas no país desde 1997, quase 85% abordam aplicações de ACV em alguma área do conhecimento ou apenas a etapa do inventário de ciclo de vida<sup>1</sup>. Da mesma forma, a maior parte está voltada à energia (combustível, indústria de carvão, usina sucroalcooleira, etc.), à indústria química (farmoquímica, resíduos, fertilizantes, etc.) e à construção civil (ZOCHE, 2014; MORETTI & UGAYA, 2010).

---

<sup>1</sup>Os 15% restantes abordam aspectos metodológicos (ZOCHE 2014).



Fonte: ZOCCHÉ (2014).

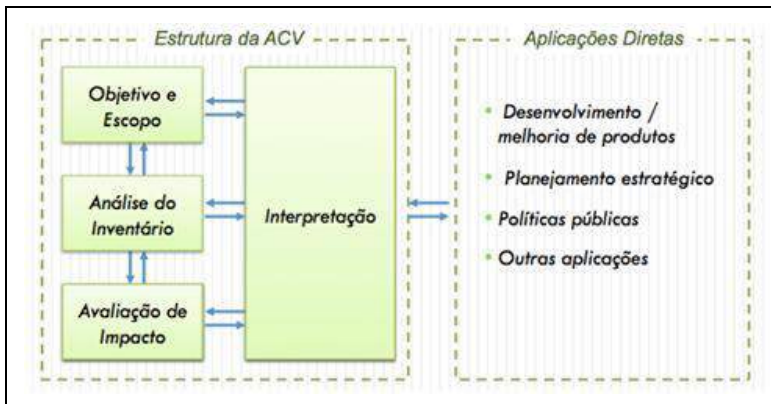
**Figura 1.** Quantidade de estudos de ACV por país.

### 2.3 | Metodologias de ACV

A metodologia da ACV é estruturada e normatizada internacionalmente pela Organização Internacional para Padronização (ISO) nas ISO 14040 e 14044. Estas foram adaptadas pelo Brasil em 2009 e são consideradas as principais e mais importantes normas para avaliação ambiental baseadas no ciclo de vida do produto (ZOCCHÉ, 2014; ABNT, 2009).

Enquanto a ISO 14044 detalha os requisitos e orientações para a realização dos estudos de ACV, a ISO 14040 é a base metodológica que fundamenta todas as metodologias de ACV utilizadas mundialmente. A diversidade de métodos e abordagens existentes atualmente são adequações da ISO 14040 para melhorar a representatividade dos resultados.

As quatro fases preconizadas na ISO 14040 para a realização da ACV são (1) definição de objetivo e escopo, (2) análise de inventário, (3) avaliação de impactos e (4) interpretação de resultados. Na Figura 2 apresenta a estrutura de ACV:



Fonte: ABNT/NBR ISO 14040 (2009).

**Figura 2.** Estrutura Metodologica de Avaliação do Ciclo de Vida - ACV

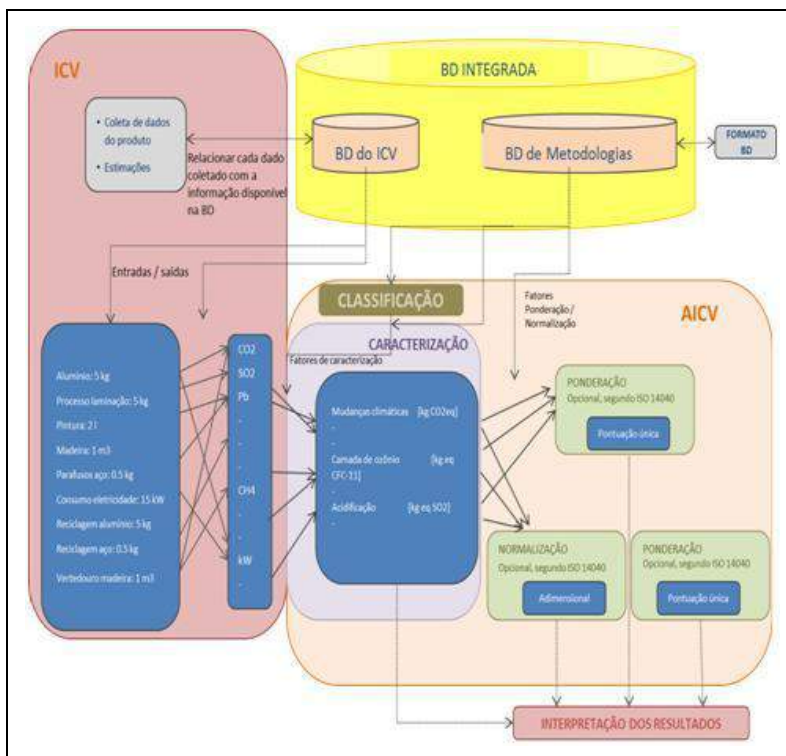
Quando se fala de bases de dados (BD) no âmbito da ACV, podemos distinguir até dois tipos que dependerão da informação que eles contêm (IHOBE, 2009):

- BD com as entradas/saída usadas para simular o sistema inventariado. Comumente chamados de BD de Inventário de Ciclo de Vida (ICV), esse tipo de BD é formado por uma variedade de dados de materiais e processos, geralmente agrupados de acordo com a fase do ciclo de vida a que se referem. Por meio desses bancos de dados, podem ser atribuídas uma série de dados a cada conjunto de entrada/saída contendo informações sobre seus impactos ambientais, fatores de caracterização, etc.;

- BD com os dados que cada metodologia de Avaliação Inventário de Ciclo de Vida (AICV) necessita para realizar os cálculos necessários à avaliação de impactos. Consiste em fatores de caracterização, ponderação e demais dados que viabilizem os cálculos e resultados de cada metodologia de AICV.

Em geral, as BDs podem ser integradas contendo tanto BD de ICV como de metodologias. Elas também podem conter dados de vários setores ou ser específicas de uma determinada aplicação em um setor. Em muitos casos, é possível criar ou modificar uma base de dados de um setor existente e facilitar o detalhamento para execução do projeto ou aplicação em questão (IHOBE, 2009).

Assim, devido ao elevado volume de dados a serem gerenciados nas fases de análise de ICV e AICV, *software* foram desenvolvidos com o objetivo de dar suporte aos estudos de ACV. Os *software* de ACV mais utilizados mundialmente são SimaPro, KCL-ECO, LCAIT; GaBi, PEMS, e Umberto (IHOBE, 2009). Já os estudos brasileiros utilizam majoritariamente SimaPro 8, Gabi4 e Umberto (ZOCCHÉ, 2014; ARAUJO, 2013). A Figura 3 a seguir apresenta esquema que resume o processo de ACV fases e outras informações relacionadas.



Fonte: Adaptado IHOBE (2009).

**Figura 3.** Esquema conceitual de um processo de ACV.

## 2.4 | ACV na Mineração

Iniciativas de ACV no setor mineiro são conhecidas desde o ano 1999. Azapagic & Clift (1999) realizaram um estudo com o objetivo otimizar o processo de mineração e beneficiamento do Boro. Foi utilizada a técnica de otimização multipropósito (OM), onde os processos são otimizados mediante um número de

funções objetivo ambientais, definidas e quantificadas por meio da abordagem ACV. Tal enfoque auxiliou na tomada de decisão com relação à escolha do melhor desempenho ambiental do sistema. Os aspectos socioeconômicos também foram considerados neste estudo.

Azapagic & Clift (1999) mostraram, portanto, que a OM, juntamente com a ACV, poderiam culminar numa ferramenta poderosa para equilibrar o desempenho ambiental e econômico dos processos de produção, permitindo, assim, a escolha da melhor opção técnica disponível em termos ambientais, sem implicar em custos excessivos.

Para Durucan *et al.* (2006) o número limitado de ACV de mineração é devido à falta de análise do ciclo de vida no setor industrial. No modelo de ACV para mineração LICYMIN, desenvolvido pelo *Imperial College* entre outros centros de pesquisa, Durucan *et al.* (2006) aditam que é prática comum nos estudos de ACV o uso de dados predefinidos para a representação de sistemas de produção da mineração. Consideram que pouco tem sido feito para melhorar a qualidade dos dados dos processos de mineração, denotando que alguns fatores de relevante impacto ambiental são raramente levados em consideração. Ressaltam que há omissões como o esforço de exploração do minério, especificidades dos métodos de exploração da mina, as perdas de minério na exploração, entre outros fatores que são importantes nos processos e resultam em liberação de emissões para o meio ambiente.

Norgate & Haque (2010), em uma pesquisa sobre impactos ambientais na mineração, recomendam que esforços sejam realizados nos processos de transporte e carregamento na mineração de ferro e bauxita, e no processo de moagem na mineração de cobre. Reid *et al.* (2009) modelaram cenários para uma mina subterrânea de zinco e cobre em Quebec – Canadá ressaltando a importância do impacto referente à mudança do uso da terra.

Usualmente, dados oriundos de matrizes *Input/Output* e estatísticas são usados para preencher lacunas dos dados primários (CURRAN, 2006).

Em 2011, Awuah-Offei & Adekpedjou (2011) realizaram uma avaliação de vários estudos prévios sobre avaliação de ciclo de vida no setor mineiro e concluíram que a aplicação dessa ferramenta no setor era ainda limitada, além de terem identificado um número reduzido de pesquisas.

Os estudos analisados pelos referidos autores evidenciaram que o sistema de mineração é muitas vezes representado como uma caixa preta, não se prestando à interpretação dos diferentes processos utilizados na produção de carvão ou de outros minerais. Observaram ainda que os estudos de ACV para o setor mineiro são, em geral, voltados para mineração de grande escala, sendo desconsiderada a avaliação de ciclo de vida das atividades de mineração artesanal e de pequena escala. Considerando-se que esse tipo de atividade é relevante em países com grandes reservas de recursos minerais, e que ainda pode ser realizada descontroladamente em áreas diversas e com distintos impactos ambientais, tal perspectiva se torna preocupante.

Ainda, os dados genéricos utilizados são muitas vezes inadequados para um estudo de ACV, pois não permitem uma análise consistente das etapas da mineração em termos de espaço e tempo (desde a exploração até o descomissionamento), especialmente num setor composto por sistemas mais complexos, como o downstream da mineração (AWUAH-OFFEI & ADEKPEDJOU, 2011).

Apesar disso, as etapas de exploração e descomissionamento contribuem pouco para os impactos da mineração em função da elevada vida útil das minas em geral. A identificação dos aspectos e a avaliação dos impactos ambientais dessas etapas é diferenciado com relação aos identificados na etapa de operação da mina.

Awuah-Offei & Adekpedjou, (2011) ressaltam, ainda, a barreira da falta do acesso a uma robusta base de dados para realização dos inventários da mineração. Diante das diferenças entre os tipos de exploração (a céu aberto ou *open pit mining*, e subterrânea ou *undergroundmining*), dos diferentes métodos de mineração e do volume limitado de estudos de cada unidade de processo (perfuração, detonação, escavação, transporte, esmagamento, triagem, etc.), as informações públicas disponíveis do processo de mineração não são apropriadas, pois são generalizadas, considerando um padrão médio de mineração. Tal limitação ocorre muitas vezes em virtude da confidencialidade das informações das empresas, dificultando o avanço da pesquisa na área.

Segundo Awuah-Offei & Adekpedjou (2011), a unidade funcional na avaliação de processos de mineração é um pouco difícil de determinar. Seu valor normalmente é expresso em



termos de uma unidade de produção (por exemplo, toneladas de produção do minério). Contudo, uma unidade funcional em termos de taxa de produção (por exemplo, toneladas por hora) pode ser mais adequada para estudos comparativos em mineração<sup>2</sup>. Ainda, em processos com etapa de beneficiamento, resulta mais conveniente utilizar unidades funcionais em termos de produto refinado ao invés da quantidade de minério produzida (por exemplo, quilos de cobre beneficiado ao invés de toneladas de minério de cobre) Awuah-Offei & Adekpedjou (2011).

Tal abordagem foi também utilizada por Valdlvia & Ugaya (2011), que realizaram um inventário de ciclo de vida para duas minas de pequena escala de minério de ouro no Peru. Na pesquisa, as autoras tiveram de utilizar diferentes unidades funcionais para cada estudo de caso em virtude das diferentes concentrações do minério produzido, além de não ter sido possível a coleta de dados dos processos de beneficiamento de ambas as minas. A Tabela 1 apresenta um resumo das diferentes unidades funcionais de estudos de ACV no setor mineral.

---

<sup>2</sup> Desde que a escala do projeto e, conseqüentemente, os aspectos ambientais identificados guardem relação com a produtividade da mina Awuah-Offei & Adekpedjou (2011).

**Tabela 1.** Variação na determinação da unidade funcional em diferentes estudos no setor de mineração.

| Produção da Mina              | Unidade Funcional  | Referência                        |
|-------------------------------|--|-----------------------------------|
| <b>Ouro</b>                   | 4.000 t/h de roca colocados em aterros (aterro de resíduos e RoMPad) | AWUAH-OFFEI <i>et al.</i> (2008A) |
| <b>Barro vermelho</b>         | 1t de barro vermelho produzido e vendido                             | BOVEA <i>et al.</i> (2007)        |
| <b>Bauxita</b>                | 1.250 t/dia de bauxita   | DURUCAN <i>et al.</i> (2006)      |
| <b>Ouro, alumínio e cobre</b> | 1t de metal refinado   | SPITZLEYANDTOLLE (2004)           |
| <b>Metais</b>                 | 1t de mineral concentrado  | SUPPENETAL. (2006)                |
| <b>Cobre</b>                  | 1t de carvão produzido e entregue                                    | MANGENAAND BRENT (2006)           |

Fonte: Awuah-Offei & Adekpedjou, 2011.

Outra peculiaridade da mineração concerne à existência de minas com vários produtos (por exemplo, minas de cobre com molibdênio). Estas não só originam problemas de avaliação de impactos por produto, como também complicam a especificação da unidade funcional. Tal situação pode causar superestimação ou subestimação dos impactos do ciclo de vida dos minérios. A maioria dos estudos de ACV analisados por Awuah-Offei & Adekpedjou (2011) usou BD e *software* que, segundo eles, não atendiam às peculiaridades da indústria de mineração.

As categorias globais de impacto em ACV são aquecimento global, destruição da camada de ozônio, impacto à saúde humana, poluição da água doce e ecotoxicidade aquática, acidificação, eutrofização, que não são suficientes para descrever os impactos ambientais da mineração. Awuah-Offei & Adekpedjou (2011) indicam que essa foi uma das principais limitações dos diversos estudos pesquisados, uma vez que a atividade mineira tem um grande impacto no uso da terra, no abastecimento de água e na utilização de energia.

Spitzley & Tolle (2004) abordaram a questão do impacto no uso da terra e sua inclusão na metodologia de ACV, e propuseram uma avaliação baseada na vida média da área utilizada por unidade de produção de minério (hectares-ano por tonelada). Eles evidenciaram as seguintes limitações na metodologia: (1) dificuldade de comparar sistemas com diferentes áreas empregadas de uso de terra por períodos anuais (por exemplo, mineração subterrânea com a mineração a céu aberto); (2) risco de subestimação dos efeitos na qualidade da terra; (3) sendo uma avaliação com periodicidade anual, o uso da terra perturbada tenderia a variar significativamente de um ano para outro; (4) falta de perspectivas sobre os efeitos no longo prazo.

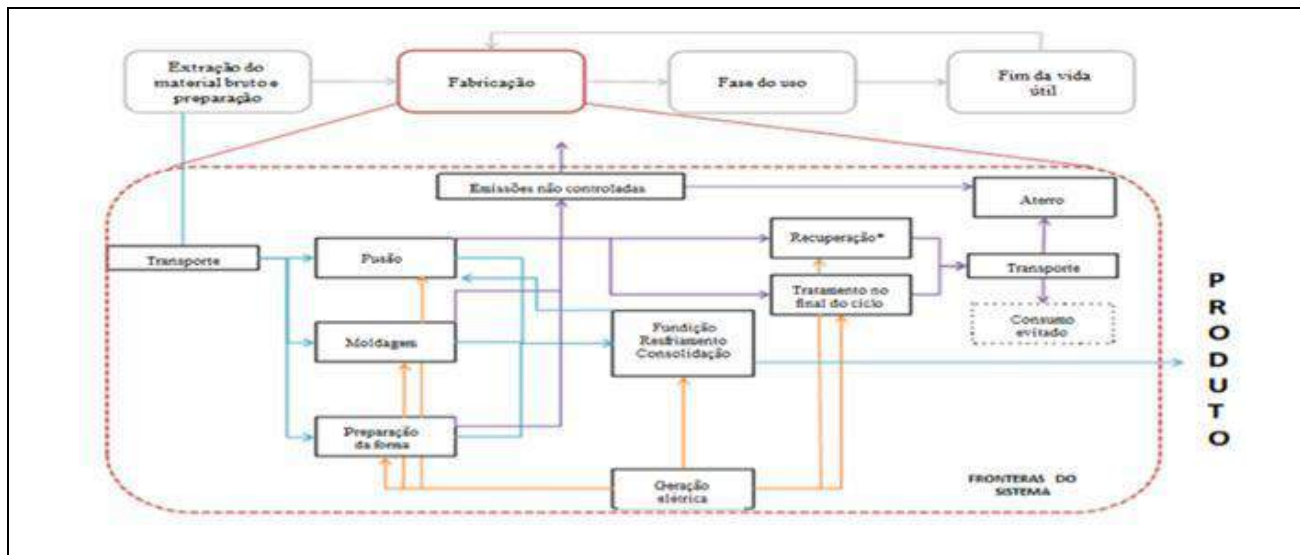
Hengena *et al.* (2014) realizaram uma pesquisa desse resíduo gerado na exploração do carvão mineral a céu aberto na Nova Zelândia. Neste estudo, a avaliação do ciclo de vida foi realizada para avaliar os impactos ambientais associados à construção, operação e manutenção das diferentes opções de tratamento das águas ácidas. Este estudo realizou uma análise detalhada de ACV para oito abordagens de tratamento entre técnicas passivas e ativas de águas ácidas de mina através de

uma unidade funcional comparativa de massa de água ácida removida por dia para cada opção de tratamento. Os cenários de tratamento ativo demonstraram maiores impactos com relação às abordagens de tratamento passivo.

Estudos de ACV da produção do minério de ferro ainda são escassos, na sua maioria são abordados como parte de estudos da produção de aço e produtos que contêm o insumo na matéria-prima. (MARKUS ENGINEERING SERVICES, 2002; CHEN, YANG, & OUYANG, 2011).

No estudo realizado por Burcchaat-Korol (2013), o minério do ferro é identificado como um dos componentes da produção do aço que geram impactos ambientais mais relevantes na saúde humana e na qualidade do ar. Isso devido ao processo de sinterização de minério de ferro, que é o maior contribuinte para as emissões de poeira e gás. O alto consumo de eletricidade do insumo também é ressaltado.

Outro exemplo da falta de aprofundamento de estudos sobre ACV deste mineral é evidenciado na pesquisa realizada por (YILMAZ, ANCTIL, & KARANFIL, 2014). Os autores realizaram um ACV da indústria de fundição de ferro com o objetivo de encontrar as melhores tecnologias disponíveis para reduzir os impactos ambientais ao menor custo. Porém, o estudo foi focado exclusivamente na fundição propriamente do ferro, sem considerar a produção e beneficiamento do mineral (Figura 4).



Fonte: Yilmaz, Antil e Karanfil, (2014).

**Figura 4.** Fronteiras da avaliação de ciclo de vida da indústria de fundição de ferro.

Como estudos detalhados dos processos de produção e beneficiamento do ferro são escassos, estudos específicos e aprofundados para a melhoria de cada processo unitário são ainda menos conhecidos.

Chen, Yang & Ooyang (2011) aplicaram a ferramenta do ACV para ajudar aos tomadores de decisão sobre a melhor maneira de reduzir a geração dos resíduos de escória – um dos principais resíduos sólidos da indústria de ferro e aço – gerados no uso do forno de óxido básico (sigla em inglês, *BOF*). Os autores elaboraram quatro cenários com estratégias distintas de reciclagem interna para escória *BOF* e, com a metodologia ACV, conseguiram analisar a redução dos impactos ambientais de cada cenário.

## **2.5 | Desafios e Limitações das Metodologias de ACV**

Além da não disponibilidade de um banco de dados de inventários de ciclo vida representativos das particularidades energéticas e tecnológicas brasileiras (IBICT, 2012), outros fatores<sup>3</sup> corroboram para o ainda tímido volume de estudos em ACV e a pequena participação dos setores produtivos do país.

No âmbito das políticas de incentivo, não há no Brasil estímulos legais e econômicos para o investimento em estudos de ACV. Apesar do reconhecimento de seu potencial estratégico para a competitividade da indústria brasileira no comércio internacional, o PBACV ainda requer avanços de caráter regulatório.

---

<sup>3</sup>Com base no levantamento realizado em (ZOCHE, 2014).

No que tange às iniciativas empresariais, diversos elementos confluem para o aparente desinteresse. O primeiro deles é a pouca familiaridade com os conceitos de ACV e sua importância econômica e ambiental.

Ainda, quando a importância é reconhecida, as políticas de confidencialidade dificultam a coleta e a divulgação dos dados da pesquisa, mesmo sem a identificação da empresa. Ainda, por esse mesmo motivo, muitos estudos não contemplam todo o processo produtivo, ficando restritos a “etapas permitidas”, que nem sempre são as mais significativas do ponto de vista ambiental.

Há ainda um grande receio dos setores produtivos em relação ao levantamento dos impactos ambientais de seus produtos, processos e serviços no Brasil. Além disso, a maioria das empresas brasileiras investe muito pouco em pesquisas, focando mais nos resultados de curto prazo.

Na medida em que se ampliam as restrições ambientais no intuito de prover maior sustentabilidade aos processos e produtos, a ACV se torna uma ferramenta cada vez mais importante em virtude de sua abordagem sistêmica de todo o ciclo de vida de um sistema de produto.

No entanto, numerosas e significativas são as dificuldades associadas à realização de uma ACV. Algumas delas são: a subjetividade na interpretação dos dados, a necessidade de um elevado volume de dados, a falta de consolidação metodológica, bem como de confiabilidade dos bancos de dados (LOVÓN-CANCHUMANI, 2013; ARAÚJO, 2013).

**Tabela 2.** As limitações dos estudos de ACV com relação a diferentes aspectos.

| Incerteza/<br>Acurácia                                   | Alcance/<br>Aplicação   | Subjetividade/<br>Arbitrariedade   | Complexidade/<br>Tempo                                 | Comparabilidade<br>Reprodutibilidade         |
|--|---|--|--|--|
| Limitação do conhecimento científico acerca dos impactos | Avaliações com base em condições locais pode não ser representativa para questões globais ou de outra região, ou vice-versa | Definição dos critérios  | Quantidade elevada de dados                            | Transparência dos dados                      |
| Carência de método consolidado/<br>Falta de padronização | Não determina qual produto ou processo é o mais caro ou se funciona melhor  | Escolha das fronteiras do estudo, das fontes de dados, e categorias de impacto | Necessita normalmente de muitos recursos e muito tempo | Acessibilidade/<br>Disponibilidade dos dados |
| Qualidade dos dados                                      | Indefinição do tipo de informação que pode resultar de um estudo de ACV e qual a finalidade de utilização dessa informação  | Delimitação espacial e temporal  |  |  |



**Tabela 2a.** As limitações dos estudos de ACV com relação a diferentes aspectos.

| <b>Incerteza/<br/>Acurácia</b>   | <b>Alcance/<br/>Aplicação</b>                                      | <b>Subjetividade/<br/>Arbitrariedade</b>   | <b>Complexidade<br/>/Tempo</b> | <b>Comparabilidade<br/>Reprodutibilidade</b> |
|--|--|--|--------------------------------|--|
| Variabilidade e erros estocásticos dos números das entradas e saídas dos processos | Nem todos os impactos ambientais relevantes são considerados       | Descrição do sistema de produto  |                                |  |
| Variabilidade e erros estocásticos dos números das entradas e saídas dos processos | Nem todos os impactos ambientais relevantes são considerados       | Descrição do sistema de produto  |                                |  |
| Adequação dos fluxos de entradas e saída   | Falta de BDs que representem a realidade das diferentes regiões    | Elementos de ponderação podem envolver valores ideológicos e éticos que não podem ser objetivamente determinados |                                |  |
| Incerteza dos métodos  | Não aborda aspectos sociais ou econômicos de um produto ou serviço |  |                                |  |
| Risco de negligência de fluxos importantes.  |  |  |                                |  |

Fonte: Elaboração própria a partir de (HELLWEG & CANALS, 2014; LOVÓN-CANCHUMANI, 2013; ARAÚJO, 2013; SILVA & PEREIRA, 2013; CASTELO BRANCO, 2012; UGAYA, 2013).

A Tabela 2 sugere uma categorização para as limitações de um estudo de ACV e as sumariza com base nos diversos estudos verificados.

Apesar dessas limitações, Awuah-Offei & Adekpedjou (2011) reconhecem que a avaliação de área perturbada por vida média e por unidade de produção (hectares-ano por tonelada), de fato, fornece uma avaliação quantitativa do impacto da ocupação e uso da terra e facilita a realização de comparações entre usos alternativos do solo. No Quadro 1 pode-se observar algumas limitações dos estudos de ACV voltados às atividades de mineração.

**Quadro 1.** Limitações encontradas em estudos de ACV no setor de mineração.

---

#### **Algumas Limitações da ACV na mineração**

---

Complexidade dos estudos de ACV para abranger escala temporal de vida da mina (da exploração ao descomissionamento).

---

As categorias de impacto padrão (GEE, acidificação, eutrofização, entre outros) não são suficientes para descrever os impactos ambientais da mineração (como uso do solo).

---

A avaliação da incertezas e análise de sensibilidade nos estudos de ACV mineração é limitada. Reduzindo o potencial de aplicação em tomada de decisões.

---

A avaliação do impacto sobre o tratamento dos resíduos pode ser desconsiderada devido à indisponibilidade de dados satisfatórios.

---

Fonte: Adaptado de Awuah-Offei & Adekpedjou (2011).

O desenvolvimento de banco de dados de ICV no Brasil de forma coordenada se inicia em 2006, sob os auspícios do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) e o Instituto Brasileiro

de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), com o programa de “Inventário do Ciclo de Vida para a Competitividade Ambiental da Indústria Brasileira”. Com esse, foram elaborados os inventários do diesel brasileiro, da energia elétrica gerada pela usina de Itaipu, e outros (SICV, 2013). Esse programa deverá se estender no futuro para a elaboração de outros inventários, principalmente com o objetivo de permitir a avaliação dos produtos brasileiros quando exportados para mercados demandantes de avaliação ambiental de produtos.

Há poucos inventários de dados brasileiros publicados na literatura. (COLTRO *et al.* 2003) desenvolveram um inventário de energia elétrica para o Brasil, baseados em dados secundários e em questionários enviados às empresas geradoras de energia elétrica.

Ao se realizar um ACV em outras regiões que não aquela para a qual foi construído o inventário do processo no banco de dados, há que se avaliar a aplicabilidade desses dados para essas regiões, considerando-se as similaridades e diferenças dos aspectos geográficos e tecnológicos locais. Por falta de bases de dados locais, alguns estudos de ACV realizados na América Latina se utilizam de dados de outros países e falham em apresentar as limitações do uso de inventários não locais (EICKER *et al.* 2010).

## **3 | EXPERIMENTAL**

### **3.1 | Desenho da Pesquisa**

A metodologia de pesquisa está dividida em três etapas, conforme mostrado na Figura 5.

- (1) Conceitual, que é composta pelo levantamento bibliográfico; de elaboração do protocolo de pesquisa (questionário) e de seu pré-teste, com a consequente geração do modelo de pesquisa;
- (2) Prática, onde foram realizadas as visitas técnicas, coleta de dados nas diferentes fases do processo produtivo;
- (3) Aplicação direta, onde foi feito a ACV em uma empresa de produção de pelotas de minério de ferro.

A revisão teórica e arranjo das dimensões do modelo e dos seus elementos, traduzidos em um conjunto de questões inter-relacionadas, a serem organizadas no protocolo preliminar de pesquisa, com base na análise efetuada no levantamento bibliográfico, nas normas ABNT ISO 14040, 14040 e do EC (2010).

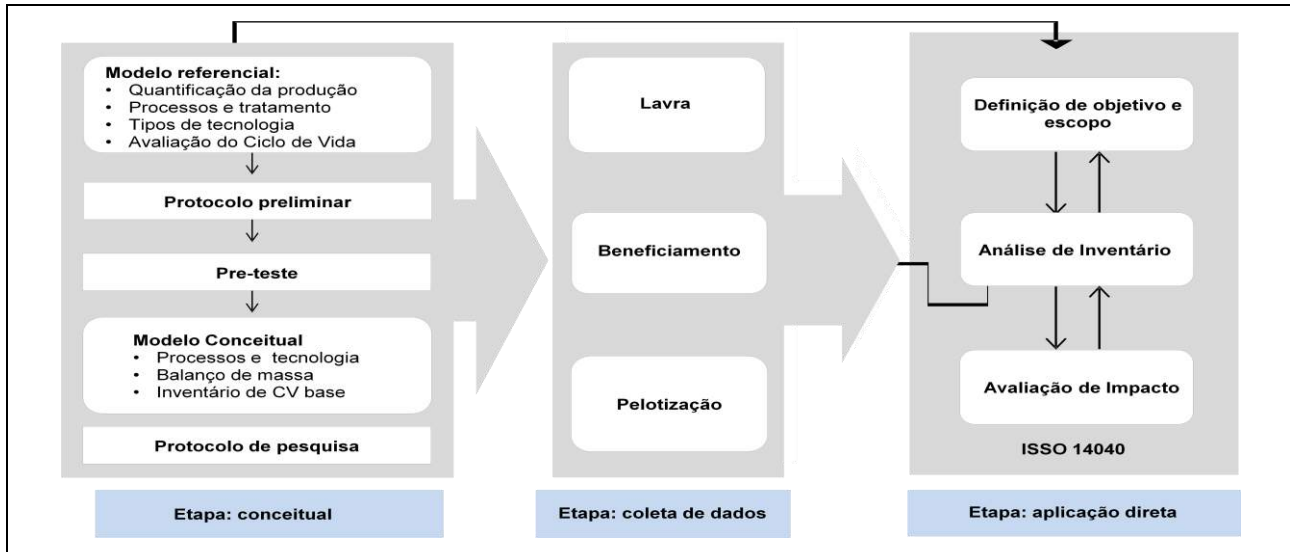


Figura 5. Estrutura metodológica do estudo.

Aponta-se a realização de um pré-teste do protocolo preliminar de pesquisa, no qual se busca refinar este instrumento em duas etapas sequenciais. Primeiramente, pela revisão do protocolo por um especialista do setor (o primeiro refinamento), e após, pela aplicação de uma entrevista com os engenheiros e gerente meio ambiente na empresa em estudo (o segundo refinamento).

É feita a criação de um modelo preliminar, traduzido em um protocolo de pesquisa para ser aplicado no estudo de caso. Esta fase buscou estabelecer o delineamento de um modelo de pesquisa que permita uma operacionalização para avaliação do estudo de caso, a partir das dimensões e elementos constatados durante a revisão da literatura e dos resultados encontrados no pré-teste. Desta forma, se elabora o protocolo de pesquisa refinado, para ser utilizado nas visitas técnicas na coleta de dados para o Inventário de Ciclo de Vida, através de um roteiro estruturado (o protocolo de pesquisa), o qual se aplicou nas visitas técnicas.

### 3.1.1 | Codificação dos Dados

Os dados primários e secundários foram transcritos e modelados para uma unidade comum, tendo por padrão os elementos relacionados às dimensões de escopo e objetivo do estudo e estrutura do ICV. Para cada elemento de cada dimensão pesquisada, se encontra uma resposta dos entrevistados ou uma referência a algum documento ou relatório de forma que a resposta pudesse ser obtida. As entrevistas seguiram uma sequência lógica similar, em que

sempre haverá uma menção ao elemento questionado, seguida da resposta do entrevistado.

Desta forma, há codificação dos dados procurando preencher, com apenas uma resposta, cada elemento específico que estava sendo pesquisado. Por exemplo, para verificar os elementos como a destinação dos resíduos, será feita uma pergunta aberta, da qual resultaram respostas como “a dificuldade de se dar destino a um dos resíduos perigosos”. Por outro lado, para verificar elementos como “emissões do processo de beneficiamento”, foram feitas questões fechadas, da qual resultaram respostas, com documentos dos resultados laboratoriais, com medição na fonte.

Quanto ao instrumento de pesquisa utilizado pelo pesquisador como guia durante as entrevistas, ele será utilizado como categorias iniciais para a análise de conteúdo das respostas. Logo após, serão adaptadas ou descartadas, dependendo da análise de conteúdo de cada resposta com o escopo de estudo e as limitações encontradas na definição dos limites do sistema do estudo.

### 3.1.2 | Codificação dos Dados

As análises dos dados coletados serão feitas de forma qualitativa e quantitativa, composta das técnicas de análise de conteúdo e de análise categórica e modelagem do sistema. Assim serão efetuados os seguintes passos:

- Para a realização da análise de conteúdo, os dados primários e os secundários (documentos) serão transcritos para uma unidade comum, e comparados com os documentos revisados;

- A análise de conteúdo é efetuada, pelo pesquisador, em dois momentos, buscando reduzir as controvérsias de inconsistência e garantir a estabilidade dos resultados;
- Foram estruturados os dados coletados, a partir das convergências e divergências da análise conjunta dos estudos de caso. Foram entregues aos entrevistados para a obtenção de seu parecer e para a confirmação das dimensões e elementos encontrados, reforçando a consistência e validade dos resultados obtidos;
- Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida se estruturou baseado nos elementos obrigatórios definidos pela norma ABNT ISO 14040:2009. Seleção das categorias de impacto, indicadores de impacto e modelos, atribuição de resultados de ICV (classificação) e cálculo de indicador da categoria resultante caracterização e normalização;
- No que se refere ao tratamento dos dados para o ICV e ACV, utilizou-se o banco de dados Ecoinvent v.2.1 e o software SimaPro.

Entre os *software* disponíveis para ACV, GOEDKOOOP (2009) menciona-se que o SimaPro destaca-se pela flexibilidade em lidar com diferentes métodos de avaliação de impacto, fazer ligações de dados externos junto com a base de dados interna ao *software*, podendo obter várias funcionalidades de modelagem do inventário, metodologia de avaliação de impacto, análise e interpretação de resultados e gestão de base de dados. No estudo foi usada a plataforma do software SimaPro 8.0.2.



A associação entre os *inputs* e os potenciais impactos ambientais é feita a partir de bases de dados que são parte integrante do software SimaPro. Essas bases, especificamente, desenvolvidas para estudos de ACV, possuem amplos conjuntos de materiais, processos de produção, sistemas de energia e transporte, bem como cenários de deposição de produtos na natureza.

### **3.2 | Definição do Escopo do Estudo de Caso**

Avaliar os impactos do ciclo de vida da produção de minério de ferro, associado às operações em mineração de ferro de lavra, seu beneficiamento e pelotização para produção de pelotas (*pellets*) de minério de ferro.

#### **3.2.1 | Unidade Funcional**

A unidade funcional definida para o estudo é de 1 tonelada (uma tonelada) de pelotas (*pellets*) de minério de ferro entregues no navio no porto.

A partir do modelo de pesquisa proposto se delimitaram o escopo desta ACV conforme os resultados da visita técnica. Nesta etapa, muitas delimitações tiveram que ser realizadas para que se obtivesse um inventário que satisfizesse os objetivos dentro das limitações existentes de um estudo empírico.

### 3.2.2 | Modelagem e Fronteiras do Sistema

A abordagem adotada será a denominada *cradle-to-gate*, ou seja, da extração dos recursos naturais, mineroduto, etapa de pelotização até o produto final pronto para ser entregue ao navio.

A fronteira geográfica do estudo compreende o limite de bateria das instalações físicas da lavra e beneficiamento da empresa em estudo, os minerodutos, unidade de pelotização Porto de UBU no Espírito Santo, até a entrega do produto ao navio.

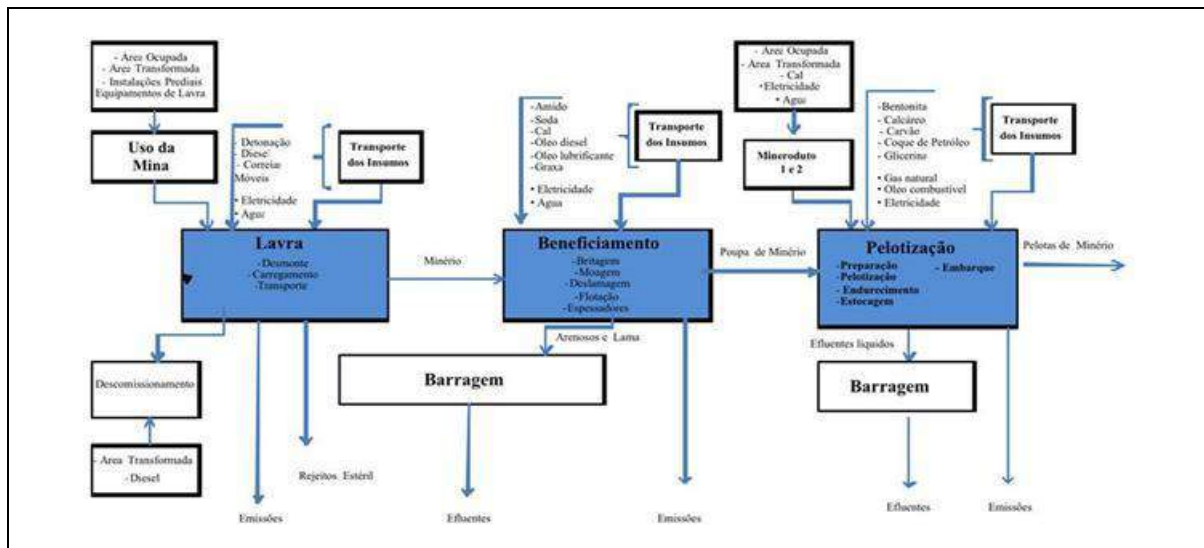


Figura 6. Modelagem do sistema para produção pelota de minério de ferro.

A fronteira temporal compreende a coleta de dados de produção de janeiro de 2013 até dezembro de 2013.

A Figura 6 apresenta uma representação esquemática da modelagem do sistema de produção de pelotas de minério de ferro considerada no estudo, seus fluxos intermediários (minério de ferro, concentrado de minério, pelotas de minério), seus fluxos auxiliares (amido, soda e cal, entre outros), e as saídas de emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos.

Considera-se como fluxos auxiliares todas as entradas de matéria e energia, do meio ambiente para o sistema de produto, e que não fazem parte do fluxo do produto principal, ou seja, não presentes no produto final.

### **3.3 | Inventário de Ciclo de Vida**

A segunda fase de um ACV consiste na compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto. Foi realizada no *Software* SimaPro versão 8.1. Envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas de um sistema de produto, que podem incluir uso de recursos e liberações para ar, água e solo (resíduos) associados com o sistema. É a fase de coleta e quantificação de todas as variáveis (matéria-prima, energia, transporte, emissões, efluentes, resíduos, e outros).

A coleta de dados demanda o desenho de um fluxograma de todos os processos, incluindo suas inter-relações e a descrição de cada processo com entradas e saídas tanto quantitativa quanto qualitativamente, se assim for necessário. Associado

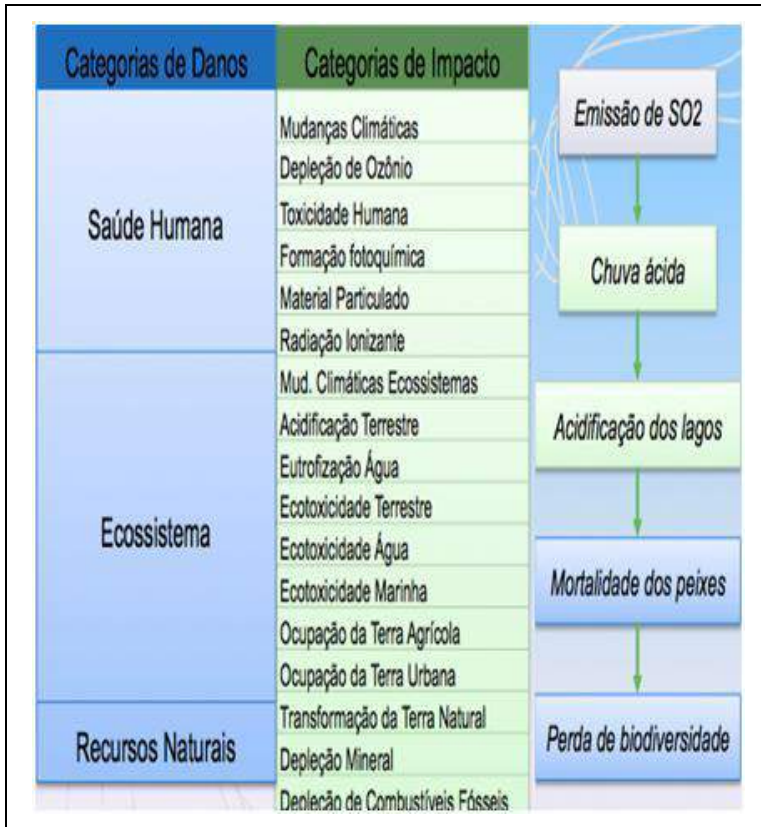
aos processos, constrói-se uma listagem das categorias de dados, a partir da qual se coletam os dados (ISO 14040). Devem-se determinar quais são os processos de primeiro plano, para os quais dados primários devem ser coletados. Os demais processos são considerados processos de fundo e dados secundários podem ser utilizados (GUINÉE *et al.* 2002).

Seguindo as recomendações de Friscknecht *et al.* (2007), subprodutos que representam pouco significância para a atividade não devem ser considerados na análise, exceção feita às diferentes frações de resíduos que podem ser reutilizados em outro sistema. Nesse sentido para o presente estudo, todos os fluxos que representam um impacto menor de 1% do score total serão considerados potencialmente importantes.

### **3.4 | Método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida - AICV**

Para realizar a AICV é necessária a aplicação de uma metodologia que correlacione o resultado do inventário com os diferentes impactos ambientais. Sendo assim, utilizou-se a metodologia de avaliação de impacto ambiental do ReCiPe v1.08, desenvolvida por RIVM, *Radboud University*, CML e *Pré Consultants* presente no software SimaPro. Essa metodologia procura harmonizar, nos modelos ambientais, os impactos orientados aos problemas (*midpoint*) e às categorias de danos (*endpoint*). Nos últimos anos tem sido usualmente aplicada em substituição aos métodos, até então, comumente usados como o Eco-indicator (GOEDKOOP *et al.* 2009).

Na metodologia ReCiPe são utilizadas as seguintes categorias de impactos ambientais associadas às três categorias de danos conforme mostra a Figura 7.



Fonte: Adaptado de GOEKOOP *et al.* (2009).

**Figura 7.** Metodologia de AICV.

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 | Inventário de Ciclo de Vida

O subsistema de Lavra foi modelado no SimaPro, para 1 tonelada de minério extraído na concentração de 46%. Essa subsistema é composta pelas atividades de desmonte do minério de ferro, carregamento em caminhões e transporte por sistema de correias fixas e móveis.

O Subsistema de beneficiamento do minério foi modelada para 1 tonelada de concentrado, composta pela concentração do minério de ferro itabirítico, com 45 a 46% em massa de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), para uma concentração de 66 a 67% em massa do mesmo material. Esta etapa é composta por diversas unidades de processo de transformação física, tais como britagem, peneiramento, moagem, flotação e espessamento.

Transporte por Minerodutos: a polpa de minério de ferro beneficiado em solução aquosa é bombeada por meio de sistema de bombas através de dois minerodutos de cerca de 400 quilômetros, da unidade de Germano (Minas Gerais) até Porto de Ubu (Espírito Santo).

O subsistema de pelotização foi modelada no Simapro para 1 tonelada de pelotas de minério de ferro. Nessa etapa, o concentrado de minério de ferro beneficiado de Minas Gerais chega ao porto Espírito santo e entra no processo de preparação, pelotização e endurecimento para produção de pelotas de minério de ferro.

A Tabela 3 apresenta o inventário de ciclo de vida subsistema lavra da produção de pelotas de minério de ferro dos dados levantados na empresa em estudo.

**Tabela 3.** Inventário de ciclo de vida para produção de 1 tonelada de pelotas de minério de ferro.

| Subsistema Lavra             | Unidade      | Quantidade |
|------------------------------|--------------|------------|
| Óleo diesel                  | MJ           | 1,48E+01   |
| Eletricidade                 | kWh          | 3,31E-05   |
| Explosivo                    | ton          | 3,31E-05   |
| Transformação para mineração | tkm          | 1,92E-01   |
| Ocupação                     | m2.a         | 1,90E-0    |
| Transporte rodoviário        | m2           | 2,11E-03   |
| Rejeitos de mineração        | ton          | 2,40E-01   |
| Particulados < 2,5mm         | ton          | 1,44E-04   |
| Particulados > 10mm          | ton          | 1,44E-03   |
| Particulados < 10 > 2,5mm    | ton          | 1,29E-03   |
| <b>Descomissionamento</b>    | p            | 3,17E-10   |
| Diesel                       | MJ           | 2,33E+10   |
| Trasformação da área         | Área da Mina | 80%        |

A Tabela 4 apresenta o inventário de ciclo de vida subsistema beneficiamento da produção de pelotas de minério de ferro. O inventário de ciclo de vida de este subsistema considera o processo de beneficiamento do minério de ferro ate obter o concentrado.



**Tabela 4.** Inventário de ciclo de vida subsistema beneficiamento para produção de 1 tonelada de pelotas de minério de ferro.

| <b>Subsistema Beneficiamento</b> | <b>Unidade</b>   | <b>Quantidade</b> |
|----------------------------------|------------------|-------------------|
| Minério da Lavra                 | ton              | 1,84E+00          |
| Soda caustica                    | ton              | 7,97E-01          |
| Amido mandioca                   | ton              | 1,19E+00          |
| Amido milho                      | ton              | 3,38E-01          |
| Cal virgem                       | ton              | 1,18E+00          |
| Coag/floculantes Org             | ton              | 7,52E-02          |
| Corpo moedor Açó                 | ton              | 6,68E-04          |
| Eletricidade                     | kWh              | 3,84E+01          |
| Água                             | m <sup>3</sup>   | 7,35E-01          |
| Transporte rodoviário            | tkm              | 2,01E+00          |
| Transporte marítimo              | tkm              | 4,79E+00          |
| <b>Barragem de rejeito</b>       |                  |                   |
| Transformação para aterro        | m <sup>2</sup>   | 1,29E-03          |
| Transformação de desconhecido    | m <sup>2</sup>   | 1,29E-03          |
| Ocupação                         | m <sup>2.a</sup> | 1,16E-01          |
| <b>Infraestrutura da Mina</b>    |                  |                   |
| Transformação para industrial    | m <sup>2</sup>   | 1,60E-04          |
| Transformação de desconhecido    | m <sup>2</sup>   | 1,60E-04          |
| Ocupação                         | m <sup>2.a</sup> | 1,23E-02          |
| Construções                      | m <sup>3</sup>   | 4,49E-04          |
| Maquinário                       | kg               | 8,97E-03          |
| Prédios                          | m <sup>2</sup>   | 4,49E-04          |
| <b>Água residuária</b>           | m <sup>3</sup>   | 7,35E-02          |

A Tabela 5 apresenta o inventário de ciclo de vida subsistema Pelotização da produção de pelotas de minério de ferro. O concentrado de minério de ferro beneficiado de Minas Gerais chega ao porto Espírito santo e entra no processo de preparação, pelotização e endurecimento para produção de pelotas de minério de ferro.

**Tabela 5** Inventário de ciclo de vida subsistema pelotização para produção de 1 tonelada de pelotas de minério de ferro.

| Subsistema Pelotização  | Unidade        | Quantidade |
|-------------------------|----------------|------------|
| Minério Beneficiado     | ton            | 0.948      |
| Óleo Combustível        | kg             | 1,09E+00   |
| Carvão antracito        | kg             | 1,03E+01   |
| Gás natural             | m <sup>3</sup> | 1,07E+01   |
| Eletricidade            | kWh            | 3,15E+01   |
| Coque verde de petróleo | kg             | 5,08E+00   |
| Calcário                | kg             | 2,09E+01   |
| Coag/floculantes Org    | kg             | 2,95E-01   |
| Bentonita               | kg             | 2,45E+00   |
| Glicerina               | kg             | 2,88E-03   |
| Transporte rodoviário   | tkm            | 6,69E+00   |
| Transporte marítimo     | tkm            | 1,09E+02   |
| Transporte gasoduto     | tkm            | 3,81E+00   |
| Emissões atmosféricas   | ton            | 3,31E-04   |
| Óxidos de Nitrogênio    | ton            | 3,31E-04   |
| Óxidos de Enxofre       | ton            | 1,57E-04   |
| Material Particulado    | ton            | 6,78E-05   |
| Água Mineroduto         | m <sup>3</sup> | 2,81E-02   |

**Tabela 5a.** Inventário de ciclo de vida subsistema pelotização para produção de 1 tonelada de pelotas de minério de ferro.

| Subsistema Pelotização                | Unidade | Quantidade |
|---------------------------------------|---------|------------|
| Eletricidade Mineroduto               | kWh     | 7,30E+00   |
| Cal Mineroduto                        | kg      | 7,32E-01   |
| Construção Mineroduto                 | km      | 2,46E-07   |
| Mineroduto                            |         |            |
| Transformação para industrial         | m2      | 6,99E-03   |
| Transformação de desconhecido         | m2      | 6,99E-03   |
| Ocupação                              | m2.a    | 5,38E-01   |
| Barragem de rejeito de Espírito Santo |         |            |
| Transformação para industrial         | m2      | 1,25E-04   |
| Transformação de desconhecido         | m2      | 1,25E-04   |
| Ocupação                              | m2.a    | 1,12E-02   |
| Área industrial de Espírito Santo     |         |            |
| Transformação para industrial         | m2      | 2,77E-03   |
| Transformação de desconhecido         | m2      | 2,77E-03   |
| Ocupação                              | m2.a    | 2,13E-01   |

## 4.2 | Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

A Tabela 6 apresenta os resultados da avaliação do ciclo de vida para a pelota de minério de ferro pela metodologia ReCiPe. Pode-se observar que para os impactos da categoria de danos Saúde Humana em *Disability Adjusted Life Years* (DALY) é o dano causado a saúde humana em anos de incapacidade. A escala DALY foi desenvolvida por MURRAY *et al.* (1996 citado por GOEDKOOOP & SPRIENSMA, 2001) para a OMS (Organização Mundial da Saúde) e o Banco Mundial,

para avaliar danos a saúde variando-se a escala entre os valores 0 para indivíduos saudáveis e 1 indicando fatalidade. Para tal, quatro etapas são realizadas: análise da concentração da substância no ambiente; análise de exposição dos seres humanos, análise do efeito e análise do dano. As categorias de impacto que afetam a saúde humana são: carcinogênicos, mudanças climáticas, radiação, respiratórios orgânicos e respiratórios inorgânicos.

O mais importante é Material Particulado (92,8%), para a categoria de danos Ecossistemas (em espécies.ano) o impacto mais relevante é Mudanças Climáticas (60,8%) e, finalmente, para a categoria de danos Consumo de Recursos (em \$) o impacto mais relevante é o relativo à Depleção de recursos minerais (93,5% da categoria de recursos).

**Tabela 6.** Resultados da AICV da produção de 1 tonelada de pelos de minério de ferro pela metodologia ReCiPE.

| Eletricidade         | Unidade | Total          | %     |
|----------------------|---------|----------------|-------|
| <b>Saude Humana</b>  |         |                |       |
| Mudanças Climáticas  | DALY    | <b>5,3E-05</b> | 7%    |
| Depleção de Ozônio   | DALY    | 2,1E-08        |       |
| Toxicidade Humana    | DALY    | 1,4E-06        |       |
| Formação fotoquímica | DALY    | 2,2E-08        |       |
| Material Particulado | DALY    | <b>7,0E-04</b> | 92,8% |
| Radiação Ionizante   | DALY    | 6,0E-08        |       |

**Tabela 6a.** Resultados da AICV da produção de 1 tonelada de pelos de minério de ferro pela metodologia ReCiPE.

| <b>Eletricidade</b>            | <b>Unidade</b> | <b>Total</b>   | <b>%</b> |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------|
| <b>Ecosistemas</b>             |                |                |          |
| Mud Climáticas                 |                |                |          |
| Ecosistemas                    | espécies.ano   | 3,0E-07        | 60,8%    |
| Acidificação Terrestre         | espécies.ano   | 3,4E-09        |          |
| Eutrofização Água              | espécies.ano   | 7,4E-10        |          |
| Ecotoxicidade Terrestre        | espécies.ano   | 3,5E-09        |          |
| Ecotoxicidade Água             | espécies.ano   | 6,4E-12        |          |
| Ecotoxicidade Marinha          | espécies.ano   | 8,2E-12        |          |
| Ocupação da Terra Agrícola     | espécies.ano   | <b>9,7E-08</b> | 19,60%   |
| Ocupação da Terra Urbana       | espécies.ano   | 3,8E-08        |          |
| Transformação da Terra Natural | espécies.ano   | 5,2E-08        |          |
| <b>Consumo de Recursos</b>     |                |                |          |
| Depleção de Recursos Minerais  | \$             | <b>5,8E+01</b> | 93,5%    |
| Depleção Fóssil                | \$             | 4,0E+00        |          |

Os resultados de AICV da pelota de minério de ferro separados por processos podem ser analisados na Tabela 7. O processo de pelletização é relevante nas categorias de impacto ambiental Formação Fotoquímica (62%), Acidificação Terrestre (58%) e Ocupação da Terra Urbana (42%). O processo de beneficiamento é relevante nas categorias de

impacto de Ocupação da Terra Agrícola (81%), Ecotoxicidade Terrestre, (54%) e Ecotoxicidade Água (54%), enquanto para o processo de Lavra os impactos mais relevantes apontam para as categorias de Material Particulado (93%) e Depleção de Recursos Minerais (100%).

No que se refere aos processos dos insumos, podemos ressaltar que o processo de óleo combustível é relevante para a depleção de ozônio. As outras fontes energéticas como Carvão, Eletricidade e Gás Natural têm relevância para as categorias de Eutrofização Água, Ecotoxicidade Terrestre e Depleção Fóssil, respectivamente.

Entretanto, é necessária a aplicação de uma metodologia para se avaliarem quais desses processos são os mais impactantes. Para tal, é necessária a normalização e a ponderação para converter os impactos em uma mesma unidade comparável. Assim, consegue-se responder às perguntas se “Isso é muito?”, e se “Isso é importante?” em referências aos valores de cada categoria de impacto.

**Tabela 7.** Resultados da AICV da pelota de minério de ferro por processos pela metodologia ReCiPe/World.

| <b>Categoria de Impacto</b>         | <b>Unidade</b> | <b>Lavra</b> | <b>Beneficiamento</b> | <b>Pelotização</b> | <b>Bentonita</b> | <b>Óleo</b> | <b>Carvão</b> | <b>Eletricidade</b> | <b>Gás Natural</b> | <b>Outros</b> |
|-------------------------------------|----------------|--------------|-----------------------|--------------------|------------------|-------------|---------------|---------------------|--------------------|---------------|
| Mudanças Climáticas                 | DALY           | 11%          | 30%                   | 0%                 | 4%               | 2%          | 12%           | 18%                 | 6%                 | 17%           |
| Depleção de Ozônio                  | DALY           | 1%           | 5%                    | 0%                 | 5%               | 70%         | 1%            | 2%                  | 4%                 | 13%           |
| Toxicidade Humana                   | DALY           | 4%           | 50%                   | 0%                 | 18%              | 2%          | 3%            | 10%                 | 2%                 | 11%           |
| Formação fotoquímica                | DALY           | 13%          | 6%                    | 62%                | 1%               | 2%          | 2%            | 2%                  | 3%                 | 8%            |
| Material Particulado                | DALY           | 93%          | 1%                    | 4%                 | 0%               | 0%          | 0%            | 0%                  | 0%                 | 1%            |
| Rediação Ionizante                  | DALY           | 3%           | 32%                   | 0%                 | 7%               | 3%          | 6%            | 22%                 | 7%                 | 19%           |
| Mudanças Climáticas<br>Ecossistemas | espécies.ano   | 11%          | 30%                   | 0%                 | 4%               | 2%          | 12%           | 18%                 | 6%                 | 18%           |
| Acidificação Terrestre              | espécies.ano   | 8%           | 9%                    | 58%                | 2%               | 1%          | 4%            | 3%                  | 8%                 | 8%            |
| Eutrofização Água                   | espécies.ano   | 1%           | 17%                   | 0%                 | 5%               | 0%          | 62%           | 8%                  | 1%                 | 5%            |

**Tabela 7a.** Resultados da AICV da pelota de minério de ferro por processos pela metodologia ReCiPe/World.

| Categoria de Impacto           | Unidade      | Lavra | Beneficiamento | Pelotização | Bentonita | Óleo | Carvão | Eletricidade | Gás Natural | Outros |
|--------------------------------|--------------|-------|----------------|-------------|-----------|------|--------|--------------|-------------|--------|
| Ecotoxicidade Terrestre        | espécies.ano | 1%    | 54%            | 0%          | 2%        | 0%   | 0%     | 33%          | 0%          | 9%     |
| Ecotoxicidade Água             | espécies.ano | 4%    | 54%            | 0%          | 5%        | 0%   | 1%     | 13%          | 4%          | 17%    |
| Ecotoxicidade Marinha          | espécies.ano | 4%    | 32%            | 0%          | 10%       | 1%   | 2%     | 7%           | 23%         | 20%    |
| Ocupação da Terra Agrícola     | espécies.ano | 0%    | 81%            | 0%          | 1%        | 0%   | 3%     | 11%          | 0%          | 3%     |
| Ocupação da Terra Urbana       | espécies.ano | 19%   | 17%            | 42%         | 2%        | 0%   | 13%    | 1%           | 0%          | 7%     |
| Transformação da Terra Natural | espécies.ano | 1%    | 25%            | 14%         | 23%       | 0%   | 4%     | 18%          | 6%          | 8%     |
| Depleção de Recursos minerais  | \$           | 100%  | 0%             | 0%          | 0%        | 0%   | 0%     | 0%           | 0%          | 0%     |
| Depleção Fóssil                | \$           | 5%    | 9%             | 0%          | 3%        | 5%   | 24%    | 4%           | 39%         | 11%    |



#### 4.2.1 | Resultado da Avaliação do Impacto Ambiental do Ciclo de Vida por Categorias

Os resultados de impacto ambiental por categorias de danos ponderados, para a pelota de minério de ferro pela metodologia ReCiPe *End point World H* podem ser observados na Tabela 8. A categoria de danos predominante é a de recursos, seguida de Saúde Humana e, finalmente, da categoria de danos ao Ecossistema. Dos 50,2 Pts da categoria recursos 49,92 Pts são referentes à fase de beneficiamento.

**Tabela 8.** Resultados dos impactos ambientais ponderados para a pelota de minério ferro pela metodologia ReCiPeEndpoint World H.

| <b>Categoria de Danos</b> | <b>Impacto (Pt)</b> | <b>%</b>      |
|---------------------------|---------------------|---------------|
| Saúde Humana              | 22,50               | 30,9%         |
| Ecossistemas              | 0,22                | 0,3%          |
| Recursos                  | 50,20               | 68,8%         |
| <b>Total (Pt)</b>         | <b>72,92</b>        | <b>100,0%</b> |

A acumulação dos impactos ambientais ao longo das fases para cada uma das categorias de impacto ambiental da metodologia ReCiPe *End point* pode ser vista na Figura 8. Os impactos são comparados com os valores finais totais das categorias para a pelota, considerada como 100%. Assim, observa-se que, em geral, os impactos da última fase a pelotização são maiores do que das fases anteriores, exceção para a categoria de impacto de material particulado na qual não há emissões modeladas para as fases de pelotização e a categoria de depleção de metais, em função das diferenças de concentração do ferro entre o beneficiamento e a pelotização.

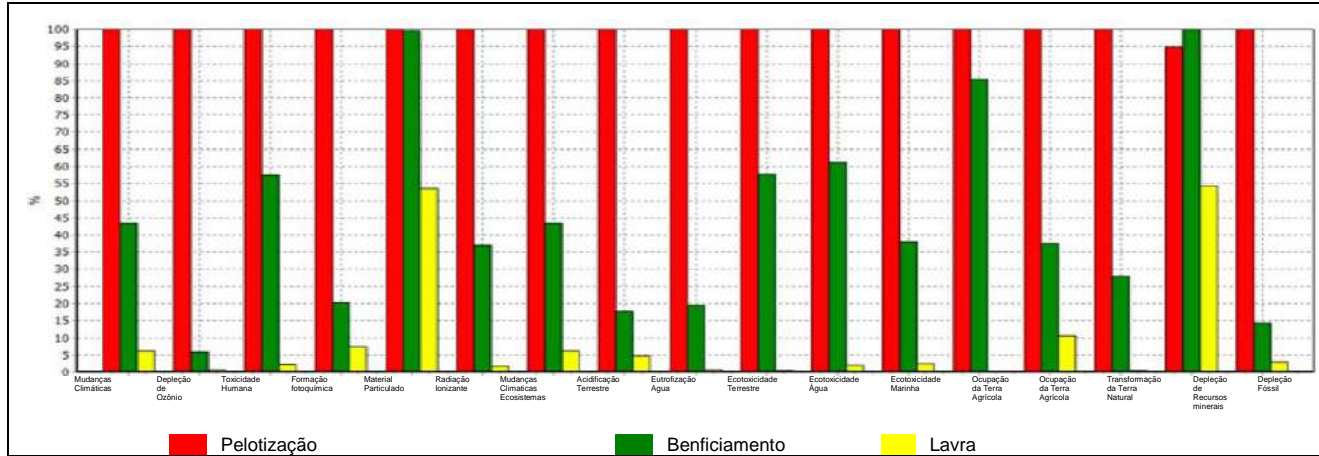


Figura 8. Resultado dos impactos ambientais para as fases de pelotização, beneficiamento e lavra pelo método ReCiPeEndpoint.

Esses dados serão detalhados no próximo item para cada fase da produção da pelota e para as diferentes categorias de impacto.

### **4.3 | Interpretação dos Resultados da AICV**

Nessa última fase, os resultados da análise do inventário e da avaliação de impacto são confrontados com o objetivo e o escopo definido, visando alcançar conclusões e recomendações para os tomadores de decisão.

A pergunta básica a ser feita é: qual é a melhor alternativa e quais são os critérios que a definem? Essa confrontação poderá resultar em revisão ou alteração em alguma das outras fases da ACV, necessitando-se, assim, de ajustes na avaliação.

A norma ISO 14040 recomenda os seguintes procedimentos para a interpretação dos resultados da ACV:

Identificação das questões significativas com base nos resultados das fases de ICV e AICV. Entre os métodos passíveis de serem aplicados à ACV estão:

- Análise de contribuição de cada etapa ou de grupos de processos em relação ao total do impacto do ciclo de vida;
- análise da dominância onde as contribuições mais importantes são analisadas;
- análise de influência, onde é analisada a possibilidade de influência sobre questões ambientais; e
- avaliação de anomalias em que desvios anormais dos resultados esperados são analisados.

#### 4.3.1 | Análise de Contribuição

Na análise de contribuição se busca identificar quais são os processos mais impactantes em relação ao total dos impactos do ciclo de vida de um produto. Com isso, é possível tomar ações para a redução dos impactos.

A Figura 9 apresenta um gráfico de barras para as categorias de impactos ambientais da produção de pelotas de minério de ferro, utilizando-se a metodologia ReCiPe End point. Observa-se que a cor predominante é a marrom, que representa percentualmente os impactos ambientais do processo de beneficiamento que antecede à pelotização. Em seguida, destaca-se a cor vermelha referente ao processo de pelotização que gera impactos importantes para as categorias de fotoquímicos, uso da terra e acidificação terrestre.

A Figura 10 apresenta a contribuição do subsistema Beneficiamento. Observa-se que a cor verde clara predomina identificando o processo de Eletricidade no subsistema Beneficiamento, no que se refere ao insumo corpo moedor bolas de aço, para como o mais impactante na maior parte das categorias de impactos ambientais. Este é seguido pelo processo de Lavra, que é subsistema anterior.

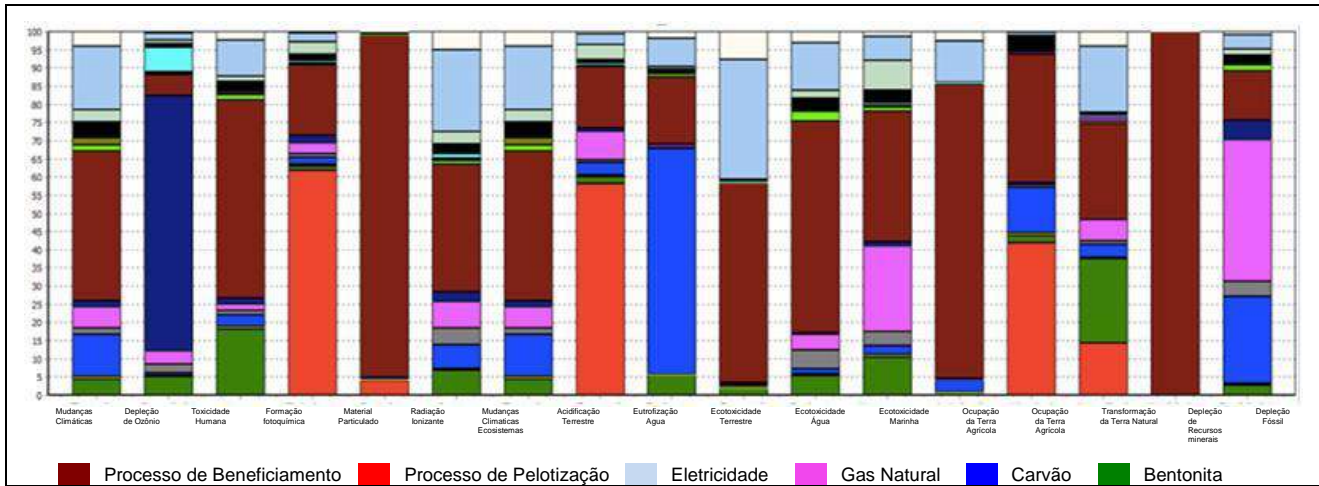
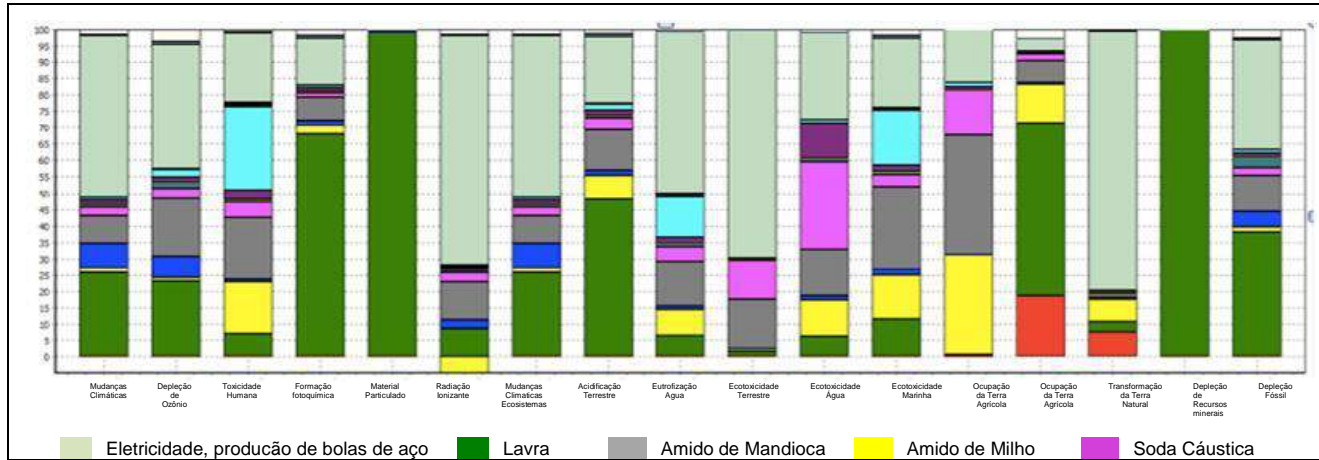
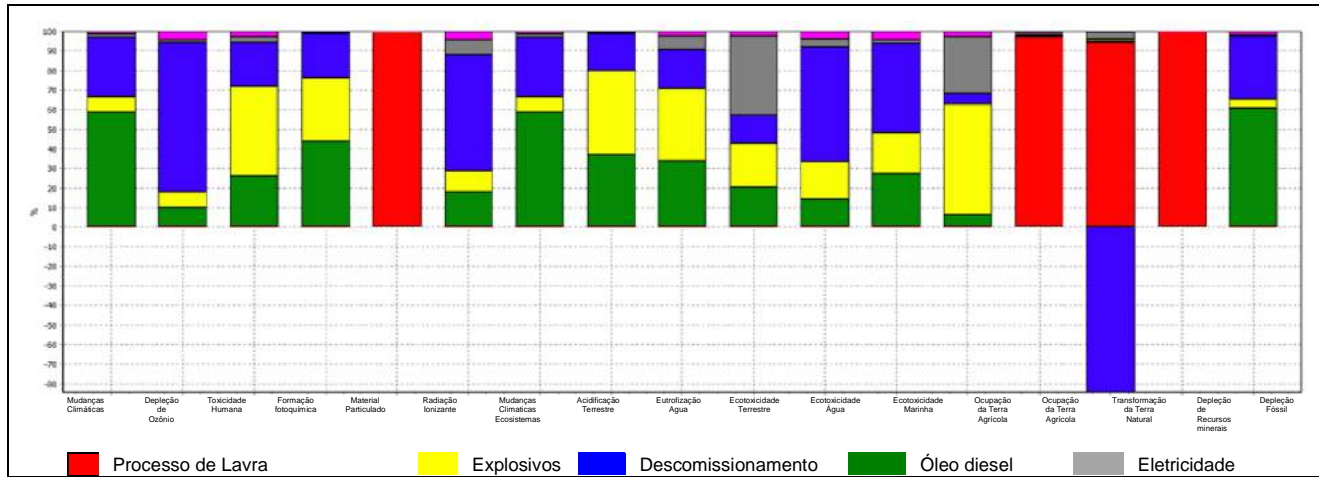


Figura 9. Impactos ambientais para 1 tonelada de pelota de ferro pela metodologia ReCiPeEndpoint.



**Figura 10.** Impactos ambientais do subsistema beneficiamento para a produção de 1 tonelada de concentrado pela metodologia ReCiPeEndpoint.



**Figura 11.** Impactos ambientais da produção de 1 tonelada de minério bruto do subsistema lavra pela metodologia ReCiPeEndpoint.

Na Figura 11 observa-se que a cor predominante é a vermelha, referente ao próprio processo de Lavra, e relevante para quatro categorias de impactos ambientais: material particulado, uso do solo urbano, transformação do solo natural e depleção de recursos minerais. Já a segunda cor predominante é referente ao processo de Descomissionamento, que gera um impacto positivo ao recuperar a área da mineração para outro fim. Entretanto, note-se que esse processo também gera impactos ambientais negativos nas categorias de impacto de Mudanças Climáticas, Depleção de Combustíveis, Depleção de Ozônio entre outras; isso devido aos esforços para se recuperar o solo, particularmente, consumo de óleo diesel nas máquinas.

#### 4.3.2 | Análise de Dominância

Na análise da dominância as contribuições mais importantes são observadas para se destacar quais são as categorias de impactos mais importantes ao longo do ciclo de vida do produto.

No item 4.2 do presente estudo foi constatada a predominância da categoria de danos de consumo de recursos nas três fases do sistema de produto da produção da pelota de ferro.

A Tabela 9 apresenta os processos que mais contribuem para os impactos ambientais da Pelota de Ferro do caso em estudo. Nessa tabela pode-se observar que o processo dominante é a Mineração da Lavra, onde ocorre a extração dos recursos minerais e a emissão de material particulado.



**Tabela 9.** Impactos ambientais ponderados dos processos mais relevantes do ciclo de vida da pelota de ferro do caso de estudo pela metodologia ReCiPeEndpoint.

| Processos  | Impacto (Pt) |
|--|--------------|
| Mineração (Lavra)  | 66,195       |
| Gás Natural, alta pressão produção                             | 1,193        |
| Carvão   | 0,929        |
| Pelotização  | 0,815        |
| Eletricidade, alta voltagem hidroeletricidade, região tropical | 0,325        |
| Petróleo, off-shore  | 0,262        |
| Óleo Combustível   | 0,220        |
| Diesel, queimado nos equipamentos                              | 0,152        |
| Eletricidade, alta voltagem   biomassa                         | 0,118        |
| Transporte marítimo  | 0,116        |
| Gás Natural, alta pressão on-shore                             | 0,113        |
| Diesel BR (para transporte)                                    | 0,112        |
| Electricity, alta voltagem {BR}                                | 0,109        |
| Óleo Diesel, queimado em máquinas                              | 0,098        |
| Coagulantes e floculante orgânicos                             | 0,093        |
| Gás Natural, alta pressão off-shore                            | 0,091        |
| Eletricidade, alta voltagem {BR} gás natural                   | 0,090        |
| Outros Processos   | 0,090        |
| Total de todos os processos                                    | 72,920       |

### 4.3.3 | Análise de Sensibilidade

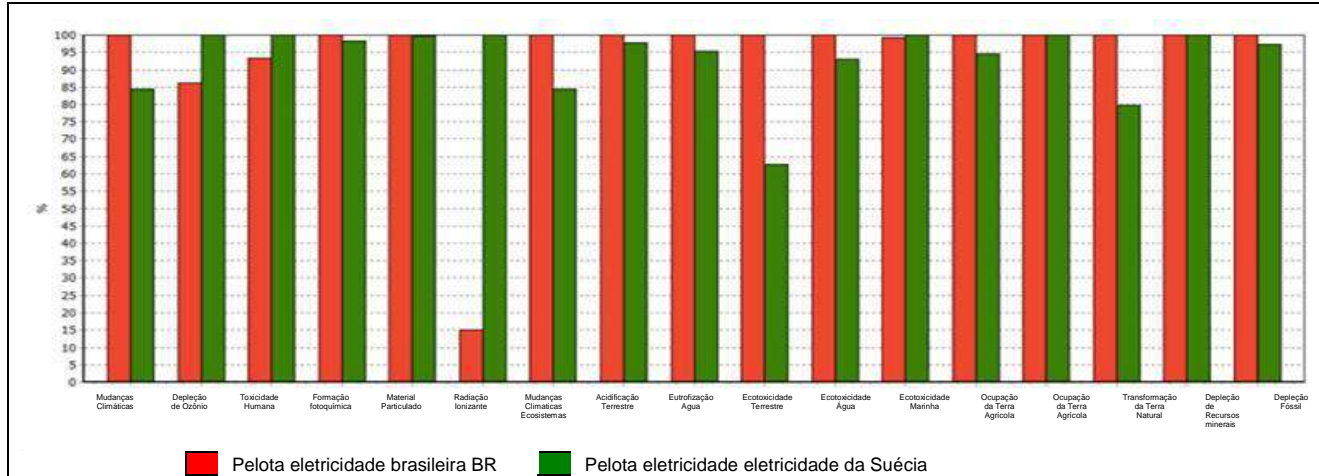
A análise de sensibilidade deve ser realizada para parâmetros que possam ter grande influência no resultado final da ACV. No caso da pelota de ferro em estudo, os parâmetros relevantes que podem ser testados são o grid de eletricidade, já que o consumo de ferro não é variável para a produção da pelota. Ou seja, em verdade se o minério de ferro na lavra tiver uma concentração inferior, ele demandará mais esforços de maquinário com os consequentes aumentos de consumo de combustíveis e de emissões de material particulado, não afetando, assim, a categoria de impacto de depleção de metais.

Para analisarmos a influência do grid de eletricidade do Brasil perante outros países no impacto ambiental do produto pelota, compara-se o resultado do AICV da pelota com eletricidade brasileira (BR) contra o AICV de pelota com eletricidade da Suécia (SE).

A Suécia foi escolhida por ser um país que produz pelotas de ferro e tem um *mix* de fontes que inclui hidroeletricidade (ver Tabela 10). A Figura 12 apresenta os resultados comparativos do AICV para os dois países.

Pode-se notar que ocorre uma variação no resultado do AICV de pelotas de ferro para os dois diferentes *grids*, conforme a categoria de impacto ambiental. Dentre as categorias em que o impacto é maior no *grid* de eletricidade do Brasil estão: fotoquímicos, depleção de fósseis, ecotoxicidade terrestre, uso

da terra agrícola, uso da terra natural e mudanças climáticas saúde humana e ecossistemas. Isso porque as barragens de hidroeletricidade no Brasil ocupam grandes áreas de terra e produzem metano (CH<sub>4</sub> – gás de efeito estufa) na degradação da matéria orgânica submersa. A terra agrícola é referente à parcela de biomassa que é utilizada para geração de eletricidade na zona rural.



**Figura 12.** Resultado das categorias de impactos da pelota de ferro com o *grid* de eletricidade brasileira (vermelho) e o *grid* de eletricidade da Suécia (verde).

Na Suécia as categorias mais impactantes do que no Brasil são: depleção de ozônio, toxicidade humana e radiação. Essa última devido ao fato de que na Suécia o percentual de geração de eletricidade de fonte nuclear é maior do que no Brasil.

**Tabela 10.** Comparação do *grid* de eletricidade do Brasil e Suécia conforme modelado no Ecoinvent.

| <b>Grid de Eletricidade</b>     | <b>Brasil</b> | <b>Suécia</b> |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| Hidroeletricidade, reservatório | 83,00%        | 9,44%         |
| Hidroeletricidade, fio d'água   |               | 37,80%        |
| Nuclear                         | 4,00%         | 41,53%        |
| Gás Natural                     | 4,00%         | 0,40%         |
| Óleo Pesado                     | 4,00%         |               |
| Biomassa                        | 3,00%         | 5,89%         |
| Carvão Mineral                  | 1,00%         |               |
| Gás recuperado                  | 1,00%         | 0,68%         |
| Eólica                          |               | 1,40%         |
| Resíduos                        |               | 1,40%         |
| Outros                          |               | 1,50%         |
| <b>Total</b>                    | <b>100%</b>   | <b>100%</b>   |

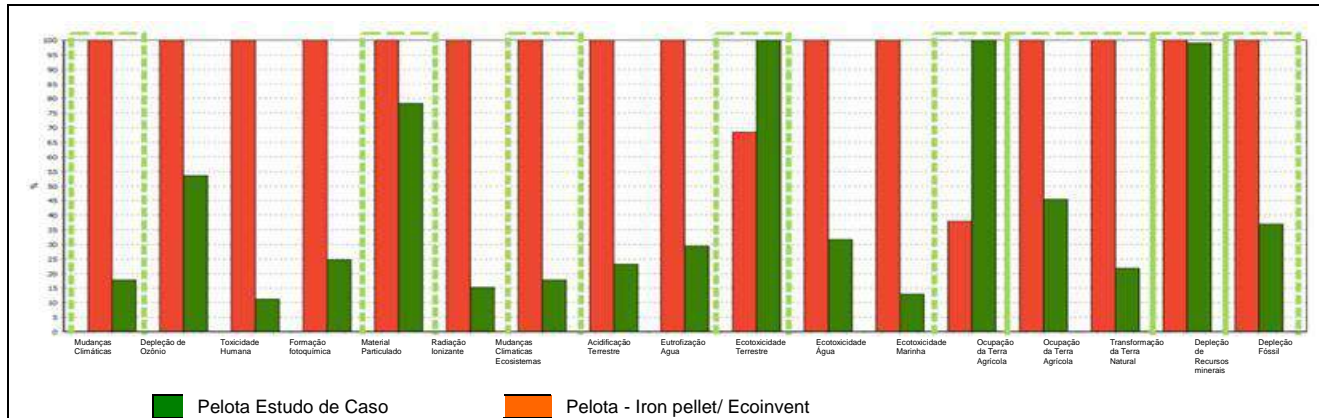
Fonte: ECOINVENT 3 (2013).

#### 4.3.4 | Análise Comparativa

A Figura 13 apresenta o resultado da Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida - AICV da pelota de minério de ferro em estudo comparada com a pelota de minério de ferro modelada no banco de dados internacional, Ecoinvent *Iron pellet/Produção/GLO*. O sistema de produto de referência para comparação corresponde a um modelo de produção global.

Na Figura 13 pode-se denotar que a pelota de ferro modelada no Ecoinvent tem impactos superiores à pelota do estudo de caso em várias categorias de impacto, exceto ecotoxicidade terrestre e uso da terra agrícola, porém, são praticamente iguais para a categoria de impacto de depleção de recursos minerais. Cabe ressaltar que o percentual de ferro na pelota final é o mesmo nos dois modelos.

Algumas categorias de impacto ambiental como mudanças climáticas, depleção de combustíveis fósseis e de ozônio têm explicações simples e diretas, visto que ocorre maior intensidade de hidroeletricidade no Brasil do que na média mundial da eletricidade modelada no Ecoinvent, gerando o Brasil uma energia elétrica mais limpa, que causa menos impactos em várias categorias, mais principalmente em mudanças climáticas, depleção de combustíveis fósseis e outras.



**Figura 13.** Resultado do AICV da pelota do caso de estudo em comparação com a pelota do Ecoinvent pela metodologia ReCiPe EndPoint.

**Tabela 11.** Comparação da pelota do caso de estudo com o Ecoinvent pela metodologia ReCiPe.

| <b>Categoria de danos</b> | <b>Pelotas de Ferro Caso de Estudo</b> | <b>Ironpellet/Ecoinvent</b> | <b>Caso estudo/Ecoinvent %</b> |
|---------------------------|--|-----------------------------|--------------------------------|
| Saúde Humana              | 22,5                                   | 35,9                        | 63%                            |
| Ecossistemas              | 0,2                                    | 0,9                         | 24%                            |
| Recursos                  | 50,2                                   | 56,3                        | 89%                            |
| <b>Total</b>              | <b>72,9</b>                            | <b>93,1</b>                 | <b>78%</b>                     |

O uso da terra é bem inferior na modelagem da pelota do caso em estudo, devido à recuperação de 80% da área da mina, a qual não é considerada na modelagem do Ecoinvent. Já para o uso de terra agrícola, ocorre um impacto devido às áreas necessárias para a produção de amido de milho e mandioca especificada na modelagem da pelota de minério de ferro, mas que não estão modelados no Ecoinvent, ou não são usados generalizadamente no dataset do Ecoinvent.

Em suma, conforme a Tabela 10 pelo método ReCiPe *World H/A*, os resultados ponderados do AICV indicam que a pelota de caso em estudo tem impactos ambientais de 78% em comparação ao Ecoinvent.



## 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ferramenta de ACV está sendo cada vez mais incorporada aos processos de decisão em empresas. Ela tem revelado sua importância na quantificação de impactos ambientais e na avaliação das melhorias do ciclo de vida de processo, produtos e atividades.

Os resultados do estudo de caso identificaram que o processo de pelletização tem maior relevância nas categorias: formação fotoquímica, acidificação terrestre e ocupação da terra urbana, enquanto o processo de beneficiamento as categorias de ocupação da terra Agrícola, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade água são as que sofrem maior impacto. Já no processo de Lavra os impactos mais relevantes apontam para material particulado, e depleção de fósseis. No que se refere aos insumos e energia utilizados na produção de pelotas de minério de ferro, o estudo demonstrou que o óleo combustível, carvão, eletricidade e gás natural são os que têm maior impacto no ciclo de vida.

O resultado da análise comparativa demonstrou que a pelota de minério de ferro do caso de estudo apresenta impactos ambientais inferiores a pelota de minério de ferro global do bando de dados Ecoinvent. Entre outros motivos, cabe ressaltar o emprego da eletricidade do *grid* brasileiro baseada na hidroeletricidade, pelo transporte do minério tanto em correia transportadora na mina como no bombeamento da polpa no mineroduto.

Considera-se que o estudo foi realizado com todas as informações relevantes e dados disponíveis para a interpretação, exceto a emissão de particulados na mineração, que foram modeladas como no banco de dados do Ecoinvent.

As análises de sensibilidade não apresentaram grandes distorções aos parâmetros estudados, garantindo os resultados e conclusões, podendo-se admitir que as suposições, métodos e dados são consistentes com o objetivo e escopo.

Entende-se ainda que o levantamento apresentado no presente trabalho não esgota a discussão acerca da ACV. Esta se configura como uma ferramenta dinâmica sujeita a constantes aperfeiçoamentos no sentido de prover o mínimo de incerteza e o máximo de representatividade.

No que se refere às limitações de ACV para o setor mineral, há barreira da falta do acesso a uma robusta base de dados para realização dos inventários da mineração. Diante das diferenças entre os tipos de exploração a céu aberto ou subterrânea, dos diferentes métodos de mineração e do volume limitado de estudos de cada unidade de processo. As informações públicas disponíveis do processo de mineração, muitas vezes, não são conclusivas, pois são generalizadas, considerando um padrão médio de mineração. Tal limitação ocorre muitas vezes em virtude da confidencialidade das informações das empresas, dificultando o avanço da pesquisa na área.

Na ausência de um banco de dados que reflita suas peculiaridades energéticas e ambientais, o Brasil necessita um esforço amplo e coordenado para consolidar a ACV como um instrumento capaz de prover competitividade ambiental aos seus processos produtivos, principalmente no mercado internacional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e Estrutura. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro, 2009.
- ARAÚJO, M. G. Modelo de Avaliação do Ciclo de Vida para a Gestão de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos no Brasil. Tese de Doutorado. Programa de Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- AWUAH-OFFEI, K.; ADEKPEDJOU, A. Application of Life Cycle Assessment in the Mining Industry. *International Journal Life Cycle Assessment*, vol. 16, 82–89, 2011.
- AZAPAGIC; CLIFT. The Application of Life Cycle Assessment to Process Optimisation. *Computers and Chemical Engineering*, vol. 23, 1509 – 1526, 1999.
- CANCHUMANI, G. A. Óleos Lubrificantes Usados: um Estudo de Caso de Avaliação de Ciclo de Vida do Sistema de Rerrefino no Brasil. Tese de Doutorado. Programa de Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- BLENGINI, G. A., GARBARINO, E., SOLAR, S., SHIELDS, D. J., HÁMOR, T., VINAI, R., AGIOUTANTIS, Z., 2012. Life Cycle Assessment Guidelines for the Sustainable Production and Recycling of Aggregates: The Sustainable Aggregates Resource Management Project (SARMa). *Journal of Cleaner Production*, vol. 27, 177-181, 2013.
- BURCHART-KOROL, D. Life Cycle Assessment of Steel Production in Poland: a Case Study. *Journal of Cleaner Production*, vol. 54, 235-243, 2013.

- CASTELO BRANCO, D. A. Avaliação do Real Potencial de Redução das Emissões de CO<sub>2</sub> Equivalente com uso da Captura em uma UTE a Carvão. Tese de Doutorado. Programa de Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- CURRAN, M., A. Life Cycle Assessment: Principles and Practice. National Research Management Laboratory, Ohio, United States Environmental Protection Agency, 2006.
- CHEN, B.; YANG, J. X.; OUYANG, Z. Y. Life Cycle Assessment of Internal Recycling Options of Steel Slag in Chinese Iron and Steel Industry. *Journal of Iron and Steel Research, International*, vol. 18(7), 33-40, 2011.
- COLTRO, L. Avaliação de Ciclo de Vida como Instrumento de Gestão, 2007. Disponível em <http://pt.scribd.com/doc/42837176/ACV-Como-to-de>. Acessado em 08 de 2014.
- DURUCAN, S. E. Mining Life Cycle Modelling: A cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry. *Journal of Cleaner Production*, vol. 14, 1057–1070, 2006.
- EC (European Comission) JRC (Joint Research Centre) IES (Institute for Environment and Sustainability). ILCD International Reference Life Cycle Data System. Analysis of Existing Environmental Impact Assessment Methodologies for use in Life Cycle Assessment, 2010.
- EICKER, Margarita O. *et al.* Using Non-local Databases for the Environmental Assessment of Industrial Activities: The Case of American Latin. *Environmental Impact Assessment Review*, [S. l.], vol. 30, n<sup>o</sup> 3, p. 145-157, abril, 2010.
- FRISCHKNECHT, Rolf *et al.* Overview and Methodology. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007. Ecoinvent Report n<sup>o</sup> 1.

- GOEDKOOP M.; HEIJUNGS R.; DE SCHRYVER A.; STRUIJS J.; VAN ZELM R. ReCiPe 2008/Report I: Characterization. Holanda. Ministerie Van VROM, Den Haag, 2009.
- HELLWEG, S.; CANALS, L. M. Emerging Approaches, Challenges and Opportunities in Life Cycle Assessment. Science, vol. 334, 1108-1103, 2014.
- IHOBE. Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono - Dos Maneras de Medir el Impacto Ambiental de un Producto. Planificación Territorial, Agricultura y Perca del Gobierno Vasco, Departamento de Medio Ambiente, 2009.
- IBICT. Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos e Sistemas Produtivos (ACV). S/A. Disponível em Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT): <http://www.ibict.br/inclusao-social-e-popularizacao-da-ciencia/avaliacao-do-ciclo-de-vida-de-produtos-e-sistemas-produtivos>. Acesso em: 27 de agosto de 2014.
- INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inmetro/conmetro.asp>. Acesso em 8 de 2014.
- ISO 14040 - ABNT/ISO - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estruturas. NBR ISO 14040.2009.
- Li, G., Nie, Z., Zhou, H., Di, X., Liu, Y., Zuo, T. An Accumulative Model for the Comparative Life Cycle Assessment Case Study: Iron and Steel Process. J LCA, vol. 7 (4) 225 – 229, 2002.
- LIMA, Â. M. Avaliação do Ciclo de Vida no Brasil: inserção e perspectivas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia, Departamento de Engenharia Ambiental, 2007.
- LIMA, F.; LOVÓN-CANCHUMANI, G.; ARAÚJO, M.; OLIVEIRA, P. *et al.* Avaliação do Ciclo de Vida - ACV da produção de minério de ferro, considerando os aspectos energéticos e ambientais. Relatório Técnico, CETEM, 2015.

- MORETTI, T. V., & UGAYA, C. M. Avaliação da Estrutura Conceitual de Inventários de Ciclo de Vida Brasileiros. 2ª Mostra de Pesquisa e Pós-Graduação da UTFPR. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2010.
- NORGATE, T.; HAQUE, N. - Energy and Greenhouse Gas Impacts of Mining and Mineral Processing Operations - CSIRO Minerals Down Under Flagship, Box 312, Clayton South, Victoria, AUSTRALIA - Journal of Cleaner Production, vol.18 p. 266-274, 2010.
- PBACV. Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida Disponível em: <http://pbacv.blogspot.com.br/p/quem-somos.html>. Acesso em 27 de agosto de 2014.
- REID, C.; BÉCAERT, V.; AUBERTIN, M.; ROSENBAUM, R. K.; DESCHÊNES, L. Life Cycle Assessment of Mine Tailings Management in Canada. Journal of Cleaner Production 1, p. 471–479, 2009.
- SILVA, V. C., & PEREIRA, A. F. Estudos dos Aspectos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para Reaproveitamento de Resíduos Sólidos Industriais de Aciaria. Anais do 2º Congresso Internacional Interdisciplinar em Sociais e Humanidades (CONINTER). Belo Horizonte, 2013.
- SICV Brasil - Sistema Brasileiro de Inventário do Ciclo de Vida. Metodologia Padrão para Elaboração de Inventários de Ciclo de Vida da Indústria Brasileira – Documento Consolidado, 2009.
- SPITZLEY, D. V., & TOLLE, D. A. Evaluating Land-use Impacts: Selection of Surface Area Metrics for Life-cycle Assessment of Mining. Journal of Industrial Ecology, 8 (1-2), 11–21, 2004.
- UGAYA, C. M. Tópicos em Avaliação do Ciclo de Vida. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

YILMAZ, O., ANCTIL, A., & KARANFIL, T. LCA as a decision Support Tool for Evaluation of Best Available Techniques (BATs) for Cleaner Production of Iron Casting. *Journal of Cleaner Production*, 1-11, 2014.

ZOCHE, L. Identificação das limitações da ACV sob a Ótica de Pesquisas Acadêmicas. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2014.

## **SÉRIES CETEM**

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2014, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 280 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED), Gestão e Planejamento Ambiental (SGPA) e Inovação e Qualidade (SIQ). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <http://www.cetem.gov.br/series>.

### **Últimos números da Série Estudos e Documentos**

**SED- 88 – Previabilidade Econômica para uso do Bege Bahia como Carga em Compostos Poliméricos.**

Francisco Wilson Hollanda Vidal, Gilson Ezequiel Ferreira, Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Cristiano Francisco dos Reis e Carlos Alberto Felix, 2015.

**SED-87 – Potencial de Aproveitamento de Fontes Secundárias para Terras-Raras: Ímãs permanentes**

Rafael de Carvalho Gomes, 2015.

**SED-86 – Potencial de Aproveitamento de Fontes Secundárias para Terras-Raras: Resíduos industriais.**

Bruno Marques M. Bardano e Rafael de Carvalho Gomes, 2015.



## **INFORMAÇÕES GERAIS**

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral  
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária  
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ

Geral: (21) 3865-7222

Biblioteca: (21) 3865-7218 ou 3865-7233

Telefax: (21) 2260-2837

E-mail: [biblioteca@cetem.gov.br](mailto:biblioteca@cetem.gov.br)

Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

## **NOVAS PUBLICAÇÕES**

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



## Missão Institucional

A missão do Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é desenvolver tecnologia para o uso sustentável dos recursos minerais brasileiros.

## O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m<sup>2</sup> de área construída, que inclui 22 laboratórios, 3 usinas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 37 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 720 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.