

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS

GIOVANNA CHIUMENTO

**PRIORIZAÇÃO DE PROCESSOS ELEMENTARES E ADAPTAÇÃO DE BASES DE
DADOS DE INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA (ICVs)**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA
2016

GIOVANNA CHIUMENTO

**PRIORIZAÇÃO DE PROCESSOS ELEMENTARES E ADAPTAÇÃO DE BASES DE
DADOS DE INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA (ICVs)**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre em Engenharia”, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Curitiba. Área de Concentração: Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Cássia Maria Lie Ugaya

CURITIBA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

C543p Chiumento, Giovanna
2016 Priorização de processos elementares e adaptação de
bases de dados de inventários do ciclo de vida (ICVS)
/ Giovanna Chiumento.-- 2016.
133 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica e de Materiais. Área de Concentração: Engenharia
de Manufatura, Curitiba, 2016.

1. Ciclo de vida do produto - Avaliação. 2. Ciclo
de vida do produto - Inventários. 3. Banco de dados
- Adaptação. 4. Engenharia mecânica - Dissertações.
I. Ugaya, Cássia Maria Lie. II. Universidade Tecnológica
Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica e de Materiais. III. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO

GIOVANNA CHIUMENTO

PRIORIZAÇÃO DE PROCESSOS ELEMENTARES E ADAPTAÇÃO DE BASES DE DADOS DE INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA (ICVs)

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Engenharia de Manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Paulo César Borges, Dr.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora

Prof. Cássia Maria Lie Ugaya, Dr.
UTFPR - orientador

Amir Safaei, Dr.
ecoinvent

Prof. Marcelo Real Prado, Dr.
UTFPR

Prof. Milton Borsato, Dr.
UTFPR

Curitiba, 03 de Junho de 2016.

Aos meus pais, Ricardo e Janete.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas respostas das mais difíceis perguntas, pela proteção e pela constante presença em minha vida.

Aos meus pais, Ricardo e Janete, pelo incentivo à educação e pela doação sem medida ao que orgulhosamente chamamos de família. Ao Guilherme, perfeita definição da palavra “irmão”, a quem admiro incansavelmente e me orgulho a cada dia. À Renata, pela amizade, parceria e conselhos de irmã.

Ao Rafael, a quem devo o início, o desenvolvimento e a conclusão deste trabalho. Obrigada pela força em todos os momentos em que duvidei que fosse capaz. Seu apoio, carinho e companheirismo foram os degraus que me trouxeram até aqui.

Aos meus grandes amigos que pacientemente ouviram inúmeras histórias sobre Avaliação do Ciclo de Vida, mesmo que fora de hora. À Elisa, por dedicar sua manhã de sábado para ensinar programação. À Fran, Carol, Luine, Hiromi, Amanda, Larissa, Jéssica, Bianca, Allan, Tiago, meus tios e primos por torcerem por mim e se alegraram com as minhas conquistas.

Aos amigos que fiz ao longo do mestrado. Cada um à sua maneira foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho: Leandro, Elaine, Ernani, Paola, Vitor, Blancaliz e Marco. Obrigada pelos momentos de descontração, de conversas sérias, de apoio, de troca de conhecimentos e experiências, pelos conselhos e pelos pensamentos positivos. Agradeço especialmente à Leticia, com quem dividi casa, quarto, contas, trabalhos, histórias, risadas, viagens, alegrias, tristezas e um rigoroso inverno. Obrigada por estar ao meu lado, me ensinando que sempre é possível aprender mais um pouco e ser uma pessoa melhor. Aos demais colegas do LAMEC pelos períodos de convivência.

À minha orientadora, professora Cássia, que confiou em mim, me estimulou e desafiou para que este trabalho fosse além da dissertação. Obrigada pela oportunidade, pela paciência, pelas discussões enriquecedoras, pelos ensinamentos e conselhos profissionais. Aos demais professores e pesquisadores que contribuíram para o enriquecimento desta pesquisa, especialmente ao professor Walter Mikos, pelo espaço cedido, pelo apoio e pela incansável dedicação à profissão. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais (PPGEM) pelo suporte prestado.

À equipe do ecoinvent centre: Gregor, Amir, Tereza, Guillaume, Lucia, Linda, Emilia e Tarja. Obrigada pela oportunidade, pela rica troca de conhecimentos e por estarem sempre dispostos a ensinar. Vocês têm toda a minha admiração. “Once a minion, always a minion”. Agradeço também aos colegas Noor e Verônica, pelos momentos que compartilhamos juntos.

Ao Tiago, Felipe e Fábio, da ACV Brasil, por me permitirem aprender ainda mais sobre a ACV, pelas discussões acerca do tema e pela confiança em meu trabalho.

À PRé-Consultants e ecoinvent, pela disponibilização das licenças educacionais do software e da base de dados.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

“Portanto eu vos digo, pedi e recebereis; procurai e encontrareis; batei e vos será aberto. Pois quem pede, recebe; quem procura, encontra; e, para quem bate, se abrirá” (Lc 11, 9-10).

RESUMO

Chiumento, Giovanna. Priorização de processos elementares e adaptação de bases de dados de inventários do ciclo de vida (ICVs). 2016. 133 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

A necessidade de dados regionais em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é comum a muitos países em desenvolvimento, que buscam resultados mais representativos dos processos locais. Na ausência de bases de dados de inventários que representem o modo de produção local, geralmente são utilizados na análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) os dados que se encontrarem disponíveis. O desenvolvimento de uma base de dados consolidada, no entanto, exige investimentos em capacitação técnica, tempo e recursos. Uma alternativa para solucionar este problema é a adaptação de bases de dados, que possui a vantagem de não necessitar um investimento demasiado de recursos. Além disso, permite se valer de dados para outros processos que fazem parte do ciclo de vida do produto em um mundo globalizado. Com isso, o objetivo geral deste estudo é promover o desenvolvimento mais eficiente de dados de inventário aplicáveis aos estudos de ACV de serviços e produtos manufaturados nacionais, por meio da adaptação de bases de dados. Para isto, os processos elementares prioritários para a adaptação foram determinados, utilizando o software MATLAB R2013a, tendo como fonte dos dados o relatório dos cem maiores produtos industriais nacionais, publicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Além destes produtos, a geração de energia elétrica nacional também foi incluída na pesquisa. A base de dados selecionada para a adaptação foi o ecoinvent v.3.1 e a correspondência entre os itens do relatório do IBGE e a base de dados foi encontrada para 54 produtos. Os resultados de contribuição de processos, calculados com o método IMPACT 2002+, mostraram que menos de 1% da quantidade total de processos elementares da base de dados é relevante para a priorização. Um *ranking* de processos foi estabelecido ponderando os resultados das quatro áreas de dano do método. Os fluxos mais sensíveis a mudanças foram determinados por meio da aplicação da análise de perturbação, tanto para as intervenções tecnológicas quanto para as ambientais. Esta análise indicou que, para todas as categorias, menos de 100 fluxos tiveram multiplicadores maiores que 1%, o que representa cerca de 0,03% do número total de fluxos quantificados. Após a determinação dos processos prioritários e fluxos relevantes, a comparação das cadeias de produção foi realizada qualitativamente para alguns processos de produção, como o de leite, clínquer e ferro-gusa. A determinação dos processos elementares prioritários e dos fluxos mais sensíveis, bem como sua adaptação, se mostrou uma abordagem pertinente na tentativa de encaminhar os primeiros esforços para suprir as dificuldades encontradas na criação de *datasets* de produtos nacionais.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Adaptação de bases de dados; Inventário do Ciclo de Vida (ICV); Priorização.

ABSTRACT

Chiumento, Giovanna. Unit processes prioritization and life cycle inventory databases adaptation. 2016. 133 f. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The need for regional data in Life Cycle Assessment (LCA) studies is common to many developing countries, which are looking for representative results to local processes. In the absence of databases representing the local production, the studies generally use the available data. However, the development of a consolidated database requires investments as technical training, time and financial resources. An alternative to solve this problem is the adaptation of databases, which has the advantage of not requiring so many investments. It also allows the use of data from other processes that are part of the product life cycle in a globalizing world. Thus, the aim of this study is to promote the efficient development of inventory data applicable to LCA studies of national services and manufactured products, through the adaptation of databases. Therefore, the priority elementary processes for adaptation were determined using MATLAB R2013a software, using as data source the report of the top hundred industrial products, published by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). In addition to these products, the national electricity generation was also included in the research. The database selected for adaptation was the ecoinvent v.3.1 and the correspondence between the items of the IBGE's report and the database was found to 54 products. The results of process contribution calculated using IMPACT 2002+ method showed that less than 1% of the total amount of unit processes in the database is important to prioritization. A ranking of process was established by weighting the results of the four damage areas of method. The most sensitive flows were determined by application of the perturbation analysis, both for the technological and environmental interventions. This analysis indicated that, for all the categories, less than 100 flows had multipliers higher than 1%, which represents about 0.03% of the total number of quantified flows. After determination of the priority flows and relevant processes, comparison of production lines was qualitatively performed to some processes, such as milk, pig iron and clinker. The determination of priority unit processes and sensitive flows, as well as their adaptation, was a pertinent approach in the attempt to direct the first efforts to overcome the difficulties in creating datasets of national products.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA); Databases adaptation; Life Cycle Inventory (LCI); Prioritization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos unitários e agregados	25
Figura 2 - Classificação dos dados de acordo com a incerteza e contribuição	32
Figura 3 - Metodologia para adaptação de <i>datasets</i>	35
Figura 4 - Execução da Pesquisa.....	37
Figura 5 - Correspondência entre a base de dados e a fonte de dados.....	40
Figura 6 - Resultados de perturbação e incerteza para área de dano de mudanças climáticas.....	49
Figura 7 - Passos para a determinação dos fluxos prioritários para adaptação.	49
Figura 8 - Gráfico de contribuição dos processos para saúde humana.	60
Figura 9 - Gráfico de contribuição dos processos para mudanças climáticas.	61
Figura 10 - Gráfico de contribuição dos processos para qualidade do ecossistema.	64
Figura 11 - Gráfico de contribuição dos processos para recursos.	65
Figura 12 - Resultados de análise de perturbação para as intervenções tecnológicas	72
Figura 13 - Resultados de análise de perturbação para as intervenções ambientais.....	73
Figura 14 - Fluxos relevantes para o processo de produção de leite de vaca e silagem de capim.	77
Figura 15 - Resultados de análise de perturbação para a produção de eletricidade chinesa a partir de carvão mineral.	79
Figura 16 – Fluxos relevantes para o processo de produção de clínquer e cimento Portland.....	81
Figura 17 - Fluxos relevantes para o processo de produção de ferro-gusa e aço.....	82
Figura 18 - Resultados comparativos de caracterização para o ciclo de vida do leite, gado para abate e carne.	87
Figura 19 - Resultado de Impacto para Mudanças Climáticas para diferentes tipos de cimento.....	98
Figura 20 - Produção de ferro-gusa no Brasil de acordo com a fonte produtora.....	101
Figura 21- Resultados de avaliação de impacto de mudanças climáticas para a produção de ferro-gusa	107
Figura 22 - Análise de sensibilidade entre as emissões fósseis e não fósseis para a rota via carvão vegetal	108
Figura 23 - Produção de Aço considerando a entrada de ferro-gusa obtido por diferentes rotas.....	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações sobre as bases de dados – elaborado em abril de 2015.	28
Tabela 2 - Produtos com correspondência exata	52
Tabela 3 - Produtos com dupla contagem.....	53
Tabela 4 - Produtos não contemplados.....	54
Tabela 5 – Agregação de produtos	55
Tabela 6 - Produtos desagregados	56
Tabela 7 - Produtos relacionados a uma correspondência principal	56
Tabela 8 - Correspondências principais após considerações	57
Tabela 9 - Correspondências com oecoinvent	58
Tabela 10 - Processos elementares responsáveis pelo impacto na saúde humana .	61
Tabela 11 - Processos elementares responsáveis pelo impacto em mudanças climáticas.....	62
Tabela 12 - Processos elementares responsáveis pelo impacto na qualidade do ecossistema.	64
Tabela 13 - Processos elementares responsáveis pelo impacto em recursos.	66
Tabela 14 - Porcentagem do impacto total abrangida na ponderação.	67
Tabela 15 - Resultados de avaliação de impacto para as quatro áreas de dano.	67
Tabela 16 - Número de fluxos quantificados	72
Tabela 17 - Resultados de análise de perturbação para a área de dano de saúde humana	74
Tabela 18 - Resultados de análise de perturbação para a área de dano de mudanças climáticas.....	75
Tabela 19 - Resultados de análise de perturbação para a área de dano de recursos	75
Tabela 20 - Resultados de análise de perturbação para a área de dano de qualidade do ecossistema	76
Tabela 21 - Resultados de perturbação e incerteza para o processo elementar de produção de silagem de capim.....	78
Tabela 22 - Resultados de perturbação e incerteza para o processo elementar de produção de eletricidade chinesa.....	80
Tabela 23 - Resultados de perturbação e incerteza para o processo elementar de produção de clínquer.....	82
Tabela 24 - Resultados de perturbação e incerteza para o processo elementar de produção de ferro-gusa.	83
Tabela 25 - Caracterização dos sistemas de produção	84
Tabela 26 - Fluxos alterados nos datasets de produção de leite e de gado para o abate.	87
Tabela 27 - Resultados comparativos de caracterização para o ciclo de vida de produção de leite utilizando o método CML 2001 adaptado.	88
Tabela 28 - Comparação dos resultados após reajuste do fluxo de eletricidade	90
Tabela 29 - Produção anual de cimento Portland, segundo os tipos (em 1.000 toneladas).....	92
Tabela 30 - Teores dos componentes do Cimento Portland composto.....	93
Tabela 31 - Relação clínquer/cimento para diferentes países ao longo do tempo	93
Tabela 32 - Relação clínquer/cimento (eq.)	95
Tabela 33 - Composição dos <i>datasets</i> para a produção de cimento Portland	96

Tabela 34 - Emissões de CO ₂ por tonelada de clínquer para diferentes regiões ao longo do tempo.....	97
Tabela 35 - Composição do gás de alto forno antes da queima	103
Tabela 36 - Cálculo das emissões de CO e CO ₂ na produção de ferro-gusa– cenário 1	103
Tabela 37 - Fluxos adaptados para o cenário 2	105
Tabela 38 - Cálculo das emissões de CO e CO ₂ na produção de ferro-gusa– cenário 2	106
Tabela 39 - Comparação entre as abordagens de priorização.....	110
Tabela 40 - Processos elementares adaptados e sua influência no impacto total. .	112
Tabela 41 - Avaliação da adaptação	113

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV - Avaliação do Ciclo de Vida
BEN - Balanço Energético Nacional
CLCD - Chinese Reference Life Cycle Database
CPM - Center for Environmental Assessment of Product and Material Systems
CSI - Cement Sustainability Initiative
ELCD - European Reference Life Cycle Database
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
EPLCA - European Platform on Life Cycle Assessment
GAF - Gás de Alto-Forno
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT - Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV - Inventário do Ciclo de Vida
JEMAI - Japan Environmental Management Association for Industry
JRC - Joint Research Centre
MiLCA - Multiple Interface Life Cycle Assessment
MME - Ministério de Minas e Energia
MY-LCID - Malaysia Life Cycle Inventory Database
NREL - National Renewable Energy Laboratory
RoW - Rest of the world
SICV Brasil - Sistema Brasileiro de Inventários do Ciclo de Vida
SINDIFER - Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais
SNIC - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
TSP - Superfosfato triplo
US PCA - United States Portland Cement Association
WBCSD - World Business Council for Sustainable Development
WSA - World Steel Association

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS.....	21
1.2	JUSTIFICATIVA.....	22
1.3	ESTRUTURAÇÃO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	BASES DE DADOS E CRITÉRIOS PARA SUA ESCOLHA	24
2.2	PRIORIZAÇÃO DE PROCESSOS PARA A ADAPTAÇÃO	29
2.3	ADAPTAÇÃO DE DATASETS	33
3	MÉTODO.....	37
3.1	IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS ELEMENTARES QUE MAIS CONTRIBUEM PARA O IMPACTO AMBIENTAL	38
3.1.1	Determinação dos produtos de maior relevância nacional e justificativa acerca da priorização.....	38
3.1.2	Escolha da base de dados a ser utilizada no projeto	39
3.1.3	Determinação da correspondência entre os produtos e a base de dados.....	40
3.1.4	Determinação dos processos elementares mais significativos na geração de impactos ambientais.....	42
3.1.5	Ponderação dos resultados de caracterização para determinação de um ranking de produtos.....	46
3.2	IDENTIFICAÇÃO DOS FLUXOS MAIS SENSÍVEIS A MUDANÇAS.....	46
3.3	DETERMINAÇÃO DOS FLUXOS ELEMENTARES E INTERMEDIÁRIOS PRIORITÁRIOS PARA ADAPTAÇÃO.....	48
3.4	COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS ELEMENTARES E ADAPTAÇÃO DOS DATASETS	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	DETERMINAÇÃO DOS PROCESSOS ELEMENTARES QUE MAIS CONTRIBUEM PARA O IMPACTO AMBIENTAL	52
4.1.1	Correspondência com a base de dados.....	52
4.1.1.1	Considerações para determinação da correspondência	55
4.1.1.2	Produtos e datasets correspondentes	57
4.1.2	Resultados de Contribuição do Processo.....	60
4.1.3	Determinação do ranking de produtos para adaptação.....	67
4.2	RESULTADOS DE SENSIBILIDADE DOS FLUXOS.....	71
4.3	IDENTIFICAÇÃO DOS FLUXOS PRIORITÁRIOS PARA A ADAPTAÇÃO	76
4.3.1	Processo de produção de silagem de capim e relação com a produção de leite de vaca.....	77
4.3.2	Processo de produção de eletricidade chinesa a partir de carvão mineral.....	79
4.3.3	Processo de produção de clínquer e cimento Portland	81
4.3.4	Processo de produção de ferro-gusa e aço.....	82
4.4	COMPARAÇÃO DAS CADEIAS DE PRODUÇÃO E ADAPTAÇÃO DOS DATASETS	83
4.4.1	Processo de produção de silagem de capim e relação com a produção de leite de vaca.....	83
4.4.2	Processo de produção de eletricidade chinesa a partir de carvão mineral.....	90
4.4.3	Processo de produção de clínquer e cimento Portland	91
4.4.4	Processo de produção de ferro-gusa e aço.....	99
4.5	COMPARAÇÃO ENTRE AS ABORDAGENS DE priorização	110

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ADAPTAÇÃO.....	111
4.6.1 Avaliação da qualidade da adaptação.....	112
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
REFERÊNCIAS.....	118
ANEXO A - Produção e vendas dos 100 maiores produtos e/ou serviços industriais, segundo a posição nacional em valor das vendas.....	129
ANEXO B - Composição do vetor de demanda f.....	133

1 INTRODUÇÃO

A crescente conscientização sobre a proteção ambiental e os possíveis impactos associados à manufatura e consumo de produtos gerou o interesse em desenvolver métodos para compreender e reduzir estes danos. Uma das técnicas desenvolvidas para este fim é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (ABNT, 2009).

De acordo com Baumann e Tillman (2004), o ciclo de vida de um produto expressa todas as etapas, desde o “berço”, no qual matérias primas são extraídas de recursos naturais, passando pelos diversos estágios de produção e uso, até o “túmulo”, que representa a disposição final.

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2009), a ACV é uma técnica que permite avaliar os aspectos e impactos ambientais potenciais associados a um produto e contempla quatro fases: definição do objetivo e escopo, a análise de inventário, a avaliação de impactos ambientais e a interpretação dos resultados.

O Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é a fase da ACV na qual acontece a coleta de dados e são quantificadas as entradas e saídas relevantes do sistema do produto. Usualmente, no inventário do ciclo de vida estão incluídas as emissões e consumo de recursos de cada estágio do ciclo (REBITZER et al., 2004).

A coleta de dados consome muito tempo, principalmente quando se tem de recorrer a muitos fornecedores ou encontrar dados de atividades mais remotas (BAUMANN e TILLMAN, 2004). Esta atividade é bastante desafiadora, muito devido à falta de dados apropriados relacionados ao sistema do produto¹ em questão (FINNVEDEN et al., 2009). Os autores destacam que para facilitar a obtenção do inventário e evitar duplicações na compilação dos dados, diferentes bases de dados foram desenvolvidas nas últimas décadas.

Uma base de dados de ICVs tem como finalidade organizar e armazenar grandes quantidades de conjuntos de dados, facilitando a realização de estudos de ACV. Em 2011, foi estabelecido um guia para a organização destes dados, incluindo metodologia, formato, revisão e nomenclatura (SONNEMANN e VIGON, 2011).

¹ Sistema do produto é o conjunto de processos elementares, com fluxos elementares e de produto, desempenhando uma ou mais funções definidas e que modela o ciclo de vida de um produto (ABNT, 2009).

Para desenvolver uma Avaliação de Ciclo de Vida confiável é essencial que as bases de dados apresentem dados uniformes, que permitam a obtenção de modelos consistentes e que sirvam de apoio à tomada de decisões (SONNEMANN et al, 2011). O estudo de Sonnemann e colaboradores (2013) afirma que economias emergentes e países em desenvolvimento necessitam de uma orientação global para auxiliar o desenvolvimento de sua base de dados, a fim de garantir uma eficiente alocação de recursos, confiabilidade, qualidade e comparabilidade entre regiões.

Iniciativas em entidades governamentais, empresariais e acadêmicas foram tomadas ao redor do mundo e bases de dados nacionais e internacionais foram lançadas com o intuito de fornecer dados de inventário de produtos e serviços. Dentre elas pode-se citar a US NREL, a SPINE@CPM, o ecoinvent e o ELCD (FINNVEDEN et al., 2009).

O estudo de Curran et al. (2006) apresentou um panorama a respeito dos esforços para desenvolvimento de bases de dados publicamente disponíveis em nível nacional. De acordo com a pesquisa desenvolvida pelos autores, é possível concluir que países em desenvolvimento não possuem alta capacidade para a execução de ACVs e que o interesse do governo e de indústrias em fomentar estas atividades é baixo. Ainda assim, há evidências de desenvolvimento de estudos no tema em países da América Latina e na África do Sul. Na região da Ásia-Pacífico, a necessidade de uma base de dados já foi identificada e iniciativas estão sendo tomadas, guiadas principalmente pelo Japão. Os autores comentam ainda que muitas bases de dados foram lançadas na Europa nos últimos anos. Além disso, setores industriais específicos e grupos de produtos são caracterizados por bases de dados de universidades e consultorias. Países como a Alemanha, Suíça e Suécia são ativos no desenvolvimento de inventários há muitos anos, e agora enfrentam o desafio de integrar e garantir a comparação das diversas bases de dados de ICVs.

No Brasil iniciativas de pesquisa na área já foram tomadas por instituições acadêmicas, governamentais e empresariais. O Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), vinculado ao Ministério da Ciência e Tecnologia, tem um projeto cujo propósito é a organização de forma padronizada de informações referentes à ACV de produtos e serviços (IBICT, 2015). Este instituto coordena e gerencia a implementação e publicação do Sistema Brasileiro de Inventários do Ciclo de Vida (SICV Brasil), cuja finalidade é armazenar ICVs da indústria brasileira,

além de manter, criar e disponibilizar o acesso aos dados (ROJAS et al., 2012). O programa de gestão de ICVs, promovido pelo mesmo instituto, será disponibilizado para diferentes setores econômicos e contempla a elaboração, disponibilização e manutenção de dados de inventários do ciclo de vida. Por meio da participação de diferentes fabricantes de produtos nacionais, centros de pesquisa, órgãos ambientais, entre outros, será possível aprimorar características como infraestrutura, manutenção e qualificação deste sistema (LAMB e LUSTOSA, 2014). Estas iniciativas, contudo, estão em andamento e ainda não há evidências de uma base de dados consolidada e com inventários disponíveis no país.

Willers e Rodrigues (2014) concluíram que os estudos brasileiros de ACV poderiam melhorar as fontes de dados, já que poucos estudos por eles avaliados utilizaram dados primários. Deste modo, o desenvolvimento de uma base de dados científica para ser usada como referência nacional poderia contribuir na consolidação da técnica de ACV no país. O aprimoramento dos modelos minimizará o risco de ocasionar erros que possam comprometer a competitividade de produtos e serviços locais (CONMETRO, 2010). Além disso, proporcionará estudos de ACV que possuam qualidade nos resultados e confiabilidade na representação dos processos.

A construção da base de dados brasileira deve considerar os requisitos de bases de dados internacionais para que haja consistência entre elas, já que os produtos de uma ACV são globalizados, ou seja, envolvem etapas que ocorrem em outros países, como por exemplo, a produção de determinadas matérias primas. É considerável, portanto, que os conjuntos de dados (*datasets*) brasileiros sejam compatíveis com os disponíveis em bases de dados internacionais. De acordo com Sonnemann e Vigon (2011), os critérios estabelecidos pelas bases de dados envolvem o escopo e as fronteiras do sistema em questão, a nomenclatura aplicada, entre outros.

Na ausência de bancos de dados de inventários e de modelos desenvolvidos de acordo com o modo de produção local, geralmente são utilizados na análise do inventário do ciclo de vida os dados que se encontrarem disponíveis. Nos estudos de ACV desenvolvidos para casos brasileiros, por exemplo, bases de dados internacionais são utilizadas para suprir a falta de dados regionais (Pegoretti et al., 2014; Rocha et al., 2014), já que não há uma base de dados consolidada no país.

Muitas vezes, entretanto, os dados internacionais não são adequados à realidade encontrada na região onde o estudo ocorre.

A construção de uma base de dados, no entanto, exige capacitação técnica, tempo e grande quantidade de recursos financeiros. O estudo de De Eicker et al. (2010a) sugere diferentes estratégias para lidar com o problema da falta de bases de dados nos países da América Latina. Dentre as soluções propostas, encontra-se a possibilidade de adaptar bases de dados existentes em vez de criar uma nova, o que demanda menor quantidade de recursos. Independente de como a base de dados será elaborada, necessita-se que sejam avaliados quais setores industriais ou agrícolas merecem prioridade na coleta de dados e na elaboração dos *datasets*.

A iniciativa de adaptação de base de dados foi tomada no Quebec a fim de desenvolver uma base de dados que contemplasse dados regionais (Lesage e Samson, 2013). Os autores selecionaram a base de dados doecoinvent para adaptar os conjuntos de dados de processos respeitando as condições locais. Uma lista de prioridades foi estabelecida para que a regionalização obtivesse sucesso e deste modo, os *datasets* que contemplam a realidade do Quebec estão disponíveis para serem utilizados nos estudos locais.

Na China, a construção da base de dados nacional priorizou os processos que eram mais utilizados em uma base de dados já existente (WANG et al., 2011). Os autores constataram que poucos processos eram conectados a inúmeros outros e, com isso, a adaptação de tais processos foi o ponto de partida na criação da *Chinese Reference Life Cycle Database (CLCD)*.

A adaptação de bases de dados possui a vantagem de não necessitar um investimento demasiado de recursos. Além disso, permite se valer de dados para outros processos que fazem parte do ciclo de vida do produto em um mundo globalizado. Isto faz com que desafios na coleta de dados de ICVs sejam minimizados, visto que um número bastante inferior de dados é necessário. Rebitzer et al. (2004) já pontuaram alguns destes desafios tais como: o nível exigido de conhecimento do processo para a compilação dos dados; a dificuldade na obtenção dos dados que podem ser de propriedade tecnológica de empresas; a conformidade na medição das quantidades de cada produto, recurso ou poluente; a consistência na nomenclatura utilizada em todo o sistema do produto; entre outros.

O presente trabalho surge, então, como uma oportunidade de preencher a lacuna que existe a respeito da falta de dados de inventário que representem as

condições brasileiras, por meio da adaptação de bases de dados. Diferente das abordagens do Quebec e da China, a priorização será feita para os processos elementares destacados como ambientalmente mais relevantes e a adaptação para aqueles em que diferenças nas cadeias de produção forem encontradas.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral priorizar os processos elementares e fluxos mais relevantes ambientalmente e adaptar conjuntos de dados para a realidade nacional. Desta forma, é possível promover o desenvolvimento mais eficiente de dados de inventário aplicáveis aos estudos de ACV de serviços e produtos manufaturados nacionais. Mais que isso, dados que sejam condizentes com os processos de produção locais e que possam ser aplicados no desenvolvimento da técnica no Brasil.

Para que o objetivo geral seja alcançado, foram definidos os objetivos específicos, listados abaixo:

- Identificar os processos elementares que mais contribuem para o impacto ambiental;
- Identificar os fluxos que são mais sensíveis a variações e determinar a prioridade de adaptação em termos de fluxos elementares e intermediários;
- Comparar os processos produtivos nacionais e internacionais qualitativamente para cada processo elementar prioritário selecionado;
- Ajustar as diferenças encontradas e recalcular a contribuição do novo conjunto de dados para os impactos ambientais.

1.2 JUSTIFICATIVA

A falta de informações acerca dos processos produtivos nacionais faz com que em muitos estudos sejam utilizados dados de processos internacionais. Estes dados geralmente não representam a realidade nacional, que possui matriz energética característica e plantas industriais de diferentes origens tecnológicas.

Para fundamentar o estabelecido acima, alguns estudos mostram que os dados ambientais de processos em diferentes regiões podem acarretar em resultados distintos na ACV. Um exemplo é o trabalho de Ugaya e Walter (2004) em que se comparou os dados nacionais e internacionais da produção do aço. Foi concluído que, embora os dados não fossem do mesmo ano, não houve padrão algum: enquanto a energia total utilizada foi muito parecida, a produção do aço brasileira utilizava-se de carvão vegetal e na internacional não, e além disso, as emissões de materiais particulados foram muito maiores nos Estados Unidos.

Outros estudos, como o de Tsiropoulos et al. (2014) também têm a mesma conclusão. Os autores compararam a produção do etanol da cana de açúcar no Brasil e na Índia e concluíram que, embora os dados brasileiros necessitem de uma melhor qualidade para alguns parâmetros específicos, eles são caracterizados pela robustez e precisão quando comparados aos dados da produção na Índia. Pode-se reafirmar então, que há diferenças notáveis nos resultados ambientais, mesmo comparando a produção em países com características econômicas semelhantes. Portanto, utilizar os mesmos dados para estudos de ACV nestes dois casos não representaria as características de cada região e os resultados não seriam fiéis à realidade.

A priorização dos processos elementares que devem ser adaptados pode fomentar políticas públicas no sentido de direcionar esforços para os setores ambientalmente mais críticos. Além disso, a adaptação de conjuntos de dados de ICV para a realidade nacional pode ampliar a utilização da técnica da ACV no país e mitigar os problemas de interpretação causados pela utilização de dados internacionais.

1.3 ESTRUTURAÇÃO

Este trabalho é apresentado em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução, os objetivos, a justificativa e a estruturação. No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica acerca de diferentes bases de dados de ICVs, da priorização de processos e da adaptação de conjuntos de dados (*datasets*), a fim de contextualizar o tema pesquisado dentro da comunidade científica da ACV. No capítulo 3 o método para a realização do estudo é apresentado, o qual foi dividido em três partes: a priorização dos processos elementares; a identificação dos fluxos mais relevantes; e o modo de adaptação. O capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa e as discussões, que incluem a determinação dos processos elementares prioritários, os resultados de sensibilidade dos fluxos, a identificação dos fluxos prioritários para a adaptação, a comparação das cadeias de produção para os processos selecionados e a análise dos resultados de adaptação. Por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica do presente trabalho contempla três tópicos principais que servem como base para o presente estudo. O primeiro mostra as bases de dados existentes e os critérios considerados para a sua escolha. O segundo tópico aborda a questão da priorização de processos elementares para a adaptação. Por fim, o terceiro tópico trata da adaptação de *datasets*.

2.1 BASES DE DADOS E CRITÉRIOS PARA SUA ESCOLHA

De acordo com De Eicker et al. (2010a), a adaptação de bases de dados pode ser uma solução mais acessível para países que ainda carecem desta ferramenta. Para tanto, é necessário selecionar a base de dados que será utilizada como ferramenta para a adaptação.

Na publicação de Sonnemann e Vigon (2011), os autores introduzem princípios globais para servirem de guia na construção de uma base de dados e listam características importantes que devem estar presentes no gerenciamento da mesma. Entre eles está a responsabilidade no provimento dos dados, o apoio técnico e metodológico, a manutenção e atualização, o nível apropriado de transparência, a harmonização entre novas abordagens e *datasets* com os já existentes, entre outros. Os autores comentam ainda que, em geral, há três considerações importantes no gerenciamento de uma base de dados: a garantia de um alto nível de consistência entre os conjuntos de dados, a clara definição das responsabilidades e papéis de cada ator, e o planejamento da viabilidade da base de dados em longo prazo.

Além das características de gerenciamento já citadas, a qualidade dos dados e o nível de agregação dos mesmos também são fatores que devem ser considerados ao trabalhar com uma base de dados específica.

Os processos podem ser apresentados de forma distinta em cada base de dados, podendo ser em nível unitário ou um sistema agregado (Figura 1). Informações acerca da tecnologia empregada no processo, da região em que ocorre

e da qualidade dos dados são geralmente disponibilizadas na forma de meta dados (KOSKELA e HILTUNEN, 2004).

De acordo com Finnveden et al. (2009), algumas bases de dados como o ecoinvent e a US NREL fornecem dados de inventários de forma desagregada por meio de processos unitários². Isto significa que as entradas e saídas são computadas em cada etapa do processo de produção e geralmente se referem a tecnologias específicas. Segundo os autores, isto possibilita a adaptação de inventários e a escolha das tecnologias que compõem o caso investigado. Além disso, os processos unitários permitem a revisão de detalhes dos processos e escolhas metodológicas, mudanças nos inventários, como por exemplo, o mix de energia elétrica e até a escolha de outro princípio de alocação.

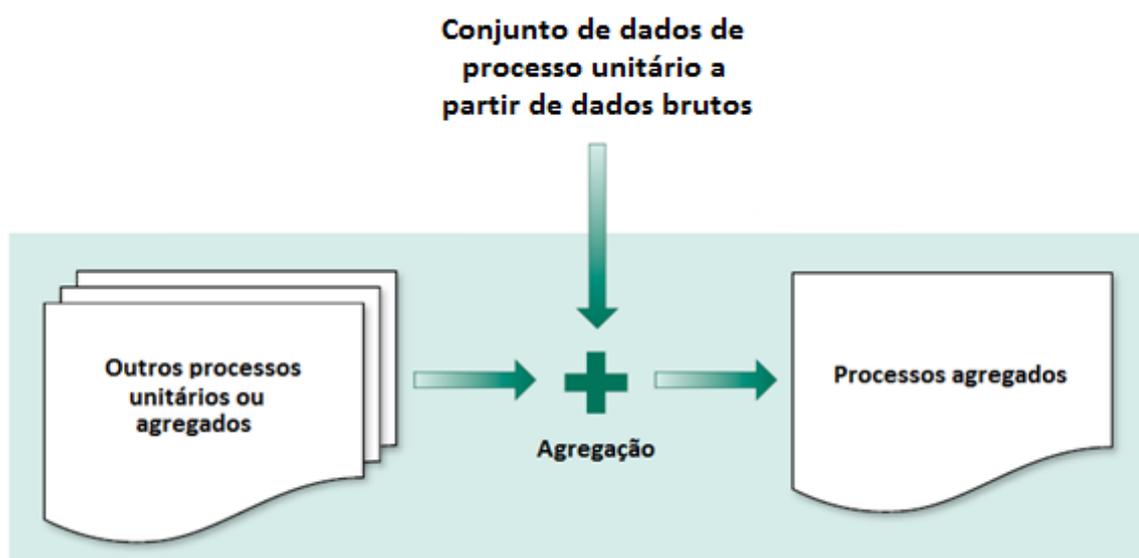


Figura 1 - Processos unitários e agregados
 FONTE: Adaptado de Sonnemann e Vigon (2011)

Sonnemann e Vigon (2011) afirmam que os processos em nível unitário são sempre preferíveis e destacam boas razões para o fornecimento dos mesmos. Primeiramente porque os processos unitários apresentam maior nível de transparência e permitem que os usuários saibam quais processos são usados por um dado fluxo de referência e como estes processos são conectados. Em segundo

² Processo unitário, ou processo elementar, é o menor elemento considerado na análise de inventário do ciclo de vida para o qual dados de entrada e saída são quantificados (ABNT, 2009).

lugar, porque os processos unitários tornam as bases de dados flexíveis e adaptáveis, já que eles refletem melhor a situação a ser avaliada. A terceira vantagem em trabalhar com processos unitários é que eles podem melhorar a interpretação dos estudos, visto que é possível identificar o processo chave para realizar análises de sensibilidade variando parâmetros como entradas e saídas. É possível saber, por exemplo, não só qual material ou produto químico que contribui significativamente para uma dada categoria de impacto, mas também saber especificamente qual processo do ciclo de vida é o maior contribuinte. Deste modo, podem-se direcionar esforços na melhoria deste processo para promover a redução de sua carga ambiental.

Frischknecht (2004) também comenta acerca da transparência na ACV e as vantagens de utilizar processos unitários. O autor afirma que o fornecimento de inventários transparentes permite que as partes interessadas façam uma revisão independente e uma avaliação individual da origem dos fluxos ou processos elementares mais relevantes para o meio ambiente. Além disso, os dados de processos unitários podem ser adaptados para necessidades particulares dos praticantes, o que não é possível quando se trabalha com processos agregados.

Por outro lado, utilizar processos agregados pode ser mais conveniente quando se trabalha com ferramentas como *softwares*, pois o tempo consumido pelos cálculos é reduzido e a memória requerida também é menor. Além disso, usuários que não têm domínio técnico para modelar cadeias de processos podem se beneficiar com o nível de agregação. Outra razão que favorece o uso de agregação é o fato de ela garantir a confidencialidade dos dados, principalmente ao se considerar dados industriais. É recomendado, entretanto, que haja uma documentação técnica para estes processos e que eles sejam os mais transparentes possíveis, para que os usuários possam utilizá-los em aplicações particulares (SONNEMANN E VIGON, 2011).

Muitas bases de dados foram desenvolvidas para facilitar a realização das ACVs ao redor do mundo. A maioria delas trabalha com processos agregados e unitários em nível nacional. É o caso da *U.S. Life Cycle Inventory Database* dos Estados Unidos, da *SPINE@CPM* da Suécia, do *ecoinvent* da Suíça, da *MY-LCID* da Malásia e da *MiLCA* do Japão. Já a *ELCD* da Europa trabalha com processos em nível agregado. Por outro lado, a *CLCD* da China trabalha com processos em nível unitário.

A *U.S. Life Cycle Inventory Database* desenvolvida pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) é uma base de dados pública que trabalha com processos unitários e agregados de diversas áreas, como energia e fluxos materiais (NREL, 2015). Em um relatório publicado por Deru (2009), o objetivo principal desta base de dados é definido como sendo o fornecimento de dados de ICV de alta qualidade que sejam compreensíveis, transparentes e criticamente revisados. O acesso à base de dados é livre e atualmente possui 965 *datasets* de produtos e 2195 de fluxos elementares (NREL, 2015).

O *Joint Research Centre* (JRC) lançou a *European Platform on Life Cycle Assessment* (EPLCA) a fim de facilitar e propagar o desenvolvimento de estudos de ACV na Europa. Com isso, a *European reference Life Cycle Database* (ELCD) foi criada em 2006 e atualmente encontra-se na versão 3.1. Possui em torno de 300 *datasets* com dados de indústrias químicas e mecânicas, transporte, produção de energia, tratamento de resíduos, entre outros. Estes dados estão disponíveis gratuitamente e não há restrições de uso ou acesso (ELCD, 2015). Os processos, entretanto, são apresentados em nível agregado e a ELCD é adequada para estudos que contemplem todas as etapas do ciclo de vida.

A base de dados do *Center for Environmental Assessment of Product and Material Systems* (CPM) foi desenvolvida na Suécia em 1996 e é chamada de SPINE@CPM. Durante anos, os dados foram documentados, revisados e adicionados à base de dados. O escopo técnico contém processos unitários e agregados, e ao todo são 745 processos (SPINE@CPM, 2015). Todos os *datasets* são bem documentados e foram revisados levando em conta a transparência e compreensibilidade (CURRAN et al., 2006).

A base de dados internacional ecoinvent foi desenvolvida na Suíça com o intuito de fornecer dados de inventário consistentes, visto que, antes da sua criação as bases de dados existentes não coincidiam entre si e os resultados eram dependentes dos institutos que os produziam. Ela se tornou, então, uma importante ferramenta utilizada em estudos de ACV e na obtenção de inventários, pois contempla dados de alta qualidade para diferentes áreas como energia, transporte, madeira, metais, químicos, agricultura, entre outras (FRISCHKNECHT et al., 2007). Atualmente, a versão 3.1 do ecoinvent contempla mais de onze mil *datasets* que representam diversas regiões do mundo. Cada um deles descreve, sempre que possível uma atividade em nível de processo unitário (WEIDEMA et al., 2013).

O governo da Malásia, juntamente com a empresa SIRIM Berhad, apoiou iniciativas no desenvolvimento de estudos de ACV e da *Malaysia Life Cycle Inventory Database* (MY-LCID), a fim de auxiliar abordagens de produção mais limpa nas atividades industriais do país. A base de dados da Malásia conta com 166 *datasets* que abrangem processos unitários e agregados (MY-LCID, 2015).

A *Japan Environmental Management Association for Industry* (JEMAI) criou um sistema de apoio à ACV conhecido como MiLCA (*Multiple Interface Life Cycle Assessment*). Este sistema possui mais de três mil *datasets* de processos unitários e agregados e executa cálculos básicos de ACV, incluindo análise de inventário e avaliação de impacto (MiLCA, 2015).

Na China, a CLCD (*Chinese Reference Life Cycle Database*) foi criada baseando-se nos *datasets* mais utilizados na base de dados doecoinvent. Atualmente, ela possui 600 *datasets* de processos unitários que foram obtidos a partir de dados de literatura, cooperativas e indústrias chinesas (CLCD, 2015). A Tabela 1 apresenta as informações acerca das bases de dados mencionadas.

Tabela 1 - Informações sobre as bases de dados – elaborado em abril de 2015.

BASE DE DADOS	TRANSPARÊNCIA		NÚMERO DE PROCESSOS
	Processos Unitários	Processos Agregados	
U.S Life Cycle Inventory Database	X	X	965
European reference Life Cycle Database (ELCD)		X	~300
SPINE@CPM	X	X	745
Ecoinvent	X	X	11332
MY-LCID	X	X	166
MiLCA	X	X	3000
CLCD	X		600

O estudo desenvolvido por Lesage e Samson (2013), sobre adaptação de bases de dados, mencionou que o principal critério para a seleção da mesma foi a transparência, ou seja, a disponibilidade de *datasets* em nível de processo unitário. Com isso, duas bases de dados atenderam ao critério: a US NREL e o ecoinvent. Diversas razões técnicas fizeram com que os autores escolhessem trabalhar com a base de dados do ecoinvent. Dentre elas estão a qualidade e coerência dos *datasets*, o número de processos abrangidos pela base de dados, a facilidade em

incluir dados regionais e os indicadores de qualidade e incerteza contidos para cada fluxo. Além destas características, os autores pontuam que aspectos não técnicos também auxiliaram na decisão, como o suporte técnico, a revisão gratuita dos *datasets*, a infraestrutura de criação e armazenamento dos mesmos e as condições acerca de propriedade intelectual.

Os trabalhos citados mostraram a importância de utilizar *datasets* de processos unitários quando se pretende adaptar uma base de dados. Quanto maior for o nível de transparência mais fácil se torna a seleção dos processos elementares mais relevantes ambientalmente de acordo com as características do país em questão. Outro fator significativo é a abrangência da base de dados no que diz respeito ao número de *datasets* englobados. É considerável que este número seja o maior possível, para que possa atender as prioridades de cada estudo.

2.2 PRIORIZAÇÃO DE PROCESSOS PARA A ADAPTAÇÃO

Em virtude da complexidade envolvida na criação de uma base de dados, em muitos casos é preferível adaptar *datasets* de uma base de dados já existente. As características relevantes para a seleção da mesma já foram mencionadas. Feito isto, o próximo ponto que merece destaque é a seleção de quais processos devem ser priorizados. Os critérios envolvidos para selecionar estes processos podem variar de acordo com as necessidades dos usuários, visto que a técnica de adaptação de bases de dados pode ser aplicada por empresas de diferentes setores industriais e por iniciativas de cunho acadêmico e governamental. Diferentes abordagens para a priorização podem ser levadas em conta tais como o valor econômico do processo, a conexão dele com outros, o fator ambiental, entre outros.

No estudo de Lesage e Samson (2013) tais prioridades foram ajustadas juntamente com autoridades governamentais. Os autores estabeleceram dois grupos de processos relevantes: o de recontextualização e o de priorização de setores.

A recontextualização foi definida como o processo de criação de uma versão regional de um *dataset* já existente, para que possa ser reconectado a outros *datasets* específicos para o Quebec. Esta simples especificação do local em que a atividade de transformação ocorre pode influenciar significativamente os ICVs

acumulados. Deste modo, a recontextualização auxilia na melhoria da relevância regional dos ICVs acumulados. Entretanto, é uma solução parcial já que não adiciona informações sobre as diferenças de processo entre a média global e a atividade de transformação regional. Aspectos importantes como a tecnologia empregada, a eficiência energética, o mix de eletricidade, entre outros, não são levados em conta. Por isso, os autores mencionam que a recontextualização é apenas o primeiro passo para a regionalização de *datasets*. Esta abordagem é bastante útil em *datasets* em que o consumo de eletricidade é bastante significativo. A eletricidade do Quebec é representada em mais de 96% por hidrelétricas e, por isso, recontextualizar este processo unitário pode elevar significativamente a relevância regional dos ICVs acumulados. Os processos selecionados para recontextualização foram aqueles em que a contribuição da eletricidade foi maior que 25% dos impactos totais do berço ao portão para pelo menos um dos 4 indicadores avaliados na pesquisa.

Já para a priorização de setores, Lesage e Samson (2013) comentam que diferentes abordagens foram usadas para avaliar a significância ambiental de cada setor industrial. Em todas as abordagens os setores foram comparados de acordo com suas contribuições para os impactos de mudanças climáticas e saúde humana, utilizando o método de avaliação de impacto IMPACT 2002+. Doze setores foram definidos como prioritários, sendo: agricultura, químicos básicos, biocombustíveis, energia, fertilizantes e fitossanitários, metais, não metais, polpa e papel, transporte, tratamento de resíduos, tratamento de água, e madeira e seus derivados.

O estudo desenvolvido por Wang et al. (2011) sobre a criação de uma base de dados de inventários de ciclo de vida na China, chamada de *Chinese Reference Life Cycle Database* (CLCD), comenta sobre a seleção dos produtos que devem ter a coleta de dados priorizada. Para tanto, os autores optaram por avaliar quais produtos eram mais utilizados na base de dadosecoinvent v.2.0. Do total de quatro mil processos desta versão, foi constatado que apenas 14% são utilizados mais de dez vezes, significando para os autores que uma pequena quantidade de produtos é mais relevante, já que eles são interligados mais vezes. Estes produtos foram então denominados fundamentais e tiveram prioridade na coleta de dados e desenvolvimento de *datasets* da CLCD. A geração e transmissão de eletricidade foram definidas como ponto inicial e, ao longo do desenvolvimento do projeto, outros produtos industriais foram incluídos. A versão 1.0 da CLCD contempla produtos

relacionados aos setores de energia, metais e não metais, químicos, transportes e tratamento de resíduos.

As diferentes abordagens para priorização citadas acima são bastante relevantes e mostram que é possível adaptar processos partindo de distintos pontos iniciais. Conforme já reconhecido por Lesage e Samson (2013) apenas alterar o mix de eletricidade nos *datasets* existentes não garante a regionalização, visto que aspectos chave não são levados em conta neste caso. Por outro lado, a priorização por setores demonstrou ser mais interessante para a adaptação, já que um fator ambiental foi levado em conta na determinação dos setores relevantes. O estudo mencionado não deixou claro qual dos setores ou processos demanda maior urgência ou contribui mais para os impactos ambientais, entretanto, declarou que um número de aproximadamente duzentos processos tem alta prioridade. Ressalta-se também que a iniciativa de Wang et al. (2011) de priorizar os processos mais utilizados é bastante perspicaz, porém, não há um critério ambiental envolvido na escolha. Neste caso, os autores optaram por criar a base de dados CLCD em vez de adaptar os *datasets* doecoinvent. Por isso, iniciar a priorização pelos processos mais utilizados é justificável, já que estes serão conectados a inúmeros outros. Ao considerar a adaptação dos *datasets* já existentes, priorizar os processos de maior relevância ambiental pode ser mais oportuno por duas razões. A primeira é que há uma garantia de que os resultados de impactos ambientais obtidos nos estudos são realmente legítimos, uma vez que o *dataset* de maior contribuição foi adaptado para as condições específicas do local. A segunda vantagem se encontra no fato de diagnosticar quais processos são mais significativos em termos ambientais dentro da realidade de um país ou região e poder direcionar esforços para a redução deste problema.

Considerando a adaptação de bases de dados a partir de iniciativas empresariais ou quando não há um direcionamento prévio a respeito do que adaptar inicialmente, diferentes fontes de dados podem ser utilizadas na intenção de priorizar setores ou processos de maior contribuição para os impactos ambientais. Usualmente, países e organizações possuem informações sobre seus produtos, como quantidade de produção, custos e outros indicadores, que podem ser obtidos por balanços econômicos, de massa, energia, medições ou modelagens. Também podem ser utilizados dados estatísticos de agências oficiais do governo, de

associações relacionadas a setores industriais distintos, cooperativas agrícolas, entre outros.

O trabalho de Heijungs (1996) apresenta um guia para identificação de aspectos chave para posterior investigação em ACVs. Embora não aborde diretamente a priorização de processos para a adaptação, o autor apresenta uma maneira de avaliar a incerteza dos dados para assim determinar quais fluxos merecem atenção. Ele afirma que é necessário distinguir os dados que possuem maiores incertezas daqueles que contribuem mais fortemente para os resultados finais de impacto. De maneira ilustrativa (Figura 2) é apresentada uma categorização para os dados que os distingue de acordo com a incerteza e a contribuição nos resultados cumulativos. Observa-se que os dados que possuem baixa contribuição e baixa incerteza não devem ser priorizados. Por outro lado, os dados com maior contribuição e maior incerteza devem ser cuidadosamente avaliados.

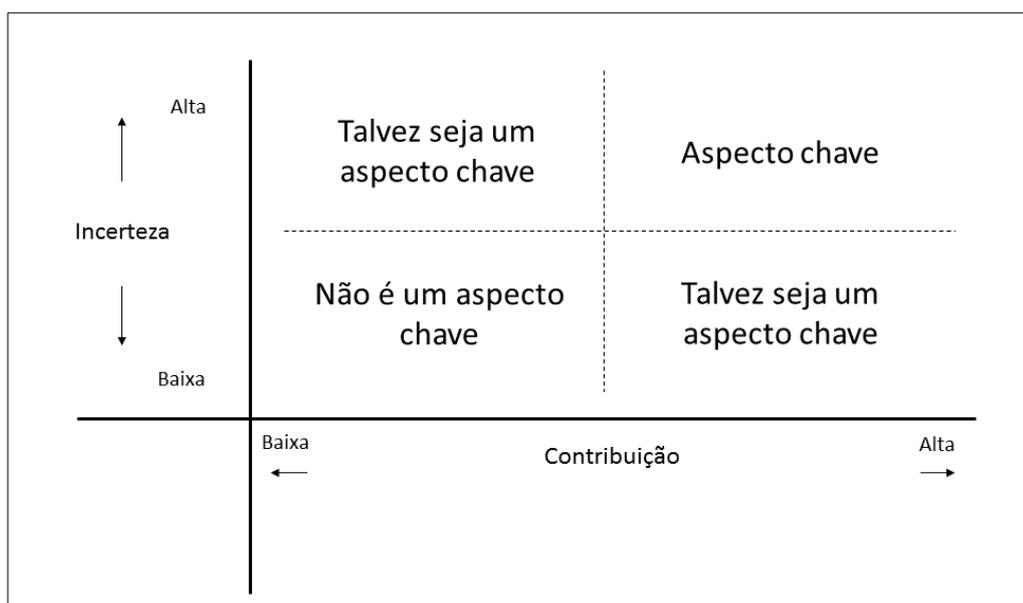


Figura 2 - Classificação dos dados de acordo com a incerteza e contribuição
 FONTE: Adaptado de Heijungs, 1996.

Heijungs e Kleijn (2001) comentam sobre as técnicas que podem ser empregadas na avaliação dos dados. Dentre elas, a análise de perturbação tem como objetivo avaliar o quanto pequenas perturbações nos parâmetros de entrada se propagam em desvios nos resultados de saída. Os autores afirmam que esta

técnica auxilia o praticante a saber quais parâmetros devem ser conhecidos com mais precisão e quais não merecem prioridade em uma análise mais detalhada. Além disso, o conhecimento dos dados mais sensíveis pode auxiliar na seleção de quais processos e produtos merecem mais atenção no que diz respeito à otimização.

2.3 ADAPTAÇÃO DE *DATASETS*

A seleção das prioridades é geralmente estudada em ampla escala, sendo avaliada por setores ou grupos de produtos, conforme citado anteriormente. Estas prioridades atuam como indicadores de quais *datasets* demandam maior urgência para sua adequação. Por outro lado, a adaptação dos conjuntos de dados é um trabalho realizado individualmente e que abrange o detalhamento do escopo dos inventários, da qualidade dos dados, da representatividade geográfica e tecnológica, entre outros. Esta é uma prática comum na ACV, visto que a adequação de alguns processos ou parâmetros com dados primários reflete melhor a realidade dos estudos em questão (Dong et al., 2015; Lewandowska et al., 2008; Nebel et al., 2011; Chau et al., 2007; Ribeiro e da Silva, 2009; De Eicker et al., 2010b; Gomes et al., 2013).

O estudo de Lewandowska et al. (2008) sobre adaptação de *datasets* de produção de madeira para condições da Polônia, mostrou que houve diferenças significativas entre os resultados doecoinvent e das condições polonesas. Nem todos os produtos, entretanto, foram afetados. Alguns deles tiveram seus resultados parecidos de avaliação de impacto porque as diferenças nos fatores de alocação foram compensadas pelos fatores de correção estabelecidos pelos autores. As maiores discrepâncias ocorreram para as categorias de mudanças climáticas e uso da terra, muito devido às considerações acerca da produção florestal e densidade da madeira.

Chau et al. (2007) desenvolveram um estudo para determinar os impactos ambientais dos materiais de construção em Hong Kong e, como a maioria dos dados disponíveis era pertinente para as condições da Europa, os autores ajustaram os dados de inventário. Para isso, eles seguiram as seguintes etapas: (i) substituição

do mix de combustível para a geração de energia de acordo com a realidade do país do *dataset* em questão; (ii) inclusão dos impactos de transporte dos materiais e componentes de seu país de origem até Hong Kong; (iii) inclusão dos impactos causados pelas atividades de construção locais. Embora os autores não tenham comparado os resultados originais e adaptados, este trabalho aponta importantes fatores que são requeridos para a adaptação de inventários: o conhecimento sobre os países de origem de materiais que são importados, sobre a geração de eletricidade de cada país em questão e sobre o modal de transporte envolvido nas importações.

Um estudo de caso desenvolvido por De Eicker et al. (2010b) para o Brasil, revelou as diferenças de aplicação de dados locais, não locais e adaptados. Os autores avaliaram três cenários para a produção de superfosfato triplo (TSP), considerando o *dataset* nacional, o doecoinvent e um com dados modificados. Estas modificações contemplaram o mix de eletricidade, as distâncias de transporte e a produção de óleo. Os autores concluem que o *dataset* modificado é aplicável para a caracterização da produção local de TSP e que os dados doecoinvent são melhores que os nacionais, já que são bastante completos. Além disso, comentam que sempre que possível, é relevante utilizar dados locais nas avaliações. Os novos *datasets* devem ser, então, integrados a bases de dados existentes para que os custos de administração e atualização sejam reduzidos e o compartilhamento dos dados e disponibilidade dos mesmos seja melhorado.

Do mesmo modo, Dong et al. (2015) investigaram as consequências na substituição de dados específicos locais nos inventários já existentes e propuseram sugestões a respeito de como ajustar estes dados, baseando-se num estudo sobre concreto em Hong Kong. Neste caso, os autores estabeleceram um método (Figura 3) para auxiliar a adaptação, já que não há evidências de um guia global específico para padronizar a substituição de dados em *datasets* existentes. A metodologia citada contempla cinco estágios e consiste basicamente em investigar o estágio de ajuste do ICV atual para identificar possíveis problemas de pesquisa, revisar os *datasets* disponíveis, identificar os possíveis ajustes e coletar os dados, substituí-los e comparar os resultados. No estudo de caso em questão, não foi utilizada apenas a base de dados doecoinvent, mas também a base de dados da *United States Portland Cement Association* (US PCA). Os autores comentam que mesmo que ajustes iguais sejam feitos, a escolha do ICV original afeta bastante os resultados.

As diferenças principais entre as bases de dados, segundo os autores, são as fronteiras dos sistemas e a estrutura dos modelos. No ecoinvent, o inventário do cimento é composto por inúmeros processos unitários, enquanto a US PCA trata como um sistema agregado e não fornece detalhes sobre os processos unitários. Além disso, no ecoinvent presume-se que a escória é um resíduo e no da US PCA ela é considerada um coproduto da indústria do aço. Isto faz com que as cargas ambientais consideradas para o mesmo componente nas duas bases de dados sejam diferentes. Por isso, os *datasets* devem ser cuidadosamente estudados e completamente entendidos antes do procedimento de adaptação.

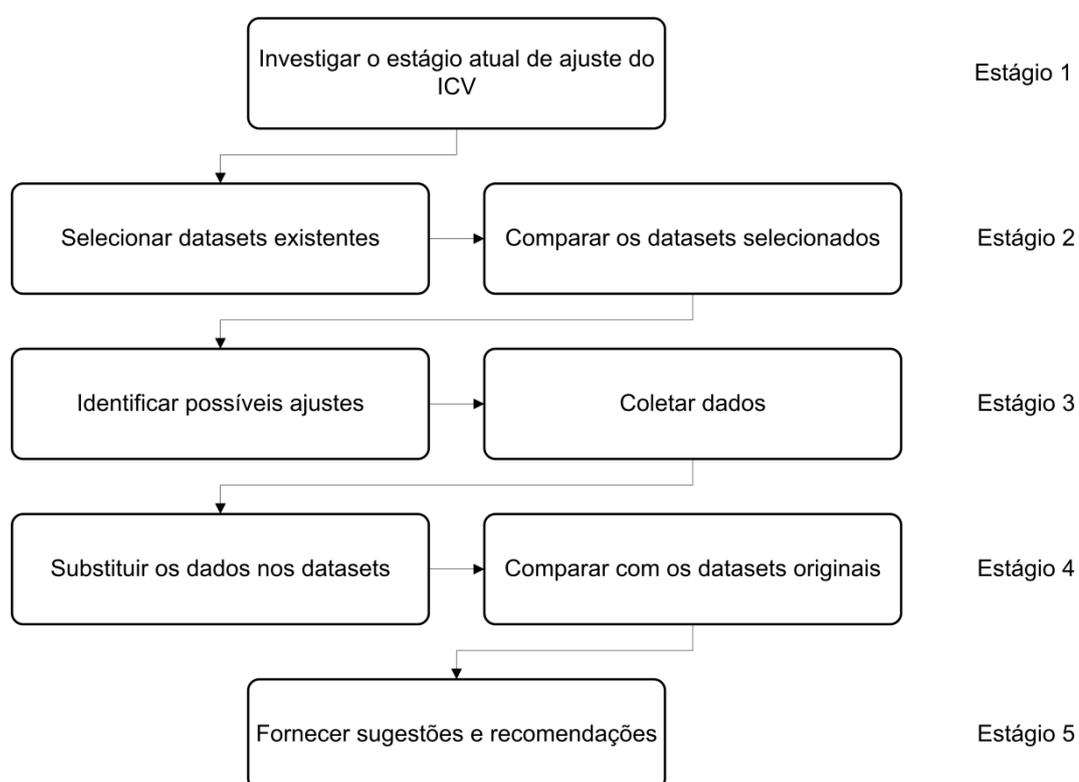


Figura 3 - Metodologia para adaptação de *datasets*.
 FONTE: Traduzido de Dong et al., 2015.

Os resultados obtidos por Dong et al. (2015) mostraram que o ajuste nos dados provoca mudanças que variam de acordo com o nível de adaptação. Um ponto que merece destaque é o fato de que se os dados locais são similares aos originais, os resultados não serão afetados significativamente. Por outro lado, quanto maior as diferenças dos dados locais para os *datasets* originais, maiores

discrepâncias foram observadas. Para o caso do cimento, as mudanças nos resultados de avaliação de impacto foram ocasionadas principalmente pelo teor de cimento e pelo transporte. Se os dados locais forem consideravelmente diferentes dos dados originais para estes contribuintes, grandes discrepâncias serão observadas nos ajustes. Do contrário, diferenças expressivas não serão encontradas. Reafirmando estes resultados, De Smet e Stalmans (1996) apontam que os processos produtivos podem possuir tecnologias distintas de acordo com a região em que ocorrem. É o caso da soda cáustica, por exemplo, que pode utilizar três células diferentes em sua produção (de mercúrio, de diafragma e de membrana), sendo que na Europa a utilização da célula de mercúrio é mais comum que na América do Norte. Exceções ocorrem, no entanto, e alguns dados podem ser utilizados de modo global. Os autores comentam que o consumo de energia de um processo unitário na América do Norte, não precisa ser necessariamente diferente na Europa. Isto leva à conclusão de que nem todos os fluxos necessitam ser adaptados, visto que a contribuição para os impactos pode muitas vezes ser a mesma.

Vale ressaltar que qualquer ajuste realizado aos dados originais acrescenta incertezas que podem levar a erros de análise. Isto ocorre porque a adaptação introduz dados locais específicos e muitas vezes informações sobre as incertezas associadas aos ajustes realizados não estão disponíveis. Portanto, as incertezas dos ajustes devem ser especificadas e avaliadas com cuidado ao adaptar *datasets*.

Os estudos apresentados mostraram que não há um guia definido para a adaptação de *datasets*, entretanto, é nítido que os fluxos relacionados à eletricidade e transporte foram pontos que mereceram atenção na maioria dos casos, considerando sua relevância e facilidade de adaptação. É importante ressaltar que a adaptação não precisa ser realizada em todo o *dataset*, já que para alguns fluxos a diferença de contribuição nos resultados de impacto é pouco significativa. Isto diminui os desafios enfrentados na coleta de dados e torna o processo de adaptação mais ágil. A determinação dos fluxos que merecem destaque é auxiliada por meio do estudo do *dataset* em questão e de análises estatísticas, conforme proposto por Heijungs e Kleijn (2001) e já comentado anteriormente.

3 MÉTODO

Os passos utilizados no método para alcançar o objetivo geral são apresentados simplificadaamente na Figura 4.

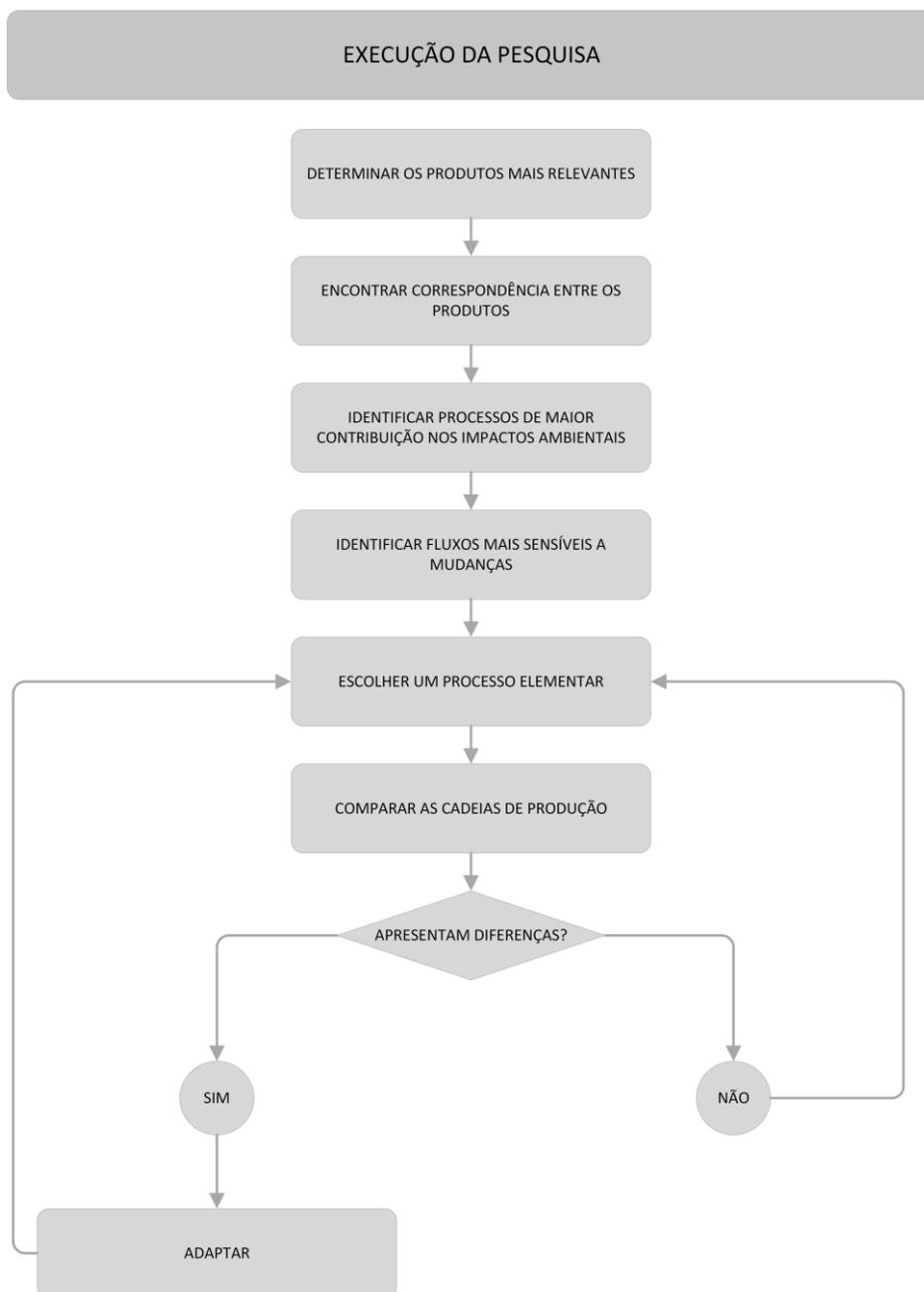


Figura 4 - Execução da Pesquisa.
FONTE: Autoria própria.

3.1 IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS ELEMENTARES QUE MAIS CONTRIBUEM PARA O IMPACTO AMBIENTAL

Para que os processos elementares pudessem ser identificados, fez-se necessário executar alguns passos previamente, tais como a determinação dos produtos e da base de dados estudada.

3.1.1 Determinação dos produtos de maior relevância nacional e justificativa acerca da priorização

Este projeto optou por avaliar os produtos industriais que possuem relevância em termos de produção nacional e valor econômico, ou seja, aqueles cuja produção é mais expressiva nacionalmente. Esta relação foi obtida de um relatório publicado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015) de produção e vendas dos cem principais produtos e/ou serviços industriais em 2011, de acordo com a posição nacional em valor de vendas (Anexo A). A relevância deste relatório para a pesquisa é notória, visto que ele se baseia em dois pilares importantes para a priorização que são a produtividade e o valor econômico. Além disso, este *ranking* de produtos foi posteriormente filtrado de acordo com o desempenho ambiental por meio dos resultados de contribuição de processos. Deste modo, foi possível priorizar produtos realmente relevantes para a realidade nacional levando em conta as variáveis de produção, vendas e desempenho ambiental. Os produtos relacionados à área agrícola não foram estudados, exceto os industrializados dispostos no relatório do IBGE, devido ao fato de a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) já direcionar esforços em aprofundar pesquisas para gerar ICVs de produtos relacionados ao setor.

Além dos itens do relatório, a eletricidade foi também incluída na avaliação, visto que é usada por um grande número de processos, possui diferentes fontes de produção e pode influenciar consideravelmente os resultados de avaliação de impacto. A fonte de dados usada para a eletricidade, não contemplada no relatório

do IBGE, foi o Balanço Energético Nacional (BEN), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2012), que relata a eletricidade total gerada no país em 2011.

3.1.2 Escolha da base de dados a ser utilizada no projeto

Alguns critérios foram levados em conta ao selecionar a base de dados a ser utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. O principal deles é o nível de agregação dos conjuntos de dados disponíveis, ou seja, o nível de transparência da base de dados. Vale ressaltar que o procedimento de adaptação só é possível quando o usuário consegue acessar e gerenciar os *datasets* avaliados, permitindo que as mudanças necessárias sejam implementadas na base de dados. No caso de processos agregados isto nem sempre é possível, visto que muitas informações acerca dos fluxos contidos nos *datasets* são omitidas.

Outro critério que auxiliou na escolha da base de dados a ser adaptada foi o número de processos que a mesma abrange. Isto é necessário para que o maior número de correspondências entre os produtos estudados e aqueles contemplados na base de dados seja encontrado e os resultados da pesquisa sejam mais satisfatórios.

De acordo com as razões mencionadas, a base de dados doecoinvent foi selecionada para apoiar o desenvolvimento deste projeto, já que o nível de agregação e o número de processos abrangidos são condizentes com o que se almeja (Tabela 1). Além do fato de oecoinvent possuir os requisitos desejados, vantagens como a ferramenta disponível para a inserção de *datasets*, o embasamento fornecido para os usuários e a revisão gratuita dos mesmos também foram levadas em consideração.

Além disso, oecoinvent divide seus *datasets* de acordo com as regiões abordadas no escopo do inventário. A produção média é disponibilizada em um *dataset* global, a fim de fornecer uma abordagem mais consistente para usuários de países em desenvolvimento (WEIDEMA et al., 2013).

A versão da base de dados utilizada foi a 3.1 *allocation default* e a localização geográfica escolhida para avaliar os *datasets* foi global ou RoW (*Rest of the world*) sempre que possível. Alguns produtos já possuem inventários para a região do

Brasil, mas foram incluídos na pesquisa para avaliar a extensão dos seus resultados de impacto quando comparado aos outros produtos.

3.1.3 Determinação da correspondência entre os produtos e a base de dados

Com os produtos e a base de dados definidos, foi possível encontrar a correspondência entre eles. Em alguns casos, o produto não foi encontrado na base de dados com a correspondência exata, ou até mesmo aproximada. Algumas considerações foram feitas, portanto, a fim de abranger o maior número possível de produtos. A Figura 5 mostra três situações que demandaram um tratamento mais profundo dos dados para avaliar mais produtos na pesquisa.

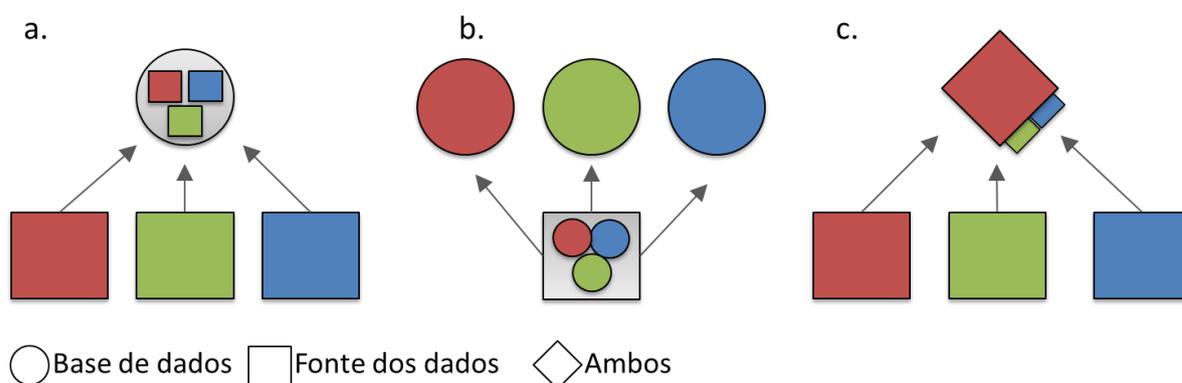


Figura 5 - Correspondência entre a base de dados e a fonte de dados.
FONTE: Autoria Própria.

A situação exposta na Figura 5a contempla casos em que as fontes dos dados (IBGE, 2015; EPE, 2012) possuem diferentes produtos não encontrados na base de dados, porém originados de um mesmo material. Neste caso, é possível agregar os produtos e associá-los a uma correspondência principal. Dos cem produtos apresentados no Anexo A, o aço é um exemplo desta associação, já que o relatório do IBGE informa quantidades de produção de seus derivados, como blocos, chapas, tarugos e etc. Todos estes produtos foram agregados e associados ao aço

como correspondência principal. O fluxo de referência equivale à soma de todos os produtos desagregados.

Por outro lado, em alguns casos a fonte de dados mencionou um produto de forma agregada, enquanto a base de dados separa-o em diversos outros. Este é o caso dos fertilizantes (item 12 do Anexo A), por exemplo, que no relatório do IBGE são considerados de forma agregada e no ecoinvent são separados em sulfato de amônio, uréia, superfosfato simples e etc. Para realizar a correspondência foi necessário, então, criar uma nova referência na base de dados para associar os componentes (Figura 5b).

Quando a fonte dos dados (IBGE) continha itens que não existem na base de dados, mas que fazem parte de um produto específico, eles foram considerados na pesquisa dentro do inventário do produto principal (Figura 5c). Isto aconteceu para diferentes peças de automóveis, que são informadas no relatório do IBGE (Anexo A) e não estão contidas na base de dados individualmente, mas sim dentro do inventário dos automóveis. Neste caso, o fluxo de referência é apenas o do produto principal, visto que o inventário já considerou as quantidades necessárias dos outros produtos.

É importante ressaltar que duplas contagens aconteceram quando um ou mais produtos do relatório tinham seus *datasets* conectados, por exemplo, quando há relação entre matérias primas e produtos finais. Relações matemáticas mitigaram este problema descontando a quantidade utilizada de matéria prima para a produção do produto final, tendo como base as relações de massa estabelecidas pelo ecoinvent. Como exemplo, podem-se citar os derivados de petróleo, que utilizam o óleo bruto como matéria prima. A quantidade de óleo bruto considerada no fluxo de referência foi o resultado da subtração da quantidade de óleo utilizada em cada derivado (gasolina, diesel e etc.) pelo valor total produzido, informado pelo IBGE. Se para cada kg de gasolina produzido, se consomem 0,94 kg de óleo bruto e a produção total de gasolina foi de $2,06 \cdot 10^{10}$ kg, então devem ser descontados $1,94 \cdot 10^{10}$ kg da quantidade total de óleo bruto produzida em 2011 para compor o vetor de demanda.

Para a produção do aço e do ferro-gusa, itens contidos no relatório do IBGE, foram considerados os valores de quantidade produzida informado pelo Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico do Ministério de Minas e Energia (MME, 2012). Esta consideração foi feita devido ao fato de o valor informado pelo IBGE para a

produção do ferro-gusa estar muito baixo e não ser suficiente para a produção do aço na quantidade informada pela mesma fonte. Além disso, a quantidade produzida informada era bastante discrepante do informado pelo MME e pelo Instituto Aço Brasil (IAB, 2012) para a produção no mesmo ano.

3.1.4 Determinação dos processos elementares mais significativos na geração de impactos ambientais

Esta etapa permite identificar os processos que contribuem mais significativamente em termos de impactos ambientais e que, portanto, devem receber prioridade na adaptação.

A identificação contou com o auxílio do software matemático MATLAB R2013b. Para obter a resposta foi aplicada uma rotina de cálculo no software, partindo das matrizes tecnológica e de intervenções ambientais enviadas pelo ecoinvent. Os produtos cuja correspondência com a base de dados foi encontrada, foram utilizados como base para o cálculo. Como resposta da simulação foi possível encontrar, para cada categoria de impacto ambiental avaliada, quais os processos elementares que apresentam maior relevância em termos de danos ambientais.

O fluxo de referência para cada produto foi o estabelecido por meio dos dados provindos do relatório do IBGE, pelo BEN para a eletricidade, pelo MME para aço e ferro-gusa ou o combinado destas fontes por meio de cálculo após as considerações comentadas no tópico anterior.

A análise de contribuição usada foi abordada no trabalho de Heijungs e Suh (2002), que trata da estrutura computacional da ACV. As equações que permitem avaliar a contribuição são dadas na forma matricial por:

$$A \cdot s = f \tag{3.1}$$

na qual A , conhecida como matriz tecnológica, representa os fluxos dos sistemas econômicos, s representa o vetor de escala e f o vetor de demanda que corresponde aos fluxos de referência do sistema. Sendo a matriz tecnológica A e o vetor de demanda final f conhecidos, a equação pode ser reescrita de tal forma:

$$s = A^{-1}.f \quad (3.2)$$

para a qual A^{-1} denota inversa da matriz tecnológica A . O problema do inventário ainda não está totalmente resolvido, já que o objetivo é encontrar os valores dos fluxos ambientais agregados de todo o sistema. O vetor de escala encontrado afeta os fluxos econômicos e ambientais da mesma maneira. Pode-se assumir, portanto, que:

$$g = B.s \quad (3.3)$$

para a qual g representa o vetor de inventário, B a matriz de intervenções ambientais e s o vetor de escala. Combinando as equações 3.2 e 3.3 pode-se obter:

$$g = B.A^{-1}.f \quad (3.4)$$

A equação 3.4 pode ser escrita da seguinte forma:

$$g_k = \sum_{\forall j} \sum_{\forall i} b_{kj}(A^{-1})_{ji}f_i \quad (3.5)$$

A soma de j representa a agregação de todos os processos unitários e a soma de i a agregação de todos os fluxos econômicos que conectam estes processos. A intervenção parcial para o processo P_a é dada por:

$$g_k(P_a) = \sum_{\forall j \in P_a} \sum_{\forall i} b_{kj}(A^{-1})_{ji}f_i \quad (3.6)$$

onde $g_k(P_a)$ pode ser interpretado como a intervenção parcial para o fluxo ambiental k e como uma contribuição para a intervenção total g_k , de acordo com a razão:

$$\frac{g_k(P_a)}{g_k} \quad (3.7)$$

Logo,

$$\forall_k: \sum_a \frac{g_k(P_a)}{g_k} = 1 \quad (3.8)$$

De acordo com a ABNT (2009) a caracterização envolve a conversão dos resultados do ICV para unidades comuns. A equação geral para o cálculo da caracterização na forma matricial, segundo Heijungs e Suh (2002) é:

$$h = Q \cdot g \quad (3.9)$$

Na qual Q representa a matriz de caracterização para a categoria de impacto, g o vetor de inventário e h o vetor de impacto. Combinando as equações 3.4 e 3.9, obtém-se:

$$h = Q \cdot B \cdot A^{-1} \cdot f \quad (3.10)$$

A equação 3.10 pode ser reescrita da forma:

$$\forall l: h_l = \sum_{\forall k} \sum_{\forall j} \sum_{\forall i} q_{lk} b_{kj} (A^{-1})_{ji} f_i \quad (3.11)$$

na qual o somatório em k representa a agregação de todas as intervenções ambientais e q_{lk} representa o fator de caracterização que conecta a intervenção k e a categoria de impacto l. Esta abordagem de cálculo de caracterização permite decompor a equação em duas direções: a análise de contribuição de acordo com os processos unitários e a análise de contribuição de acordo com as intervenções ambientais.

A decomposição em termos de processos unitários é dada por:

$$\forall l: h_l(P_a) = \sum_{\forall k} \sum_{\forall j \in P_a} \sum_{\forall i} q_{lk} b_{kj} (A^{-1})_{ji} f_i \quad (3.12)$$

A decomposição em termos de intervenções ambientais é:

$$\forall l: h_l(I_b) = \sum_{\forall k \in I_b} \sum_{\forall j} \sum_{\forall i} q_{lk} b_{kj} (A^{-1})_{ji} f_i \quad (3.13)$$

Tendo os resultados de contribuição para os processos unitários, um cut-off foi aplicado, visto que um número muito extenso de processos é abrangido. Deste modo, o princípio de Pareto foi aplicado para selecionar os processos unitários que representam 80% do impacto total. Os processos que apresentaram resultados de contribuição negativos foram tratados em módulo com a intenção de que fossem inseridos no ranking final de produtos e, se necessário, adaptados à realidade nacional.

Uma vez que não há um método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) regionalizado para o Brasil, foi utilizado o IMPACT 2002+ *endpoint*, que apresenta quatro categorias de danos finais: saúde humana, qualidade do ecossistema, mudanças climáticas e recursos (ILCD, 2010).

A matriz de caracterização Q do método IMPACT 2002+ contém fatores de caracterização de diferentes substâncias para cada uma das áreas de dano. Estes fatores foram normalizados, conforme estabelecido por Humbert et al. (2012), para facilitar a interpretação dos resultados. O fator de caracterização normalizado é determinado pela razão do impacto por unidade de emissão, referente à quantidade de substância emitida, dividido pelo impacto total de todas as substâncias da categoria por pessoa por ano. A unidade do fator é, portanto, [points unit_{emission}⁻¹] ou [pers.y unit_{emission}⁻¹] (HUMBERT et al., 2012).

Como forma de análise de sensibilidade, a contribuição de processos elementares também foi calculada para outros métodos de avaliação de impacto, utilizando o software SimaPro v.8.1.0.60. Neste caso, além do IMPACT 2002+, os métodos *endpoint* ReCiPe (E), ReCiPe (H), ReCiPe (I) e Impact World+ (versão beta) foram utilizados e os processos que contribuem para 80% do total de cada área de dano foram contabilizados. Esta análise foi realizada a fim de avaliar a influência do método de AICV nos resultados de contribuição de processos.

3.1.5 Ponderação dos resultados de caracterização para determinação de um ranking de produtos

Os resultados obtidos para as áreas de dano já são bastante satisfatórios para determinar os processos elementares prioritários e posteriormente adaptá-los. A fim de obter uma pontuação final única, contudo, foi realizada a ponderação entre as quatro áreas de dano do método IMPACT 2002+. Conforme recomendado por Humbert et al. (2012), quando um nível de agregação é necessário, o peso padrão de 1 para cada categoria pode ser usado. Visto que neste caso não se pretende classificar as áreas de dano de acordo com sua relevância, o peso padrão foi adotado. A média ponderada para a obtenção do escore final foi dada por:

$$Escore_{final} = \frac{W_{SH} \cdot I_{SH} + W_{MC} \cdot I_{MC} + W_{ECO} \cdot I_{ECO} + W_{REC} \cdot I_{REC}}{4} \quad (3.14)$$

sendo W o peso de cada uma das áreas de dano e I o resultado da etapa de caracterização, em points. Os índices SH, MC, ECO e REC representam as áreas de dano de saúde humana, mudanças climáticas, qualidade do ecossistema e recursos, respectivamente.

3.2 IDENTIFICAÇÃO DOS FLUXOS MAIS SENSÍVEIS A MUDANÇAS

A teoria da perturbação é uma abordagem utilizada na ACV que permite que os fluxos mais sensíveis a mudanças sejam identificados. O objetivo desta técnica é avaliar como a perturbação se propaga no sistema. Neste trabalho esta teoria foi aplicada à matriz tecnológica e de intervenções ambientais em relação à sua caracterização, conforme estabelecido por Heijungs e Suh (2002) e Heijungs (2010), sendo que o último trabalho trata da sensibilidade da ACV.

Tendo as matrizes e os fatores de caracterização do método escolhido, a equação da perturbação da matriz tecnológica em relação à caracterização é dada por:

$$\frac{\partial h_k}{\partial a_{ij}} = \frac{-s_j \cdot a_{ij}}{h_k} \sum_l q_{kl} \lambda_{li} \quad (3.15)$$

sendo λ_{li} a representação dos termos resultantes do produto das matrizes $(B \cdot A^{-1})_{li}$, s_j representa os termos do vetor de escala s ; a_{ij} os termos da matriz tecnológica A ; h_k os termos do vetor de impacto h e q_{kl} os termos da matriz de caracterização Q . Os índices i, j, k e l representam os fluxos intermediários, processos elementares, áreas de dano e fluxos ambientais, respectivamente.

A equação da perturbação da matriz de intervenções ambientais em relação à caracterização é dada por:

$$\frac{\partial h_k}{\partial b_{ij}} = \frac{b_{ij}}{h_k} q_{ki} s_j \quad (3.16)$$

Neste caso, b_{ij} representa os termos da matriz de intervenções ambientais B , h_k os termos do vetor de impacto h e q_{ki} os termos da matriz de caracterização Q . Os índices i, j e k representam os fluxos elementares, os processos elementares e as áreas de dano, respectivamente.

As matrizes foram obtidas com o ecoinvent e os dados tratados no software de cálculo numérico e matemático MATLAB R2013b. Os resultados destas análises foram obtidos em forma matricial, sendo que o elemento de maior valor de cada matriz resultante representa o fluxo de um determinado processo que é mais sensível a mudanças e assim por diante. Para os resultados de perturbação na matriz A , foi possível saber quais fluxos intermediários possuem maior extensão de propagação nos resultados de impacto. Já para os resultados de perturbação na matriz B , foram determinados os fluxos ambientais de maior propagação. A influência das relações de mercado em cada processo não foi avaliada neste trabalho, visto que o interesse é adaptar os processos elementares considerando as distinções de cadeia tecnológica.

3.3 DETERMINAÇÃO DOS FLUXOS ELEMENTARES E INTERMEDIÁRIOS PRIORITÁRIOS PARA ADAPTAÇÃO

Nesta etapa as informações de sensibilidade, obtidas pela teoria da perturbação, e incerteza, provenientes da base de dados, foram avaliadas conjuntamente. Isto foi feito, pois se julgou importante que a incerteza dos fluxos de cada processo fosse levada em conta quando comparada ao resultado da sensibilidade do mesmo. Assim, garantiu-se que um fluxo bastante sensível e pouco incerto fosse comparado a um fluxo pouco sensível e bastante incerto, por exemplo, já que ambas as abordagens são relevantes para a adaptação de *datasets*.

A incerteza pode ser atribuída a variações temporais, tecnológicas, geográficas, de medições, entre outras. Dois tipos de incertezas são quantificadas na base de dados doecoinvent: a básica e as adicionais. A incerteza básica é associada aos dados coletados, como por exemplo, variações de medições, temporais e etc. Quando não há informações suficientes disponíveis para o cálculo da incerteza básica, fatores básicos de incerteza, provenientes do julgamento de especialistas, são utilizados. As incertezas adicionais são relacionadas à qualidade dos dados, como extrapolações temporais, geográficas ou tecnológicas e são baseadas na abordagem da matriz pedigree proposta por Weidema e Wesnaes (1996) e Weidema (1998). Cinco indicadores (confiança, completeza, correlação geográfica, correlação temporal e correlação tecnológica) são avaliados em cinco níveis de qualidade, com escores variando de 1 a 5. Fatores de incerteza são utilizados para converter os escores de qualidade em incertezas adicionais (WEIDEMA et al., 2013).

Inicialmente, buscou-se encontrar uma relação quantitativa entre as duas variáveis, contudo, o baixo grau de correlação entre elas não permitiu que uma combinação fosse construída. Não há, necessariamente, uma tendência definida para os dados de incerteza em relação aos de sensibilidade. Isto significa que quando os dados de sensibilidade são ordenados do maior ao menor, os de incerteza apresentam comportamento aleatório. A Figura 6 exemplifica este fato para as primeiras 400 observações da área de dano de mudanças climáticas.

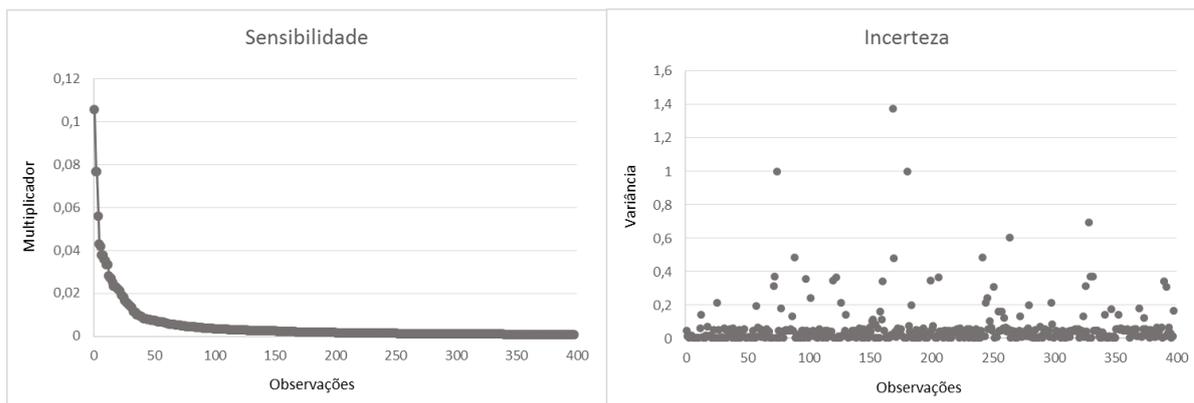


Figura 6 - Resultados de perturbação e incerteza para área de dano de mudanças climáticas. Autoria própria.

Notou-se que o produto das duas variáveis era influenciado pela escala de uma delas e, conseqüentemente, não apresentou resultado satisfatório.

Haja vista a dificuldade em relacionar as variáveis quantitativamente, a avaliação qualitativa foi escolhida, tendo como prioridade os resultados de sensibilidade em relação aos de incerteza. Os passos aplicados são apresentados na Figura 7.



Figura 7 - Passos para a determinação dos fluxos prioritários para adaptação. Autoria própria.

Esta avaliação deve ser feita caso a caso e, para isso, inicialmente selecionou-se um produto do ranking final obtido dos resultados de caracterização. Visto que a abordagem deste trabalho é *top-down*, os resultados de sensibilidade foram então levados em conta, a fim de determinar quais os fluxos, intermediários e

elementares, de dado processo merecem atenção. Para isto, os resultados de perturbação das matrizes A e B para cada área de dano foram consultados, lembrando que as interações de mercado não foram levadas em conta. Selecionados os fluxos mais sensíveis, a incerteza de cada um foi observada.

Foi indicado, então, que se garanta que os fluxos mais sensíveis sejam adaptados quando necessário, ao passo que os fluxos mais incertos, mesmo que com menor sensibilidade, sejam avaliados com cuidado na comparação das cadeias de produção.

3.4 COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS ELEMENTARES E ADAPTAÇÃO DOS DATASETS

A comparação com o processo nacional foi realizada, tendo como enfoque principal a etapa de maior contribuição nos impactos ambientais, os fluxos mais sensíveis a mudanças e as incertezas dos mesmos. Este procedimento foi realizado individualmente para cada processo elementar, considerando os fluxos em questão, sendo auxiliado por pesquisas bibliográficas.

As cadeias produtivas nacionais e internacionais foram estudadas a fim de se comparar as tecnologias de produção, levando em conta os equipamentos utilizados, as etapas do processo, o sistema de produção, entre outros. Caso as tecnologias fossem compatíveis, outras variáveis do processo foram avaliadas, como a emissão de poluentes líquidos e gasosos, a geração de resíduos sólidos, as matérias-primas e etc. Quando encontradas diferenças, o processo elementar foi alterado e um novo resultado de contribuição encontrado, a fim de quantificar o real impacto nacional.

Vale ressaltar que o balanço de massa do processo foi verificado sempre que possível, já que na maioria das vezes a alteração em quantidades mássicas de um fluxo afeta as demais entradas e saídas. Os novos resultados de contribuição foram obtidos por meio do software SimaPro e o método de avaliação de impacto foi o IMPACT 2002+.

Conforme já comentado anteriormente, este passo indicou quais fluxos de processos elementares necessitam ser realmente adaptados, visto que, para

tecnologias muito semelhantes os valores dos fluxos podem não sofrer alterações significativas.

O número de processos elementares avaliados não foi definido, visto que o objetivo foi avaliar tantos produtos quanto fossem possíveis no tempo destinado a esta pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DETERMINAÇÃO DOS PROCESSOS ELEMENTARES QUE MAIS CONTRIBUEM PARA O IMPACTO AMBIENTAL

4.1.1 Correspondência com a base de dados

Dos cem produtos avaliados, trinta e dois apresentaram correspondência exata ou muito similar com os produtos disponíveis na base de dados, não necessitando de nenhum processamento prévio, exceto a eliminação da dupla contagem. Estes produtos podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Produtos com correspondência exata

Minérios de ferro em bruto ou beneficiados, exceto pelotizados ou sinterizados	Televisores (receptores de televisão)	Biodiesel	Papel para usos na escrita, impressão e outros fins gráficos, não revestido
Óleo diesel	Pastas químicas de madeira, processo sulfato, branqueadas ou não	Computadores pessoais portáteis (<i>laptops, notebook, handhelds e semelhantes</i>)	Barras, perfis ou vergalhões de cobre ou de ligas de cobre
Minérios de ferro pelotizados ou sinterizados	Gás liquefeito de petróleo (GLP)	Óleo de soja refinado	Óxido de alumínio (alumina calcinada)
Gasolina automotiva ou para outros usos, exceto para aviação	Querosenes de aviação	Gás natural	Ouro (incluído o ouro platinado), para usos não monetários
Alcool etílico não desnaturado, com teor alcoólico em volume maior ou igual a 80%, anidro ou hidratado para fins carburantes	Massa de concreto preparada para construção; concreto usinado	Polipropileno (PP)	Caixas ou outras cartonagens dobráveis de papel-cartão ou cartolina, impressas
Óleos combustíveis, exceto diesel	Naftas para petroquímica	Ferro-gusa	Sabões ou detergentes em pó, flocos, ou outras formas semelhantes
Tortas, bagaços, farelos e outros resíduos da extração do óleo de soja	Caixas de papelão ondulado ou corrugado, impressas ou não	Óleo de soja em bruto, mesmo degomado	Polietileno de alta densidade (PEAD)
Cimentos Portland compostos (CP - II)	Leite esterilizado / UHT/ Longa Vida	Alumínio não ligado em formas brutas	Tintas ou vernizes dissolvidos em meio aquoso, para construção

As proporções usadas para excluir duplas contagens foram obtidas através dos inventários dispostos na base de dados. Como exemplo vale citar o caso do óxido de alumínio, o qual é matéria-prima para a produção de alumínio e, portanto, é

considerado no inventário deste produto. Para que não fosse contabilizado duplamente, a quantidade utilizada na produção de alumínio foi desconsiderada do fluxo de referência do óxido de alumínio. O problema da dupla contagem foi mitigado apenas para as relações diretas entre os produtos, ou seja, não considerou os *datasets* conectados aos processos de mercado entre os dois processos de transformação, uma vez que este não é o objetivo deste trabalho. Esta situação pode ser melhor entendida nos exemplos a seguir:

1. Óxido de alumínio (transformação) → Alumínio (transformação).
2. Óleo de soja bruto (transformação) → Óleo de soja bruto (mercado) → Óleo de soja refinado (transformação).

No exemplo 2 a dupla contagem não pôde ser eliminada, uma vez que o *dataset* de transformação de óleo de soja bruto está previamente relacionado ao *dataset* de mercado deste mesmo produto.

Outros produtos que tiveram as duplas contagens eliminadas podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - Produtos com dupla contagem

PRODUÇÃO	CONSUMO
Aço	Minério de Ferro, Ferro-Gusa
Minério de Ferro Pelotizado	Minério de Ferro
Ferro-Gusa	Minério de Ferro, Minério de Ferro Pelotizado
Óleo Diesel	Óleo Bruto de Petróleo
Gasolina	Óleo Bruto de Petróleo
Óleo Combustível	Óleo Bruto de Petróleo
Gas Liquefeito de Petróleo	Óleo Bruto de Petróleo
Querosene de Aviação	Óleo Bruto de Petróleo
Nafta Petroquímica	Óleo Bruto de Petróleo
Alumínio	Óxido de Alumínio
Automóveis	Polipropileno (PP), Polietileno de Alta Densidade (HDPE)
Ração animal	Farelo de soja

A etapa de correspondência com a base de dados contribuiu para a identificação dos produtos relevantes nacionalmente que não estão incluídos na base de dados internacional. Os produtos não considerados na pesquisa foram eliminados por três motivos: (1) não há correspondência na base de dados; (2) conflito de unidade de medida entre IBGE e ecoinvent; e (3) não foi informada pelo

IBGE a quantidade produzida no ano de 2011. Um total de trinta e quatro produtos não foi contemplado na pesquisa (Tabela 4).

Tabela 4 - Produtos não contemplados

PRODUTO	MOTIVO	PRODUTO	MOTIVO
Cervejas ou chope	1	Biscoitos e bolachas	1
Refrigerantes	1	Arroz semibranqueado ou branqueado, polido, brunido, parboilizado ou não	1
Carnes ou miudezas de aves congeladas	1	Refrigeradores ou congeladores (<i>freezers</i>), inclusive combinados, para uso doméstico	1
Telefones celulares	1	Máquinas para colheita, não especificados	2
Caminhão-trator, inclusive CKD (<i>completely knocked down</i>), para reboques e semirreboques	1	Café torrado e moído, inclusive aromatizado (mesmo descafeinado)	1
Veículos para o transporte de mercadorias, com motor a gasolina e/ou álcool	1	Carnes ou miudezas de aves, frescas ou refrigeradas	1
Serviços relacionados à extração de petróleo e gás (exceto a prospecção)	3	Fumo processado industrialmente	1
Aviões ou outros veículos aéreos de peso superior a 15 000 kg	3	Carrocerias para ônibus	1
Fios, cabos e condutores elétricos com capa isolante, para tensão menor ou igual a 1000v	2	Pedras britadas	1
Veículos para o transporte de mercadorias com motor diesel	1	Sucos concentrados de laranja	1
Preparações em xarope para elaboração de bebidas, para fins industriais	1	Medicamentos à base de compostos heterocíclicos exclusivamente de heteroátomos de nitrogênio	1
Farinha de trigo	1	Herbicidas, inibidores de germinação e reguladores de crescimento para plantas	1
Ladrilhos, placas e azulejos de cerâmica para pavimentação ou revestimento, esmaltados	2	Açúcar refinado de cana	1
Tratores agrícolas, inclusive motocultores	2	Minérios de cobre (azurita, cuprita, etc.) em bruto ou beneficiados	1
Medicamentos contendo produtos misturados ou não misturados, não especificados	1	Reboques ou semirreboques para usos não especificados	1
Chassis com motor para ônibus	1	Garrafas, garrafões, frascos e artigos semelhantes de plástico	2
Calçados de couro feminino - exceto tênis e para uso profissional	1	Estruturas de ferro e aço, em chapas ou em outras formas ⁽¹⁾	3

A não inserção destes produtos na análise é considerada como um ponto crítico da pesquisa, uma vez que eles poderiam se mostrar mais relevantes que os produtos cujos impactos ambientais puderam ser mapeados. É indicado, então, que os mesmos sejam estudados mais profundamente por pesquisadores da área para a realização de novos estudos de ACV acerca de tais produções.

4.1.1.1 Considerações para determinação da correspondência

Conforme mencionado anteriormente, algumas considerações tiveram que ser feitas para que o maior número de produtos fosse contemplado. Três principais tipos de considerações foram definidos na Figura 5. Para o caso elucidado na Figura 5a, três produtos foram abrangidos (Tabela 5): aço, açúcar e carne bovina. Em virtude de a base de dados não contemplar estes produtos de forma desagregada, eles foram somados e relacionados a uma correspondência principal.

Tabela 5 – Agregação de produtos

PRODUTO AGREGADO	AÇO	AÇÚCAR	CARNE BOVINA
PRODUTOS INCLUIDOS	Lingotes, blocos, tarugos ou placas de aços ao carbono	Açúcar Cristal	Carnes de bovinos frescas ou refrigeradas
	Bobinas a quente de aços ao carbono, não revestidos	Açúcar VHP (<i>very high polarization</i>)	Carnes de bovinos congeladas
	Vergalhões de aços ao carbono		
	Tubos, canos ou perfis ocos de aço com costura, não especificados		
	Fio-máquina de aços ao carbono		
	Bobinas ou chapas de aços zincadas (galvanizadas)		
	Bobinas a frio de aços ao carbono, não revestidos		
	Chapas, bobinas, fitas e tiras de aço, relaminadas, inclusive revestidas, pintadas ou envernizadas		
	Barras de aços ao carbono		
	Artefatos diversos de ferro e aço		

Quatro produtos foram desagregados e ajustados à realidade nacional, já que apenas a informação contida no relatório do IBGE não era suficiente para caracterizar o produto, ou o mesmo é composto por mais de uma correspondência na base de dados. A Tabela 6 mostra o caso dos fertilizantes, ração animal, petróleo e computadores de mesa, cuja consideração foi tratada na Figura 5b. As proporções para a produção de cada tipo de fertilizante foram obtidas de acordo com o exposto na publicação de Dias e Fernandes (2006). Tendo em vista a falta de informação, a ração animal foi considerada como sendo formada por 50% milho e 50% farelo de soja. Uma análise de sensibilidade foi feita alterando a composição da ração a fim de avaliar a influência dos componentes nos resultados de contribuição. A proporção de produção de petróleo off-shore e on-shore foi considerada de 90% e 10%

respectivamente, conforme estabelecido por ANP (2012). Já a proporção tela/computador foi considerada 1/1.

Tabela 6 - Produtos desagregados

PRODUTO AGREGADO	FERTILIZANTES	RAÇÃO ANIMAL	PETRÓLEO	COMPUTADORES
PRODUTOS DESAGREGADOS	Sulfato de Amônio	Milho	Petróleo – Off-shore	Computador de mesa
	Uréia	Soja	Petróleo – On-shore	Tela
	Fosfato Diamônio – DAP			
	Superfosfato Simples			
	Superfosfato Triplo			
	Cloreto de Potássio			
	Amônia			
	Nitrato de Amônio			
	Fosfato Monoamônio – MAP			
	Ácido Fosfórico			
	Ácido Sulfúrico			

Automóveis, caminhões e motocicletas (Tabela 7) se ajustam ao critério apresentado na Figura 5c, isto é, a correspondência com a base de dados existe, mas adicionalmente têm outros produtos informados na fonte de dados nos seus inventários.

Tabela 7 - Produtos relacionados a uma correspondência principal

CORRESPONDÊNCIA PRINCIPAL	AUTOMÓVEIS	CAMINHÕES	MOTOCICLETAS
PRODUTOS	Automóveis, jipes ou camionetas, de cilindrada entre 1500 cm ³ e 3000 cm ³	Caminhões, com motor diesel, de capacidade máxima de carga > 5t	Motocicletas com motor de pistão alternativo cilindrada entre 50 e 250 cm ³
	Automóveis, jipes ou camionetas, de cilindrada menor ou igual a 1.000 cm ³	Pneumáticos novos de borracha, usados em ônibus ou caminhões	Peças e acessórios para motocicletas, e outros, n.e.
	Partes, peças e acessórios para veículos automotores	Motores diesel ou semidiesel para ônibus ou caminhões	
	Automóveis, jipes ou camionetas, de cilindrada entre 1000 cm ³ e 1500 cm ³		
	Peças ou acessórios para o sistema de motor de veículos automotores		
	Eixos, semieixos, engrenagens, ou outras peças para transmissão		
	Peças ou acessórios para os sistemas de marcha ou transmissão		
	Peças ou acessórios de plástico para veículos automotores, motocicletas, bicicletas e similares		
	Pneumáticos novos de borracha, usados em automóveis, camionetas ou utilitários		
	Freios (travões) e servofreios		
	Jogos de fios para velas de ignição e outros chicotes elétricos		

A fim de não os contabilizar duas vezes, o fluxo de referência utilizado foi somente a quantidade do produto principal, visto que o inventário deste já leva em conta conexões secundárias como eixos, sistemas de câmbio, pneus, freios, entre outros.

As considerações envolveram trinta e quatro produtos, que foram relacionados a dez correspondências principais, conforme listado na Tabela 8.

Tabela 8 - Correspondências principais após considerações

PRODUTO	CONSIDERAÇÃO
Aço	Figura 5a
Açúcar	Figura 5a
Carne Bovina	Figura 5a
Fertilizantes	Figura 5b
Ração Animal	Figura 5b
Petróleo	Figura 5b
Computadores de Mesa	Figura 5b
Automóveis	Figura 5c
Caminhões	Figura 5c
Motocicletas	Figura 5c

4.1.1.2 Produtos e datasets correspondentes

Após as devidas considerações para a determinação das correspondências, sessenta e seis dos cem produtos iniciais (Anexo A) foram representados na pesquisa. Uma vez que alguns produtos foram agregados para representar uma correspondência principal, um total de 55 *datasets* foi selecionado, levando em conta os produtos do IBGE e a eletricidade. As correspondências selecionadas podem ser visualizadas na Tabela 9. O farelo de soja apareceu duas vezes na lista de correspondência apenas para uma melhor visualização, já que foi considerado item da composição da ração animal.

Tabela 9 - Correspondências com o ecoinvent

(continua)

Produtos (IBGE e Eletricidade)	Correspondência com o ecoinvent
Minérios de ferro em bruto ou beneficiados, exceto pelotizados ou sinterizados	iron ore, beneficiated, 65% Fe/[GLO] iron ore beneficiation to 65% Fe
Óleo diesel	diesel/[RoW] petroleum refinery operation
Automóveis, jipes ou camionetas, para passageiros, de cilindrada entre 1500 cm ³ e 3000 cm ³ Automóveis, jipes ou camionetas, para passageiros, de cilindrada menor ou igual a 1.000 cm ³ Partes, peças e acessórios para veículos automotores Automóveis, jipes ou camionetas, de cilindrada entre 1000 cm ³ e 1500 cm ³ Peças ou acessórios para o sistema de motor de veículos automotores Eixos, semieixos, engrenagens, mancais, juntas de articulação ou outras peças para transmissão Peças ou acessórios para os sistemas de marcha ou transmissão Peças ou acessórios de plástico para veículos automotores, motocicletas, bicicletas e similares Pneumáticos novos de borracha, usados em automóveis, camionetas ou utilitários Freios (travões) e servofreios Jogos de fios para velas de ignição e outros chicotes elétricos	passenger car, petrol/natural gas/[GLO] passenger car production, petrol/natural gas
Óleos brutos de petróleo	petroleum/[RoW] petroleum and gas production, off-shore petroleum/[RoW] petroleum and gas production, on-shore
Minérios de ferro pelotizados ou sinterizados	iron pellet/[RoW] iron pellet production
Gasolina automotiva ou para outros usos, exceto para aviação	petrol, unleaded/[RoW] petroleum refinery operation
Alcool etílico não desnaturado, com teor alcoólico em volume maior ou igual a 80%, anidro ou hidratado para fins carburantes	ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation/[BR] ethanol production from sugar cane
Carnes de bovinos frescas ou refrigeradas Carnes de bovinos congeladas	red meat, live weight/[GLO] cattle for slaughtering, live weight to generic market for red meat, live weight
Caminhões, com motor diesel, de capacidade máxima de carga (cmc) superior a 5t Pneumáticos novos de borracha, usados em ônibus ou caminhões Motores diesel ou semidiesel para ônibus ou caminhões	lorry, 16 metric ton/[RoW] lorry production, 16 metric ton
Adubos ou fertilizantes com nitrogênio, fósforo e potássio (NPK)	ammonium sulfate, as N/[RoW] ammonium sulfate production urea, as N/[RoW] urea production, as N phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ /[RER] diammonium phosphate production phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ /[RoW] single superphosphate production phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ /[RoW] triple superphosphate production potassium chloride, as K ₂ O/[RoW] potassium chloride production ammonia, liquid/[RoW] ammonia production, steam reforming, liquid ammonium nitrate, as N/[RoW] ammonium nitrate production phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅ /[RER] monoammonium phosphate production phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state/[RoW] phosphoric acid production, dihydrate process sulfuric acid/[RoW] sulfuric acid production
Açúcar Cristal Açúcar VHP (<i>very high polarization</i>)	sugar, from sugarcane/[BR] cane sugar production with ethanol by-product
Óleos combustíveis, exceto diesel	heavy fuel oil/[RoW] petroleum refinery operation
Tortas, bagaços, farelos e outros resíduos da extração do óleo de soja	soybean meal/[BR] soybean meal and crude oil production
Cimentos Portland compostos (CP - II)	cement, alternative constituents 6-20%/[RoW] cement production, alternative constituents 6-20%

Tabela 9 - Correspondências com o ecoinvent

(conclusão)

Produtos (IBGE e Eletricidade)	Correspondência com o ecoinvent
Televisores (receptores de televisão)	display, cathode ray tube, 17 inches/[GLO] display production, cathode ray tube, 17 inches
Pastas químicas de madeira, processo sulfato, branqueadas ou não	sulfate pulp/[RER] sulfate pulp production, unbleached
Rações e outras preparações utilizadas na alimentação de animais	maize grain/[RoW] maize grain production soybean meal/[BR] soybean meal and crude oil production
Motocicletas (inclusive os motocicletos) com motor de pistão alternativo de cilindrada entre 50 cm ³ e 250 cm ³ Peças e acessórios para motocicletas, triciclos, motocicletos e outros, não especificados	electric bicycle/[RoW] electric bicycle production
Lingotes, blocos, tarugos ou placas de aço ao carbono Bobinas a quente de aço ao carbono, não revestidos Vergalhões de aço ao carbono Tubos, canos ou perfis ocos de aço com costura, não especificados Fio-máquina de aço ao carbono Bobinas ou chapas de aço zincadas (galvanizadas) Bobinas a frio de aço ao carbono, não revestidos Chapas, bobinas, fitas e tiras de aço, relaminadas, inclusive revestidas, pintadas ou envernizadas Barras de aço ao carbono Artefatos diversos de ferro e aço	steel, unalloyed/[RoW] steel production, converter, unalloyed
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	liquefied petroleum gas/[RoW] petroleum refinery operation
Querosenes de aviação	kerosene/[RoW] petroleum refinery operation
Massa de concreto preparada para construção; concreto usinado	concrete, normal/[RoW] concrete production, normal
Naftas para petroquímica	naphtha/[RoW] petroleum refinery operation
Caixas de papelão ondulado ou corrugado, impressas ou não	corrugated board box/[RoW] corrugated board box production
Leite esterilizado / UHT/ Longa Vida	cow milk/[RoW] milk production, from cow
Biodiesel	vegetable oil methyl ester/[BR] esterification of soybean oil
Computadores pessoais portáteis (<i>laptops, notebook, handhelds e semelhantes</i>)	computer, laptop/[GLO] computer production, laptop
Óleo de soja refinado	soybean oil, refined/[RoW] soybean oil refinery operation
Gás natural	natural gas, high pressure/[RoW] natural gas production
Polipropileno (PP)	polypropylene, granulate/[RoW] polypropylene production, granulate
Ferro-gusa	pig iron/[GLO] pig iron production
Óleo de soja em bruto, mesmo degomado	soybean oil, crude/[RoW] soybean meal and crude oil production
Alumínio não ligado em formas brutas	aluminium, primary, liquid/[RoW] aluminium production, primary, liquid, prebake
Papel para usos na escrita, impressão e outros fins gráficos, não revestido	paper, newsprint/[RoW] paper production, newsprint, virgin
Barras, perfis ou vergalhões de cobre ou de ligas de cobre	copper/[RoW] copper production, primary
Óxido de alumínio (alumina calcinada)	aluminium oxide/[GLO] aluminium oxide production
Ouro (incluído o ouro platinado), em formas brutas, semimanufaturadas ou em pó, para usos não monetários	gold/[RoW] gold production
Computadores pessoais de mesa (PC desktops)	computer, desktop, without screen/[GLO] computer production, desktop, without screen display, liquid crystal, 17 inches/[GLO] display production, liquid crystal, 17 inches
Sabões ou detergentes em pó, flocos, palhetas, grânulos ou outras formas semelhantes	soap/[RoW] soap production
Polietileno de alta densidade (PEAD)	polyethylene, high density, granulate/[RoW] polyethylene production, high density, granulate
Tintas ou vernizes dissolvidos em meio aquoso, para construção	acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state/[RoW] acrylic varnish production, product in 87.5% solution state
Caixas ou outras cartonagens dobráveis de papel-cartão ou cartolina, impressas	printed paper, offset/[RoW] offset printing, per kg printed paper
Geração de eletricidade no Brasil	electricity, high voltage/[BR] electricity, high voltage, production mix

4.1.2 Resultados de Contribuição do Processo

Realizadas as considerações pertinentes e a correspondência com a base de dados, os produtos resultantes foram relacionados ao vetor f da equação 3.1 (Anexo B). A matriz tecnológica A , elaborada peloecoinvent, possui 11.332 fluxos relacionados a 11.332 processos, ou seja, sua ordem n é 11.332. Por sua vez, a matriz de intervenções ambientais B apresenta 1.869 fluxos relacionados aos mesmos 11.332 processos.

Para a saúde humana, quinze processos elementares foram responsáveis por 80% de todo o impacto causado (Figura 8). Para melhor visualização, o gráfico mostra apenas os processos que representam mais de 0,1% do impacto total, o que totaliza sessenta e dois processos elementares.

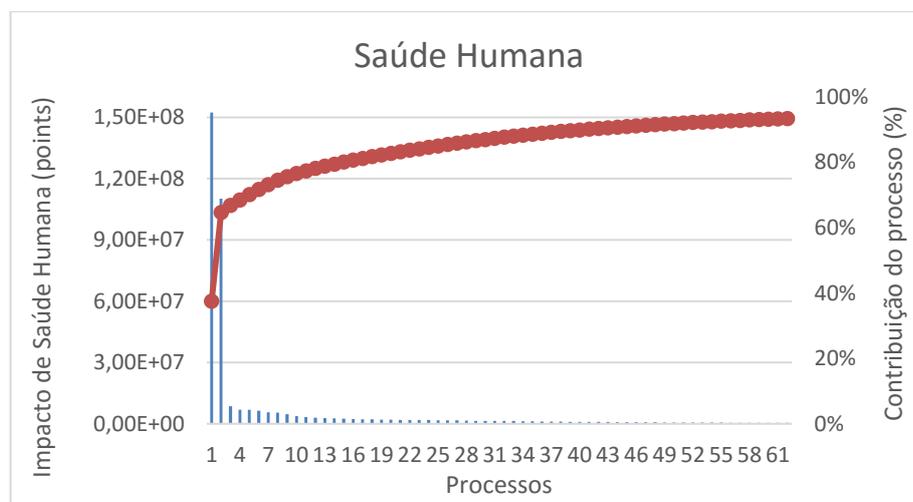


Figura 8 - Gráfico de contribuição dos processos para saúde humana.

Os quinze processos elementares responsáveis pelo impacto causado nesta área de dano podem ser mais bem visualizados na Tabela 10. Os nomes dos processos foram mantidos em inglês para garantir a fidelidade junto à base de dados, uma vez que a tradução pode causar dúvidas para os usuários.

Observa-se a que maior parte dos impactos de saúde humana é causada pelos dois primeiros processos, os quais se referem à produção de cana de açúcar.

Estes processos somados representam 64% do total, e seriam fortemente indicados para iniciar o processo de adaptação caso não fossem nacionais.

Tabela 10 - Processos elementares responsáveis pelo impacto na saúde humana

Posição	Processo Elementar	Impacto (points)	%
1	sugarcane//[BR] sugarcane production	152460000	37%
2	sugarcane//[BR] sugarcane production, on land recently transformed	110210000	27%
3	iron ore, crude ore, 46% Fe//[GLO] iron mine operation, crude ore, 46% Fe	8640200	2%
4	electricity, high voltage//[BR] electricity production, lignite	6896000	2%
5	digester sludge//[GLO] treatment of digester sludge, municipal incineration	6889000	2%
6	electricity, high voltage//[CN] electricity production, hard coal	6441700	2%
7	grass silage, Swiss integrated production//[CH] grass silage production, Swiss integrated production, intensive	5635500	1%
8	electricity, high voltage//[CA-ON] electricity production, nuclear, pressure water reactor, heavy water moderated	5539500	1%
9	wood ash mixture, pure//[RoW] treatment of wood ash mixture, pure, landfarming	4653200	1%
10	coke//[RoW] coking	3706800	0.9%
11	cattle for slaughtering, live weight//[RoW] milk production, from cow	3303400	0.8%
12	copper//[RoW] copper production, primary	3031100	0.7%
13	sinter, iron//[GLO] sinter production, iron	2826700	0.7%
14	natural gas, high pressure//[RoW] natural gas production	2622100	0.6%
15	ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation//[BR] ethanol production from sugar cane	2500300	0.6%

Assim como para a saúde humana, 80% do impacto de mudanças climáticas foi causado por sessenta processos elementares, como se observa na Figura 9.

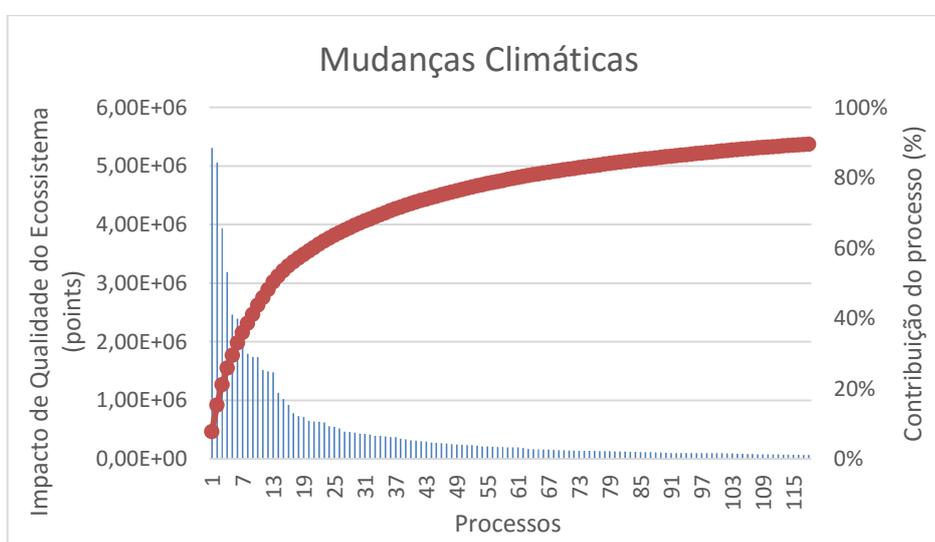


Figura 9 - Gráfico de contribuição dos processos para mudanças climáticas.

Cento e dezessete processos são responsáveis por contribuição maior que 0,1%. Os processos e suas contribuições podem ser observados na (Tabela 11). Para o impacto de mudanças climáticas a contribuição de cada processo é menor, sendo o de produção de clínquer o mais relevante (9%). Processos elementares relacionados à eletricidade de diferentes países aparecem quinze vezes na lista e totalizam mais de 25% de todo o impacto, se somados.

Tabela 11 - Processos elementares responsáveis pelo impacto em mudanças climáticas (continua)

Posição	Processo Elementar	Impacto (points)	%
1	clinker//[RoW] clinker production	6062600	9%
2	electricity, high voltage//[BR] electricity production, hydro, reservoir, tropical region	5055000	7%
3	electricity, high voltage//[CN] electricity production, hard coal	3946000	6%
4	pig iron//[GLO] pig iron production	3191100	5%
5	cattle for slaughtering, live weight//[RoW] milk production, from cow	2462200	4%
6	land tenure, arable land, measured as carbon net primary productivity//[BR] clear-cutting, shrubland to arable land	2390300	3%
7	land tenure, arable land, measured as carbon net primary productivity//[BR] clear-cutting, primary forest to arable land	1919600	3%
8	heat, district or industrial, other than natural gas//[RoW] refinery gas, burned in furnace	1796600	3%
9	electricity, high voltage//[BR] electricity production, natural gas, at conventional power plant	1741500	3%
10	soybean//[BR] soybean production, on land recently transformed	1736900	3%
11	electricity, high voltage//[BR] electricity production, oil	1517500	2%
12	heat, district or industrial, other than natural gas//[RoW] heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW	1497300	2%
13	hard coal//[CN] hard coal mine operation	1488000	2%
14	digester sludge//[GLO] treatment of digester sludge, municipal incineration	1130000	2%
15	sinter, iron//[GLO] sinter production, iron	1018100	1%
16	electricity, high voltage//[BR] electricity production, lignite	920740	1%
17	waste natural gas, sweet//[GLO] treatment of waste natural gas, sweet, burned in production flare	779950	1%
18	heavy fuel oil, burned in refinery furnace//[RoW] heavy fuel oil, burned in refinery furnace	730040	1%
19	sweet gas, burned in gas turbine//[RoW] sweet gas, burned in gas turbine	716730	1%
20	electricity, high voltage//[IN] electricity production, hard coal	653860	1%
21	electricity, high voltage//[RoW] electricity production, hard coal	645350	1%
22	ammonia, liquid//[RoW] ammonia production, steam reforming, liquid	631820	1%
23	transport, freight, sea, transoceanic ship//[GLO] transport, freight, sea, transoceanic ship	621620	1%
24	quicklime, in pieces, loose//[RoW] quicklime production, in pieces, loose	558660	1%
25	diesel, burned in building machine//[GLO] diesel, burned in building machine	551010	1%
26	heat, central or small-scale, other than natural gas//[RoW] heat production, anthracite, at stove 5-15kW	521020	1%
27	electricity, high voltage//[RFC] electricity production, hard coal	464760	1%
28	electricity, high voltage//[SERC] electricity production, hard coal	458180	1%
29	grass silage, Swiss integrated production//[CH] grass silage production, Swiss integrated production, intensive	445350	1%

Tabela 11 - Processos elementares responsáveis pelo impacto em mudanças climáticas (conclusão)

Posição	Processo Elementar	Impacto (points)	%
30	soybean//[RoW] soybean production	433810	1%
31	blast furnace gas//[JP] treatment of blast furnace gas, in power plant	425530	1%
32	heat, district or industrial, other than natural gas//[RoW] heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW	419490	1%
33	electricity, high voltage//[RoW] electricity production, natural gas, at conventional power plant	394350	1%
34	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3//[RoW] transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3	392500	1%
35	iron pellet//[RoW] iron pellet production	382090	1%
36	heat, district or industrial, natural gas//[RU] heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical	371920	1%
37	diesel, burned in diesel-electric generating set//[GLO] diesel, burned in diesel-electric generating set	370450	1%
38	aluminium, primary, liquid//[RoW] aluminium production, primary, liquid, prebake	341790	1%
39	steel, unalloyed//[RoW] steel production, converter, unalloyed	332680	0.5%
40	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3//[RoW] transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	316020	0.5%
41	waste natural gas, sour//[GLO] treatment of waste natural gas, sour, burned in production flare	312110	0.5%
42	polyethylene, high density, granulate//[RoW] polyethylene production, high density, granulate	299690	0.4%
43	polypropylene, granulate//[RoW] polypropylene production, granulate	294310	0.4%
44	nitric acid, without water, in 50% solution state//[RoW] nitric acid production, product in 50% solution state	280760	0.4%
45	electricity, high voltage//[RU] heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical	273080	0.4%
46	manure, liquid, cattle//[RoW] treatment of manure and biowaste by anaerobic digestion	267960	0.4%
47	soybean//[BR] soybean production	261790	0.4%
48	blast furnace gas//[CN] treatment of blast furnace gas, in power plant	252180	0.4%
49	electricity, high voltage//[RoW] electricity production, oil	247320	0.4%
50	transport, freight, sea, transoceanic tanker//[GLO] transport, freight, sea, transoceanic tanker	241650	0.4%
51	electricity, high voltage//[ZA] electricity production, hard coal	236810	0.3%
52	ammonia, liquid//[RER] ammonia production, partial oxidation, liquid	236260	0.3%
53	palm fruit bunch//[MY] palm fruit bunch production, on land recently transformed	223880	0.3%
54	hard coal//[RoW] hard coal mine operation	216160	0.3%
55	land tenure, arable land, measured as carbon net primary productivity//[MY] clear-cutting, primary forest to arable land	214100	0.3%
56	heat, district or industrial, natural gas//[Europe without Switzerland] heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW	206510	0.3%
57	clinker//[Europe without Switzerland] clinker production	203650	0.3%
58	coke//[RoW] coking	200750	0.3%
59	electricity, high voltage//[WECC, US only] electricity production, hard coal	197210	0.3%
60	electricity, high voltage//[JP] electricity production, hard coal	196480	0.3%

Os processos elementares responsáveis pelos impactos causados à área de dano de qualidade do ecossistema foram obtidos, conforme mostrado na Figura 10. Neste caso, o gráfico também mostra os processos que representam mais de 0,1% do impacto total desta área de dano, totalizando oitenta e três processos elementares de um total de 11.332.

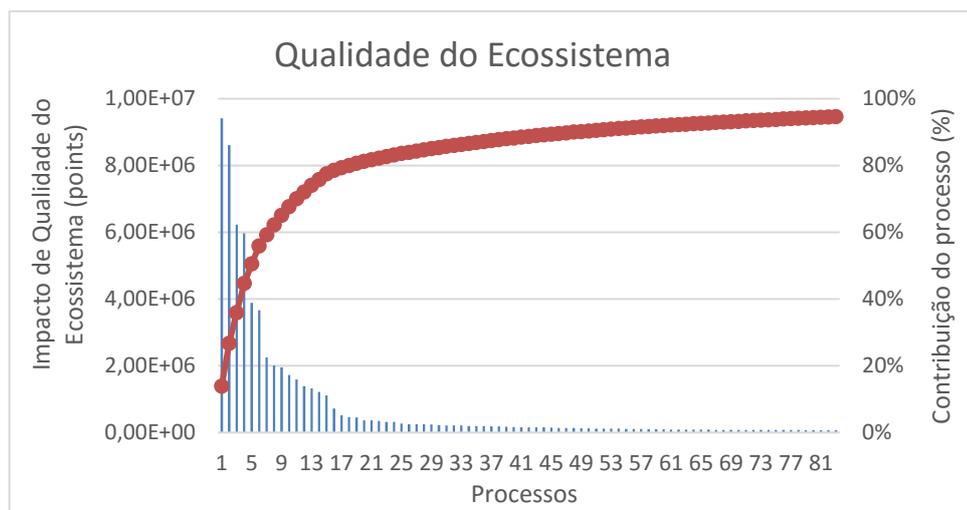


Figura 10 - Gráfico de contribuição dos processos para qualidade do ecossistema.

Como se pode observar na Figura 10, dezenove processos elementares são responsáveis por 80% dos impactos causados nesta categoria. Estes processos podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 - Processos elementares responsáveis pelo impacto na qualidade do ecossistema.

Posição	Processo Elementar	Impacto (points)	%
1	grass silage, Swiss integrated production/[CH] grass silage production, Swiss integrated production, intensive	9413700	14%
2	sugarcane/[BR] sugarcane production	8612000	13%
3	sugarcane/[BR] sugarcane production, on land recently transformed	6225400	9%
4	wood ash mixture, pure/[RoW] treatment of wood ash mixture, pure, landfarming	5973800	9%
5	electricity, high voltage/[CN] electricity production, hard coal	3902800	6%
6	maize silage, Swiss integrated production/[CH] maize silage production, Swiss integrated production, intensive	-3664900	5%
7	blasting/[RoW] blasting	2256000	3%
8	drilling waste/[CH] treatment of drilling waste, landfarming	2017500	3%
9	maize grain, Swiss integrated production/[CH] maize grain production, Swiss integrated production	1954400	3%
10	hay, Swiss integrated production, intensive/[CH] hay production, Swiss integrated production, intensive	1721700	3%
11	phosphate rock, as P2O5, beneficiated, dry/[RoW] phosphate rock beneficiation, dry	1590400	2%
12	green manure, Swiss integrated production, until April/[RoW] green manure growing, Swiss integrated production, until April	1387600	2%
13	soybean/[RoW] soybean production	-1324500	2%
14	copper/[RoW] copper production, primary	1212800	2%
15	blasting/[RER] blasting	1114100	2%
16	heat, district or industrial, other than natural gas/[RoW] heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW	726070	1%
17	tyre wear emissions, lorry/[RoW] treatment of tyre wear emissions, lorry	515870	0.8%
18	phosphate rock, as P2O5, beneficiated, wet/[RoW] phosphate rock beneficiation, wet	459400	0.7%
19	maize grain/[RoW] maize grain production	448340	0.7%

Neste caso, o processo elementar principal é o de produção de silagem de capim, que representa quase 14% do impacto. Nota-se que novamente os processos elementares de produção de cana-de-açúcar são significativos, representando 22% do impacto nesta categoria.

Por fim, para a categoria de dano de recursos, de acordo com a Figura 11, cinquenta e três processos elementares contribuem em mais de 0,1% em relação ao impacto total.

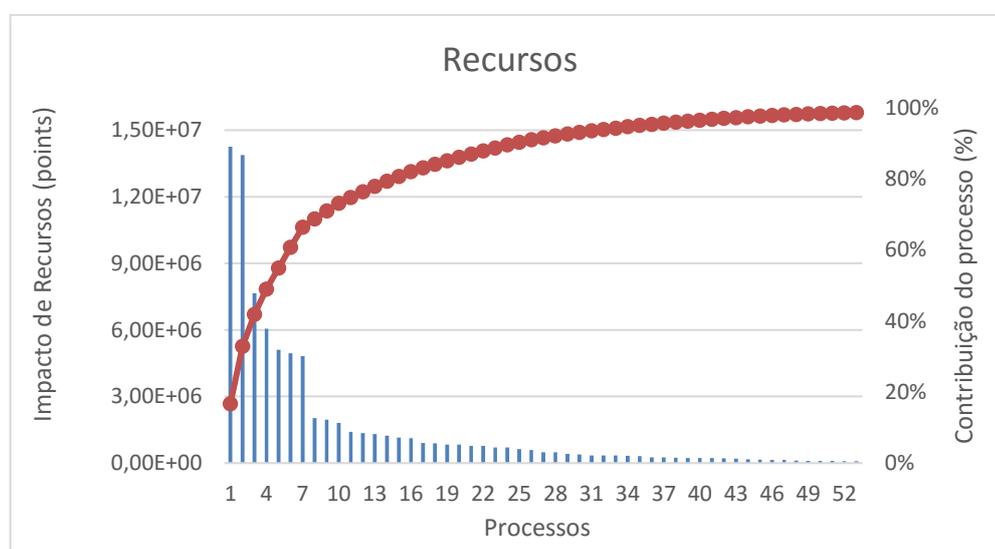


Figura 11 - Gráfico de contribuição dos processos para recursos.

O número de processos elementares responsáveis por 80% dos impactos foi quinze (Tabela 13). Os impactos desta categoria são, em maior parte, causados pelos processos de produção de petróleo, originados em diferentes países. Somados, representam 53% de todo o impacto de recursos e são relevantes para a priorização.

Tabela 13 - Processos elementares responsáveis pelo impacto em recursos.

Posição	Processo Elementar	Impacto (points)	%
1	petroleum//[RoW] petroleum and gas production, on-shore	14289000	17%
2	petroleum//[RME] petroleum production, onshore	13913000	16%
3	petroleum//[RoW] petroleum and gas production, off-shore	7659200	9%
4	petroleum//[RU] petroleum production, onshore	6073700	7%
5	hard coal//[CN] hard coal mine operation	5132800	6%
6	natural gas, high pressure//[RoW] natural gas production	4952500	6%
7	natural gas, unprocessed, at extraction//[GLO] natural gas production, unprocessed, at extraction	4827700	6%
8	hard coal//[RoW] hard coal mine operation	2047800	2%
9	hard coal//[RNA] hard coal mine operation	1953600	2%
10	petroleum//[RoW] petroleum production, onshore	1816000	2%
11	petroleum//[RAF] petroleum production, onshore	1415000	2%
12	petroleum//[NG] petroleum and gas production, on-shore	1358200	2%
13	uranium ore, as U//[RNA] uranium mine operation, underground	1314900	2%
14	uranium ore, as U//[RoW] uranium mine operation, underground	1241300	1%
15	natural gas, high pressure//[RU] natural gas production	1158900	1%

As quatro categorias abrangidas resultaram em uma lista de 91 processos elementares, quando descontadas as repetições. A base de dados contém 11.332 processos elementares que estão conectados ao vetor de demanda f , o qual representa os produtos de produção nacional relevante disponibilizados pelo IBGE. Quando se considera 80% do impacto total, apenas 91 processos, de 11.332, se tornam significativos para a adaptação, considerando as quatro áreas de dano.

O cálculo de contribuição de processos utilizando os cinco métodos de avaliação de impacto *endpoint* resultou em 137 processos elementares distintos para a priorização. O número de processos foi elevado em aproximadamente 50%, quando se compara à utilização apenas do IMPACT 2002+. Ainda assim, a quantidade de processos prioritários é bastante inferior ao número total de *datasets* contidos na base de dados.

A análise de sensibilidade para avaliar a composição da ração foi realizada considerando 70% milho e 30% farelo de soja, conforme sugerido por Tonissi e colaboradores (2013). Os resultados de contribuição dos processos não foram significativamente afetados em nenhuma das áreas de dano após a alteração da composição. A área de dano que apresentou variação mais expressiva foi a de qualidade do ecossistema, em que a nova composição provocou redução de 0,48% no impacto total.

4.1.3 Determinação do ranking de produtos para adaptação

O ranking dos produtos envolveu as quatro áreas de dano propostas pelo método IMPACT 2002+, tendo sido atribuído o peso padrão para todas as categorias. Uma vez que o número de processos elementares resultantes após a aplicação do princípio de Pareto é diferente para cada uma das áreas de dano, considerou-se ponderar os resultados dos 91 processos em todas as categorias. Com isso, garantiu-se que pelo menos 80% do resultado de impacto em cada área foi avaliado na ponderação. A Tabela 14 mostra a porcentagem do impacto total abrangida na ponderação para cada uma das áreas, considerando os 91 processos:

Tabela 14 - Porcentagem do impacto total abrangida na ponderação.

Saúde Humana	Mudanças Climáticas	Recursos	Qualidade do Ecossistema
89%	81%	85%	85%

Na Tabela 15 são mostrados os resultados de avaliação de impacto dos 91 processos elementares abrangidos. Os dados em vermelho mostram os processos que excedem o corte de 80% em cada área de dano, mas que foram considerados para a realização da ponderação. O processo elementar de produção de cana de açúcar, por exemplo, é pouco relevante para a categoria de mudanças climáticas e não faz parte dos processos abrangidos no corte de 80%, por isso nota-se que o resultado de avaliação de impacto está destacado em vermelho.

Tabela 15 - Resultados de avaliação de impacto para as quatro áreas de dano.

Posição	Processos Elementares	Resultados normalizados				Resultados ponderados Ranking (points)
		CC (points)	RES (points)	HH (points)	ECO (points)	
1	sugarcane//[BR] sugarcane production	1.52E+05	0	1.52E+08	8.61E+06	4.03E+07
2	sugarcane//[BR] sugarcane production, on land recently transformed	9.63E+04	0	1.10E+08	6.23E+06	2.91E+07
3	grass silage, Swiss integrated production//[CH] grass silage production, Swiss integrated production, intensive	4.45E+05	0	5.64E+06	9.41E+06	3.87E+06
4	petroleum//[RoW] petroleum and gas production, on-shore	7.48E+02	1.43E+07	4.89E+03	6.46E-03	3.57E+06

(continua)

Tabela 15 - Resultados de avaliação de impacto para as quatro áreas de dano.

(continua)

Posição	Processos Elementares	Resultados normalizados				Resultados ponderados Ranking (points)
		CC (points)	RES (points)	HH (points)	ECO (points)	
5	electricity, high voltage//[CN] electricity production, hard coal	3.95E+06	0	6.44E+06	3.90E+06	3.57E+06
6	petroleum//[RME] petroleum production, onshore	1.54E+03	1.39E+07	5.40E+03	6.30E-03	3.48E+06
7	wood ash mixture, pure//[RoW] treatment of wood ash mixture, pure, landfarming	0	0	4.65E+06	5.97E+06	2.66E+06
8	iron ore, crude ore, 46% Fe//[GLO] iron mine operation, crude ore, 46% Fe	0	9.42E+04	8.64E+06	4.47E+03	2.18E+06
9	digester sludge//[GLO] treatment of digester sludge, municipal incineration	1.13E+06	0	6.89E+06	2.55E+05	2.07E+06
10	electricity, high voltage//[BR] electricity production, lignite	9.21E+05	0	6.90E+06	6.68E+04	1.97E+06
11	clinker//[RoW] clinker production	6.06E+06	0	1.65E+06	4.56E+04	1.94E+06
12	petroleum//[RoW] petroleum and gas production, off-shore	6.15E+03	7.66E+06	5.92E+03	1.40E+01	1.92E+06
13	natural gas, high pressure//[RoW] natural gas production	5.70E+04	4.95E+06	2.62E+06	2.44E+04	1.91E+06
14	hard coal//[CN] hard coal mine operation	1.49E+06	5.13E+06	7.63E+05	4.66E+04	1.86E+06
15	cattle for slaughtering, live weight//[RoW] milk production, from cow	2.46E+06	0	3.30E+06	3.14E+05	1.52E+06
16	petroleum//[RU] petroleum production, onshore	6.60E+02	6.07E+06	2.31E+03	2.69E-03	1.52E+06
17	electricity, high voltage//[CA-ON] electricity production, nuclear, pressure water reactor, heavy water moderated	0	0	5.54E+06	1.43E+05	1.42E+06
18	natural gas, unprocessed, at extraction//[GLO] natural gas production, unprocessed, at extraction	1.13E+05	4.83E+06	3.87E+05	1.98E+04	1.34E+06
19	electricity, high voltage//[BR] electricity production, hydro, reservoir, tropical region	5.06E+06	0	1.52E+03	0	1.26E+06
20	maize silage, Swiss integrated production//[CH] maize silage production, Swiss integrated production, intensive	3.83E+04	0	9.58E+05	3.66E+06	1.17E+06
21	copper//[RoW] copper production, primary	3.69E+03	0	3.03E+06	1.21E+06	1.06E+06
22	land tenure, arable land, measured as carbon net primary productivity//[BR] clear-cutting, shrubland to arable land	2.39E+06	0	1.83E+06	5.25E+03	1.06E+06
23	soybean//[RoW] soybean production	4.34E+05	0	2.22E+06	1.32E+06	9.94E+05
24	coke//[RoW] coking	2.01E+05	0	3.71E+06	5.25E+03	9.78E+05
25	sinter, iron//[GLO] sinter production, iron	1.02E+06	0	2.83E+06	5.33E+04	9.75E+05
26	heat, district or industrial, other than natural gas//[RoW] heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW	1.50E+06	0	1.45E+06	7.26E+05	9.18E+05
27	land tenure, arable land, measured as carbon net primary productivity//[BR] clear-cutting, primary forest to arable land	1.92E+06	0	1.48E+06	4.23E+03	8.50E+05
28	pig iron//[GLO] pig iron production	3.19E+06	0	1.87E+05	2.01E+03	8.45E+05
29	blasting//[RoW] blasting	2.38E+03	0	1.07E+06	2.26E+06	8.31E+05
30	electricity, high voltage//[BR] electricity production, oil	1.52E+06	0	1.74E+06	5.68E+04	8.30E+05
31	transport, freight, sea, transoceanic ship//[GLO] transport, freight, sea, transoceanic ship	6.22E+05	0	2.37E+06	6.86E+04	7.65E+05
32	hay, Swiss integrated production, intensive//[CH] hay production, Swiss integrated production, intensive	7.45E+04	0	1.05E+06	1.72E+06	7.12E+05
33	maize grain, Swiss integrated production//[CH] maize grain production, Swiss integrated production	1.11E+05	0	7.13E+05	1.95E+06	6.94E+05
34	ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation//[BR] ethanol production from sugar cane	1.59E+04	0	2.50E+06	1.03E+05	6.55E+05
35	waste natural gas, sour//[GLO] treatment of waste natural gas, sour, burned in production flare	3.12E+05	3.36E+05	1.92E+06	2.38E+04	6.48E+05
36	iron pellet//[RoW] iron pellet production	3.82E+05	0	1.97E+06	2.99E+04	5.95E+05
37	hard coal//[RoW] hard coal mine operation	2.16E+05	2.05E+06	9.89E+04	1.51E+04	5.95E+05

Tabela 15 - Resultados de avaliação de impacto para as quatro áreas de dano.

Posição	Processos Elementares	Resultados normalizados				Resultados ponderados Ranking (points)
		CC (points)	RES (points)	HH (points)	ECO (points)	
38	diesel, burned in building machine/[GLO] diesel, burned in building machine	5.51E+05	0	1.67E+06	3.52E+04	5.64E+05
39	heat, district or industrial, other than natural gas/[RoW] refinery gas, burned in furnace	1.80E+06	0	4.21E+05	7.64E+03	5.56E+05
40	waste natural gas, sweet/[GLO] treatment of waste natural gas, sweet, burned in production flare	7.80E+05	8.39E+05	5.43E+05	1.74E+04	5.45E+05
41	drilling waste/[CH] treatment of drilling waste, landfarming	0	0	1.32E+05	2.02E+06	5.37E+05
42	diesel, burned in diesel-electric generating set/[GLO] diesel, burned in diesel-electric generating set	3.70E+05	0	1.70E+06	3.06E+04	5.26E+05
43	soybean/[BR] soybean production, on land recently transformed	1.74E+06	0	2.91E+05	5.63E+04	5.21E+05
44	heavy fuel oil, burned in refinery furnace/[RoW] heavy fuel oil, burned in refinery furnace	7.30E+05	0	1.25E+06	3.82E+04	5.06E+05
45	hard coal/[RNA] hard coal mine operation	2.45E+04	1.95E+06	6.33E+01	1.39E+04	4.98E+05
46	phosphate rock, as P2O5, beneficiated, dry/[RoW] phosphate rock beneficiation, dry	1.82E+04	0	3.59E+05	1.59E+06	4.92E+05
47	electricity, high voltage/[BR] electricity production, natural gas, at conventional power plant	1.74E+06	0	2.11E+05	6.46E+03	4.90E+05
48	petroleum/[RoW] petroleum production, onshore	2.02E+02	1.82E+06	7.09E+02	8.27E-04	4.54E+05
49	sweet gas, burned in gas turbine/[RoW] sweet gas, burned in gas turbine	7.17E+05	7.81E+05	2.66E+05	9.44E+03	4.43E+05
50	electricity, high voltage/[RoW] electricity production, hard coal	6.45E+05	0	7.22E+05	3.65E+05	4.33E+05
51	electricity, high voltage/[IN] electricity production, hard coal	6.54E+05	0	6.90E+05	3.69E+05	4.28E+05
52	blasting/[RER] blasting	1.18E+03	0	5.27E+05	1.11E+06	4.11E+05
53	green manure, Swiss integrated production, until April/[RoW] green manure growing, Swiss integrated production, until April	5.36E+04	0	9.01E+03	1.39E+06	3.63E+05
54	petroleum/[RAF] petroleum production, onshore	1.57E+02	1.42E+06	5.49E+02	6.40E-04	3.54E+05
55	soybean/[BR] soybean production	2.62E+05	0	9.68E+05	1.81E+05	3.53E+05
56	polyethylene, high density, granulate/[RoW] polyethylene production, high density, granulate	3.00E+05	9.11E+05	1.66E+05	3.00E+03	3.45E+05
57	petroleum/[NG] petroleum and gas production, onshore	7.11E+01	1.36E+06	4.65E+02	6.14E-04	3.40E+05
58	uranium ore, as U/[RNA] uranium mine operation, underground	0	1.31E+06	1.00E+04	2.52E+01	3.31E+05
59	polypropylene, granulate/[RoW] polypropylene production, granulate	2.94E+05	8.31E+05	1.50E+05	2.80E+03	3.20E+05
60	uranium ore, as U/[RoW] uranium mine operation, underground	0	1.24E+06	9.45E+03	2.38E+01	3.13E+05
61	natural gas, high pressure/[RU] natural gas production	9.56E+03	1.16E+06	2.35E+02	7.49E+00	2.92E+05
62	heat, central or small-scale, other than natural gas/[RoW] heat production, anthracite, at stove 5-15kW	5.21E+05	0	2.99E+05	2.48E+05	2.67E+05
63	transport, freight, sea, transoceanic tanker/[GLO] transport, freight, sea, transoceanic tanker	2.42E+05	0	7.85E+05	1.89E+04	2.61E+05
64	electricity, high voltage/[RFC] electricity production, hard coal	4.65E+05	0	3.54E+05	5.12E+04	2.17E+05
65	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3/[RoW] transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3	3.93E+05	0	4.62E+05	1.43E+04	2.17E+05
66	ammonia, liquid/[RoW] ammonia production, steam reforming, liquid	6.32E+05	0	2.16E+05	1.23E+04	2.15E+05
67	electricity, high voltage/[SERC] electricity production, hard coal	4.58E+05	0	2.89E+05	4.96E+04	1.99E+05
68	heat, district or industrial, other than natural gas/[RoW] heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW	4.19E+05	0	3.02E+05	1.55E+04	1.84E+05
69	tyre wear emissions, lorry/[RoW] treatment of tyre wear emissions, lorry	0	0	2.08E+05	5.16E+05	1.81E+05

(continua)

Tabela 15 - Resultados de avaliação de impacto para as quatro áreas de dano.

Posição	Processos Elementares	Resultados normalizados				Resultados ponderados Ranking (points)
		CC (points)	RES (points)	HH (points)	ECO (points)	
70	transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3/[RoW] transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO3	3.16E+05	0	3.70E+05	1.16E+04	1.74E+05
71	maize grain/[RoW] maize grain production	1.01E+05	0	1.12E+05	4.48E+05	1.65E+05
72	electricity, high voltage/[ZA] electricity production, hard coal	2.37E+05	0	2.75E+05	1.35E+05	1.62E+05
73	aluminium, primary, liquid/[RoW] aluminium production, primary, liquid, prebake	3.42E+05	0	2.88E+05	1.82E+03	1.58E+05
74	quicklime, in pieces, loose/[RoW] quicklime production, in pieces, loose	5.59E+05	0	6.50E+04	5.97E+03	1.57E+05
75	phosphate rock, as P2O5, beneficiated, wet/[RoW] phosphate rock beneficiation, wet	0	0	1.09E+05	4.59E+05	1.42E+05
76	steel, unalloyed/[RoW] steel production, converter, unalloyed	3.33E+05	0	2.18E+05	4.08E+03	1.39E+05
77	ammonia, liquid/[RER] ammonia production, partial oxidation, liquid	2.36E+05	0	2.75E+05	1.21E+04	1.31E+05
78	electricity, high voltage/[RoW] electricity production, oil	2.47E+05	0	2.50E+05	9.20E+03	1.27E+05
79	nitric acid, without water, in 50% solution state/[RoW] nitric acid production, product in 50% solution state	2.81E+05	0	1.90E+05	1.03E+04	1.20E+05
80	blast furnace gas/[JP] treatment of blast furnace gas, in power plant	4.26E+05	0	2.40E+04	6.60E+02	1.13E+05
81	electricity, high voltage/[RoW] electricity production, natural gas, at conventional power plant	3.94E+05	0	3.78E+04	1.16E+03	1.08E+05
82	manure, liquid, cattle/[RoW] treatment of manure and biowaste by anaerobic digestion	2.68E+05	0	1.35E+05	1.28E+04	1.04E+05
83	heat, district or industrial, natural gas/[RU] heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical	3.72E+05	0	3.57E+04	1.09E+03	1.02E+05
84	land tenure, arable land, measured as carbon net primary productivity/[MY] clear-cutting, primary forest to arable land	2.14E+05	0	1.65E+05	4.73E+02	9.49E+04
85	electricity, high voltage/[JP] electricity production, hard coal	1.96E+05	0	1.40E+05	4.22E+04	9.45E+04
86	electricity, high voltage/[RU] heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical	2.73E+05	0	2.62E+04	8.03E+02	7.50E+04
87	electricity, high voltage/[WECC, US only] electricity production, hard coal	1.97E+05	0	7.80E+04	2.10E+04	7.40E+04
88	blast furnace gas/[CN] treatment of blast furnace gas, in power plant	2.52E+05	0	1.42E+04	3.91E+02	6.67E+04
89	clinker/[Europe without Switzerland] clinker production	2.04E+05	0	5.55E+04	1.54E+03	6.52E+04
90	palm fruit bunch/[MY] palm fruit bunch production, on land recently transformed	2.24E+05	0	3.13E+03	1.13E+04	5.96E+04
91	heat, district or industrial, natural gas/[Europe without Switzerland] heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW	2.07E+05	0	9.20E+03	2.78E+02	5.40E+04

O ranqueamento apontou a ordem de processos elementares que deve ser seguida na adaptação. Nota-se que os dois primeiros processos se referem à produção de cana de açúcar, que já são referentes ao Brasil, seguidos pela silagem de capim, produção de petróleo e eletricidade da China. Ometto, Hauschild e Roma (2009) realizaram uma avaliação do ciclo de vida da produção de etanol a partir da cana de açúcar e identificaram que as categorias de enriquecimento de nutrientes, acidificação e toxicidade humana são as maiores responsáveis pelos

impactos ambientais potenciais. Tais categorias estão relacionadas às áreas de dano de saúde humana e qualidade do ecossistema, confirmando a alta contribuição do processo elementar de produção da cana de açúcar mostrada na Tabela 15.

É possível observar a influência de processos de eletricidade, originados de diferentes regiões e por diferentes fontes, uma vez que dos noventa e um processos elementares listados, dezesseis se referem à eletricidade. Estes *datasets* compõem o mercado do mix de energia elétrica, o qual é utilizado por inúmeros outros conjuntos de dados que se conectam aos produtos estabelecidos no vetor f . Além disso, o resultado do ranqueamento é influenciado pelos resultados de saúde humana, cujo processo elementar de maior contribuição chega a ser 25 vezes maior na normalização que o processo de maior contribuição de mudanças climáticas, por exemplo.

4.2 RESULTADOS DE SENSIBILIDADE DOS FLUXOS

A rotina de cálculo aplicada para a determinação da sensibilidade dos fluxos gerou resultados para as intervenções tecnológicas e ambientais de cada uma das áreas de dano estudadas. Os resultados de sensibilidade dos fluxos, denominados multiplicadores, estão sempre associados aos processos em que ocorrem, sendo que para cada situação um número diferente de fluxos teve sua sensibilidade quantificada (Tabela 16). Para as intervenções tecnológicas, os multiplicadores representam a propagação do resultado de possíveis variações nos fluxos de entrada. Isto significa que se houver variação de 1% na entrada de determinado fluxo, em dado processo, o resultado de impacto será alterado de acordo com a intensidade do multiplicador. Os resultados de perturbação nas intervenções ambientais mostram quais emissões ou consumo de recursos, em dado processo, provocam maiores alterações nos resultados de impacto.

Tabela 16 - Número de fluxos quantificados

Área de dano	Fluxos	
	Tecnológicos	Ambientais
Saúde Humana	352.307	121.299
Mudanças Climáticas	351.996	15.086
Recursos	351.915	5.925
Qualidade do Ecossistema	352.237	97.457

Apesar do elevado número de fluxos quantificados, poucos têm multiplicador com valor maior do que 1%. Isto significa que para a maioria dos casos, 1% de variação em um dado de entrada propaga-se como desvios menores nos resultados da avaliação do impacto. A Figura 12 e a Figura 13 mostram os resultados da análise de perturbação para as quatro áreas de danos avaliadas, por intervenções tecnológicas e ambientais, respectivamente. O número de fluxos mostrado foi reduzido para 10.000 para as intervenções tecnológicas e 1.000 para as ambientais, a fim de melhor visualizar os pontos iniciais do gráfico de dispersão.

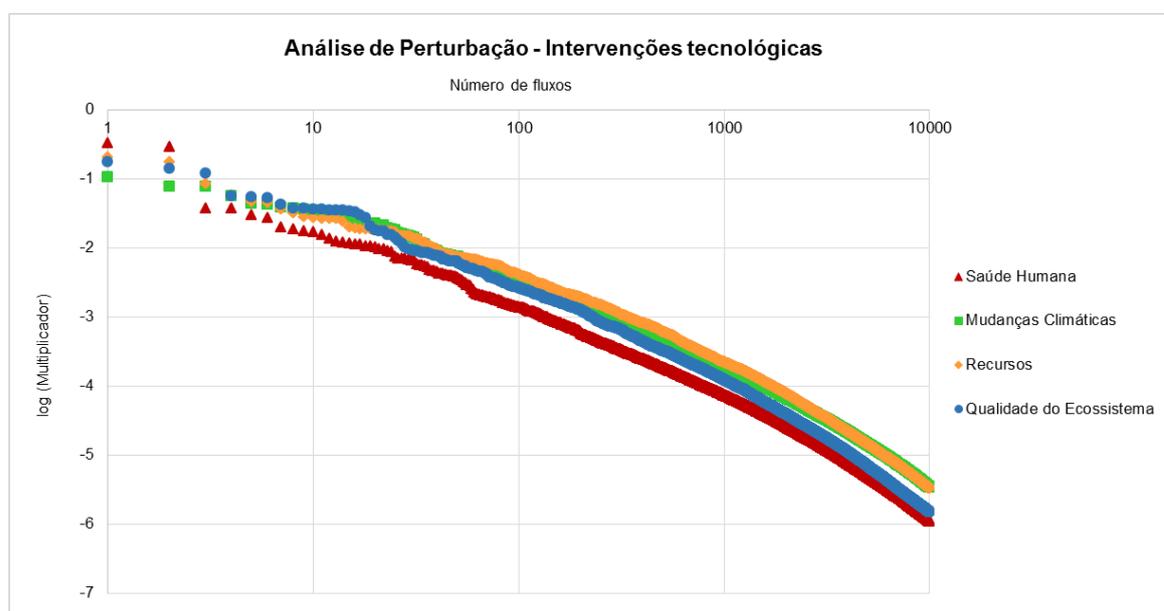


Figura 12 - Resultados de análise de perturbação para as intervenções tecnológicas

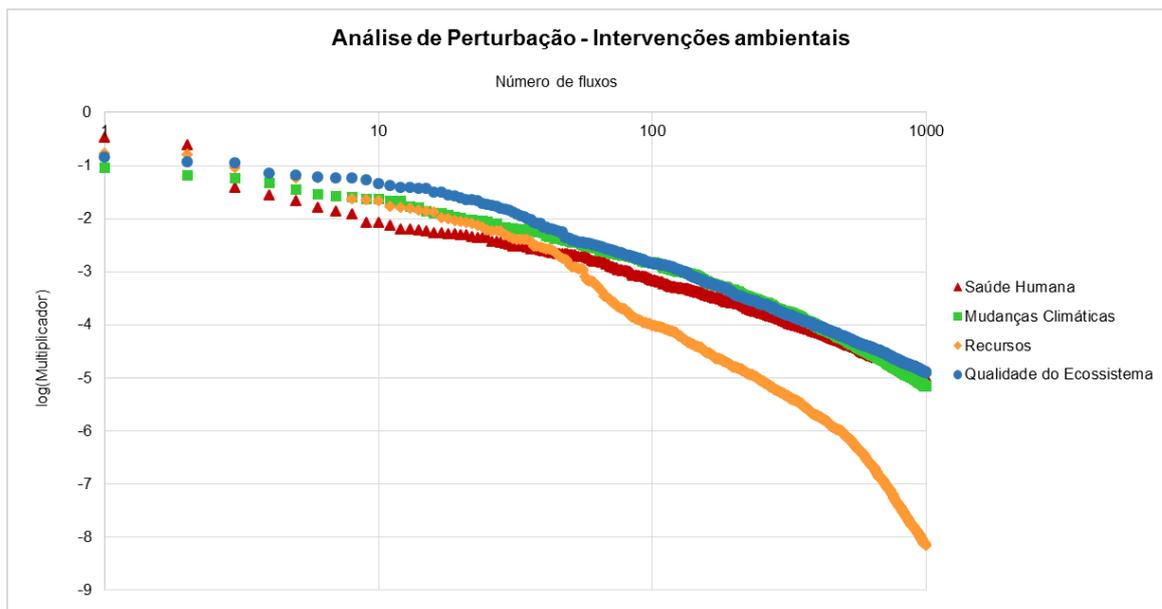


Figura 13 - Resultados de análise de perturbação para as intervenções ambientais

As figuras mostram que para todas as categorias, menos de 100 fluxos tiveram multiplicadores maiores que 1% ($\log(\text{Multiplicador})$ igual a -2), o que representa cerca de 0,03% do número total de fluxos quantificados. Portanto, é possível concentrar esforços na adaptação dos fluxos críticos, que devem ser conhecidos mais precisamente, uma vez que conduzem a mudanças importantes nos resultados de impacto.

Os cinco primeiros fluxos para cada área de dano são mostrados na Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20, tanto para as intervenções tecnológicas quanto para as ambientais. Esta informação é bastante útil para determinar quais fluxos de cada processo elementar merecem atenção. Ressalta-se que nesta etapa, os processos de mercado não foram levados em conta.

Para a área de saúde humana (Tabela 17), o fluxo de entrada de cana de açúcar no processo de produção de etanol é o que apresenta maior sensibilidade (33,2%), ao considerar as intervenções tecnológicas. Já para as ambientais, a emissão de arsênio no solo no processo de produção da cana é o fluxo mais sensível (33,8%).

Tabela 17 - Resultados de análise de perturbação para a área de dano de saúde humana

Área de dano	Tecnológicos			Ambientais		
	Fluxo	Processo	%	Fluxo	Processo	
Saúde Humana	sugarcane//[BR] market for sugarcane	ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation//[BR] ethanol production from sugar cane	33,2%	(u'Arsenic', u'soil', u'agricultural')	sugarcane//[BR] sugarcane production	33,8%
	sugarcane//[BR] market for sugarcane	sugarcane//[BR] cane sugar production with ethanol by-product	29,0%	(u'Arsenic', u'soil', u'agricultural')	sugarcane//[BR] sugarcane production, on land recently transformed	24,4%
	electricity, high voltage//[BR] cane sugar production with ethanol by-product	electricity, high voltage//[BR] electricity, high voltage, production mix	3,7%	(u'Aldrin', u'soil', u'agricultural')	sugarcane//[BR] sugarcane production	3,8%
	sugarcane//[BR] market for sugarcane	electricity, high voltage//[BR] cane sugar production with ethanol by-product	3,7%	(u'Aldrin', u'soil', u'agricultural')	sugarcane//[BR] sugarcane production, on land recently transformed	2,8%
	pig iron//[GLO] market for pig iron	steel, unalloyed//[RoW] steel production, converter, unalloyed	3,0%	(u'Particulates, < 2.5 um', u'air', u'non-urban air or from high stacks')	iron ore, crude ore, 46% Fe//[GLO] iron mine operation, crude ore, 46% Fe	2,2%

É possível estabelecer uma ordem de prioridade entre as intervenções tecnológicas e ambientais de acordo com o seu percentual de sensibilidade. Neste caso, a adaptação da emissão de arsênio no solo é mais importante quando se compara à entrada de cana no processo de produção do etanol, que apresenta multiplicador 0,6% menor. Em seguida, o próximo fluxo relevante é o de entrada de cana de açúcar no processo de produção de açúcar (29%), e assim sucessivamente.

Para a área de mudanças climáticas, os resultados mostrados na Tabela 18 indicaram que o fluxo mais sensível a mudanças é referente à entrada de ferro-gusa no processo de produção do aço. Na sequência, a variação de 1% na emissão de dióxido de carbono fóssil no processo de produção de clínquer é responsável pela variação de 8,9% no resultado de impacto de mudanças climáticas. O fluxo de entrada de clínquer na produção de cimento Portland apresentou variação de 7,7%.

Tabela 18 - Resultados de análise de perturbação para a área de dano de mudanças climáticas

Área de dano	Tecnológicos			Ambientais		
	Fluxo	Processo	%	Fluxo	Processo	
Mudanças Climáticas	pig iron/[GLO] market for pig iron	steel, unalloyed/[RoW] steel production, converter, unalloyed cement, alternative constituents 6-20%/[RoW] cement production, alternative constituents 6-20%	10,6%	(u'Carbon dioxide, fossil', u'air', u'unspecified')	clinker/[RoW] clinker production	8,9%
	clinker/[RoW] clinker production		7,7%	(u'Carbon dioxide, from soil or biomass stock', u'air', u'non-urban air or from high stacks')	electricity, high voltage/[BR] electricity production, hydro, reservoir, tropical region	6,5%
	electricity, high voltage/[BR] electricity production, hydro, reservoir, tropical region	electricity, high voltage/[BR] electricity, high voltage, production mix	7,7%	(u'Carbon dioxide, fossil', u'air', u'urban air close to ground')	electricity, high voltage/[CN] electricity production, hard coal	5,8%
	soybean/[GLO] market for soybean	soybean oil, crude/[RoW] soybean meal and crude oil production	5,6%	(u'Carbon dioxide, fossil', u'air', u'unspecified')	pig iron/[GLO] pig iron production	4,7%
	manure, liquid, cattle/[GLO] market for manure, liquid, cattle	cattle for slaughtering, live weight/[RoW] milk production, from cow	4,3%	(u'Carbon dioxide, from soil or biomass stock', u'air', u'non-urban air or from high stacks')	land tenure, arable land, measured as carbon net primary productivity/[BR] clear-cutting, shrubland to arable land	3,5%

Os principais resultados para a área de recursos (Tabela 19) são relacionados aos fluxos de entrada de petróleo na produção dos seus derivados, considerando as intervenções tecnológicas. Já para as intervenções ambientais, o consumo de recursos naturais, neste caso o óleo bruto, foi bastante relevante em todos os casos.

Tabela 19 - Resultados de análise de perturbação para a área de dano de recursos

Área de dano	Tecnológicos			Ambientais		
	Fluxo	Processo	%	Fluxo	Processo	
Recursos	petroleum/[GLO] market for petroleum	diesel/[RoW] petroleum refinery operation	20,6%	(u'Oil, crude, in ground', 'natural resource', u'in ground')	petroleum/[RoW] petroleum and gas production, on-shore	16,7%
	petroleum/[GLO] market for petroleum	heavy fuel oil/[RoW] petroleum refinery operation	17,2%	(u'Oil, crude, in ground', 'natural resource', u'in ground')	petroleum/[RME] petroleum production, onshore	16,2%
	petroleum/[GLO] market for petroleum	petrol, unleaded/[RoW] petroleum refinery operation	8,5%	(u'Oil, crude, in ground', 'natural resource', u'in ground')	petroleum/[RoW] petroleum and gas production, off-shore	8,9%
	natural gas, unprocessed, at extraction/[GLO] market for natural gas, unprocessed, at extraction	natural gas, high pressure/[RoW] natural gas production	5,8%	(u'Oil, crude, in ground', 'natural resource', u'in ground')	petroleum/[RU] petroleum production, onshore	7,1%
	petroleum/[GLO] market for petroleum	naphtha/[RoW] petroleum refinery operation	4,7%	(u'Coal, hard, unspecified, in ground', 'natural resource', u'in ground')	hard coal/[CN] hard coal mine operation	5,9%

Por fim, para a área de qualidade do ecossistema os resultados são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados de análise de perturbação para a área de dano de qualidade do ecossistema

Área de dano	Tecnológicos			Ambientais		
	Fluxo	Processo	%	Fluxo	Processo	
Qualidade do Ecossistema	grass silage, Swiss integrated production//[GLO] market for grass silage, Swiss integrated production	cattle for slaughtering, live weight//[RoW] milk production, from cow	17,3%	(u'Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive', 'natural resource', u'land')	soybean//[RoW] soybean production	14,1%
	sugarcane//[BR] market for sugarcane	ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation//[BR] ethanol production from sugar cane	13,8%	(u'Zinc', u'soil', u'agricultural')	soybean//[RoW] soybean production	-11,4%
	sugarcane//[BR] market for sugarcane	sugar, from sugarcane//[BR] cane sugar production with ethanol by-product	12,0%	(u'Occupation, pasture, man made, intensive', 'natural resource', u'land')	grass silage, Swiss integrated production//[CH] grass silage production, Swiss integrated production, intensive	10,9%
	maize grain, Swiss integrated production//[GLO] market for maize grain, Swiss integrated production	maize grain, feed, Swiss integrated production//[CH] maize grain, feed production, Swiss integrated production	5,6%	(u'Occupation, annual crop, non-irrigated, intensive', 'natural resource', u'land')	soybean//[BR] soybean production	7,2%
	maize grain, feed, Swiss integrated production//[GLO] market for maize grain, feed, Swiss integrated production	cattle for slaughtering, live weight//[RoW] milk production, from cow	5,4%	(u'Lead-210', u'air', u'urban air close to ground')	electricity, high voltage//[CN] electricity production, hard coal	6,6%

O fluxo de silagem de capim no processo de produção de gado para abate é o mais sensível, considerando as intervenções tecnológicas. Para as intervenções ambientais, a ocupação do solo apresentou o maior multiplicador e, conseqüentemente, maior variação nos resultados de impacto quando se varia o fluxo em 1%.

4.3 IDENTIFICAÇÃO DOS FLUXOS PRIORITÁRIOS PARA A ADAPTAÇÃO

A identificação dos fluxos prioritários para a adaptação foi realizada qualitativamente por meio da avaliação das variáveis perturbação e incerteza de cada fluxo em um dado processo. Este procedimento foi realizado individualmente,

seguindo o ranking proposto nos resultados da seção 4.1.3. Os dois primeiros processos elementares do ranking se referem à produção brasileira de cana-de-açúcar. Neste caso, a adaptação regional não é necessária, uma vez que os dados já representam o país. Ainda assim, esforços estão sendo realizados pela EMBRAPA para a atualização destes *datasets*. Os próximos itens do ranking não foram necessariamente avaliados em ordem, uma vez que a obtenção de dados é um fator altamente limitante para a aplicação da técnica da ACV como um todo.

Os processos avaliados nas próximas etapas deste trabalho foram, então, o de produção silagem de capim, de clínquer, de eletricidade chinesa e de ferro-gusa.

4.3.1 Processo de produção de silagem de capim e relação com a produção de leite de vaca

Em virtude da produção de silagem ser significativa para os resultados de contribuição dos processos e de análise de perturbação, uma investigação mais profunda foi realizada para determinar as relações deste processo elementar com os produtos que compuseram o vetor de demanda.

O resultado do ranking de produtos, mostrado na Tabela 15, apresentou o processo elementar de produção de silagem de capim como sendo significativo para as áreas de dano de mudanças climáticas, saúde humana e qualidade do ecossistema.

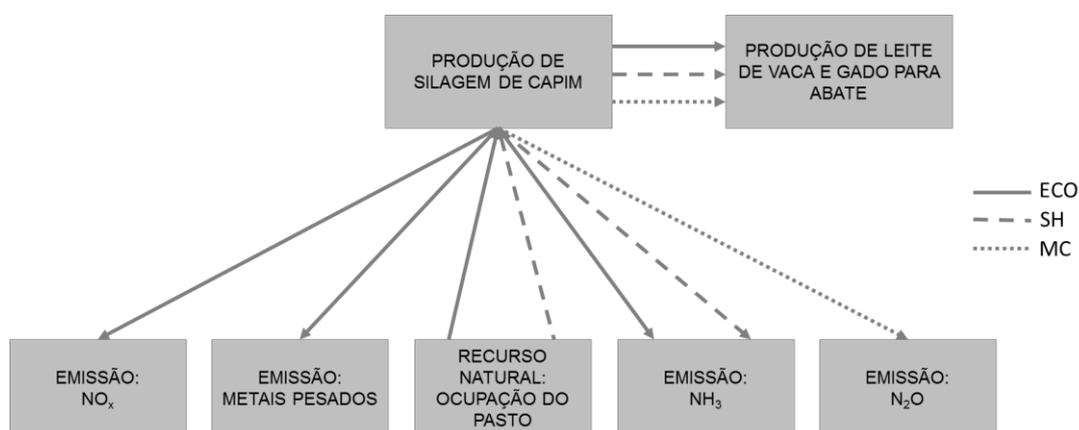


Figura 14 - Fluxos relevantes para o processo de produção de leite de vaca e silagem de capim.

A Figura 14 mostra os fluxos relevantes, ambientais e tecnológicos, para a produção de leite de vaca e silagem de capim, determinados por meio da análise de perturbação.

As variáveis de perturbação e incerteza foram avaliadas para os fluxos e processos relacionados à produção de silagem de capim (Tabela 21). Nota-se que para as três áreas de dano, a entrada de silagem de capim no processo elementar de gado para abate é a mais sensível, ao passo que as emissões de amônia e óxido de dinitrogênio são os fluxos de maior incerteza.

Tabela 21 - Resultados de perturbação e incerteza para o processo elementar de produção de silagem de capim.

Fluxo	Processo	Perturbação (Multiplicador, %)	Incerteza (Variância)
Qualidade do Ecossistema			
Silagem de capim	Gado para abate	17,3	0,003
Silagem de capim	Leite de vaca	0,68	0,003
Ocupação do pasto	Silagem de capim	10,9	0,049
Zinco	Silagem de capim	3,78	0,11
Cobre	Silagem de capim	1,45	0,11
Amônia	Silagem de capim	0,81	0,12
Chumbo	Silagem de capim	-0,19	Indefinido
Níquel	Silagem de capim	-0,14	Indefinido
Mercúrio	Silagem de capim	-0,12	Indefinido
Cádmio	Silagem de capim	-0,05	Indefinido
Saúde Humana			
Silagem de capim	Gado para abate	1,95	0,003
Silagem de capim	Leite de vaca	0,077	0,003
Amônia	Silagem de capim	1,21	0,12
Zinco	Silagem de capim	0,19	0,11
NOx	Silagem de capim	0,02	0,16
Cádmio	Silagem de capim	0,02	Indefinido
Mudanças Climáticas			
Silagem de capim	Gado para abate	2,1	0,003
Silagem de capim	Leite de vaca	0,08	0,003
Emissão de N2O	Silagem de capim	0,65	0,16

Estes resultados mostram que é necessário rever a dieta do gado leiteiro no Brasil a fim de verificar quais tipos de ração são consumidas e se há ou não a entrada de silagem de capim no sistema nacional. Se este fluxo for comum à

produção de gado no país, as emissões da produção da silagem de capim devem ser revisadas para a adaptação deste *dataset*.

4.3.2 Processo de produção de eletricidade chinesa a partir de carvão mineral

A produção de eletricidade chinesa a partir de carvão mineral é um dos itens de maior relevância no *ranking* de processos elementares. Isto ocorre porque os itens selecionados para serem mapeados ambientalmente correspondem à produção global ou *Rest of the World (RoW)*, em sua maioria. Assim, a entrada de eletricidade nos conjuntos de dados de tais produtos se refere ao mercado global de eletricidade, tendo como fontes a geração elétrica de diferentes países. Este fato demonstra, mais uma vez, a importância de trabalhar com conjuntos de dados representativos para a realidade brasileira, já que pode ocorrer de os produtos nacionais não receberem matérias-primas que tenham sido produzidas na China e, conseqüentemente, não sofrerem a influência dos impactos causados por tal fluxo.

O processo elementar em questão é fonte de emissão de diversos poluentes, o que justifica a alta contribuição para os impactos ambientais para as áreas de saúde humana, qualidade do ecossistema e mudanças climáticas. Os resultados de análise de perturbação para este processo elementar podem ser vistos na Figura 15.

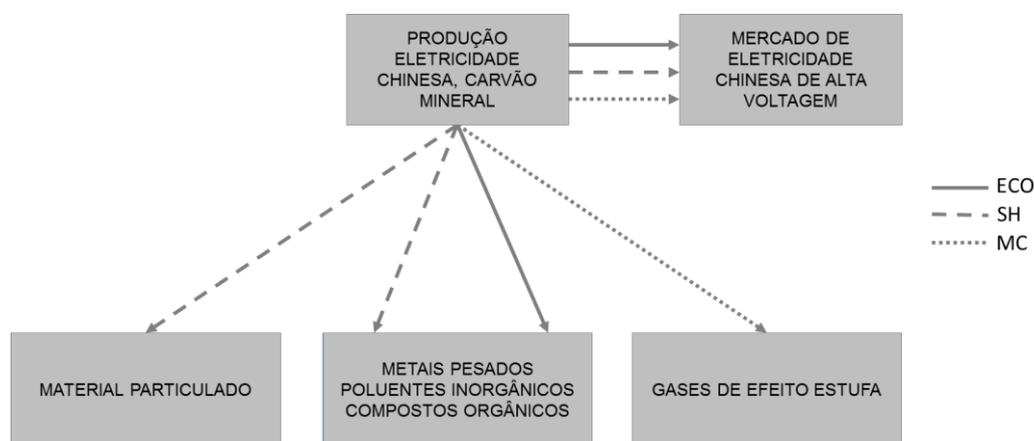


Figura 15 - Resultados de análise de perturbação para a produção de eletricidade chinesa a partir de carvão mineral.

A Tabela 22 mostra os resultados de perturbação e incerteza para os fluxos relacionados ao processo de produção de eletricidade chinesa. Para a área de mudanças climáticas, o fluxo de maior sensibilidade está relacionado à emissão de CO₂ no processo de produção de eletricidade. Para esta mesma categoria, o fluxo mais incerto é o de emissão de monóxido de carbono. Já para as áreas de saúde humana e qualidade do ecossistema, as emissões de metais como molibdênio e zinco apresentam maior incerteza, ao passo que os fluxos de maior sensibilidade estão relacionados à entrada de eletricidade no mercado de alta voltagem e à emissão de chumbo na produção.

Tabela 22 - Resultados de perturbação e incerteza para o processo elementar de produção de eletricidade chinesa.

Fluxo	Processo	Perturbação (Multiplicador, %)	Incerteza (Variância)
Mudanças Climáticas			
Eletricidade chinesa, carvão mineral	Mercado de eletricidade chinesa de alta voltagem	3,67	Indefinido
Dióxido de Carbono	Eletricidade chinesa, carvão mineral	5,77	0,01
Monóxido de Dinitrogênio	Eletricidade chinesa, carvão mineral	4,7E-03	0,16
Monóxido de Carbono	Eletricidade chinesa, carvão mineral	7,6E-04	0,84
Metano	Eletricidade chinesa, carvão mineral	4,3E-04	0,25
Saúde Humana			
Eletricidade chinesa, carvão mineral	Mercado de eletricidade chinesa de alta voltagem	1,08	Indefinido
Dióxido de enxofre	Eletricidade chinesa, carvão mineral	0,62	0,13
Óxidos de nitrogênio	Eletricidade chinesa, carvão mineral	0,53	0,13
Material particulado	Eletricidade chinesa, carvão mineral	0,43	0,52
Molibdênio	Eletricidade chinesa, carvão mineral	0,01	0,84
Chumbo	Eletricidade chinesa, carvão mineral	0,01	0,69
Qualidade do Ecossistema			
Eletricidade chinesa, carvão mineral	Mercado de eletricidade chinesa de alta voltagem	3,72	Indefinido
Chumbo	Eletricidade chinesa, carvão mineral	6,6	0,69
Óxidos de nitrogênio	Eletricidade chinesa, carvão mineral	0,12	0,13
Dióxido de enxofre	Eletricidade chinesa, carvão mineral	0,04	0,13
Zinco	Eletricidade chinesa, carvão mineral	0,03	0,84

Diferente do realizado anteriormente, a adaptação não deve ser feita para este *dataset* especificamente, e sim para os conjuntos de dados de produtos que estão representando a realidade nacional por meio da exclusão dos fluxos de

eletricidade de diferentes regiões. A prática de adaptar a matriz de eletricidade nos conjuntos de dados internacionais utilizados em estudos de ACV no Brasil é comum (BAILIS et al., 2013; PEGORETTI et al., 2014; HANSEN, SILVA e KULAY, 2015; PETIT-BOIX et al., 2015; SANTOS et al., 2015; CHOMA e UGAYA, 2015).

4.3.3 Processo de produção de clínquer e cimento Portland

As variáveis de perturbação e incerteza foram avaliadas para o processo de produção de clínquer a fim de determinar quais fluxos, dos que envolvem este *dataset*, devem ser adaptados. Inicialmente, constatou-se que a produção de clínquer é bastante relevante para a área de dano de mudanças climáticas, conforme já mostrado na Figura 9 e na Tabela 11.

Os resultados de perturbação e incerteza para esta área de dano foram então consultados. A Figura 16 mostra um esquema com os fluxos relevantes.

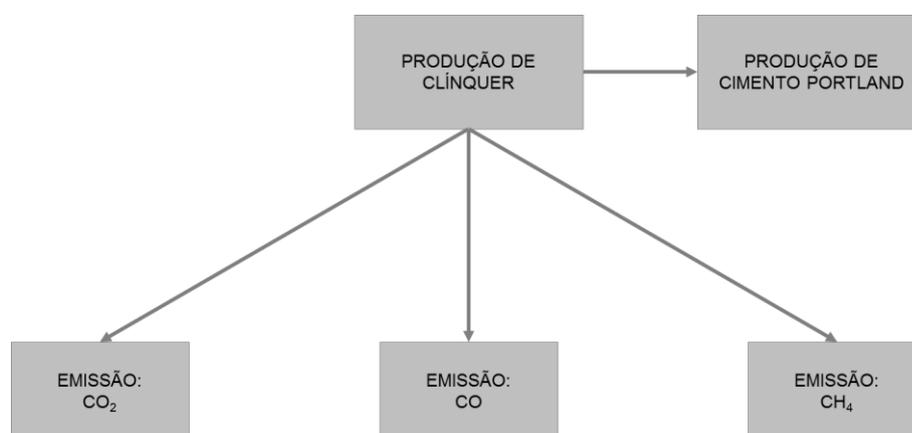


Figura 16 – Fluxos relevantes para o processo de produção de clínquer e cimento Portland.

Observando-se a Tabela 23, é possível constatar que o fluxo de entrada de clínquer no processo de produção de cimento apresenta multiplicador 7,7. Para as intervenções ambientais, a emissão de CO₂ fóssil na produção de clínquer foi o fluxo com maior multiplicador (8,9) e em menor intensidade aparecem as emissões de CO (0,008) e CH₄ (0,0007).

Tabela 23 - Resultados de perturbação e incerteza para o processo elementar de produção de clínquer

Fluxo	Processo	Perturbação (Multiplicador, %)	Incerteza (Variância)
Clínquer	Cimento	7,7	0,01
Dióxido de Carbono	Clínquer	8,9	0,02
Monóxido de Carbono	Clínquer	0,008	0,14
Metano	Clínquer	0,0007	0,14

Nota-se que os fluxos mais incertos são os que possuem menor multiplicador. Neste caso, as emissões de CO e CH₄ não afetam significativamente a propagação do impacto quando comparadas aos demais fluxos, entretanto, o dado original apresenta maior incerteza. Isto significa que este fluxo pode apresentar maior variação de acordo com as condições do processo em que ocorre, fato que é bastante relevante no âmbito da adaptação de *datasets*.

4.3.4 Processo de produção de ferro-gusa e aço

O processo de produção de ferro-gusa contribui para os impactos da área de mudanças climáticas. A Figura 17 mostra as conexões mais relevantes para este processo elementar, de acordo com os resultados de análise de perturbação.

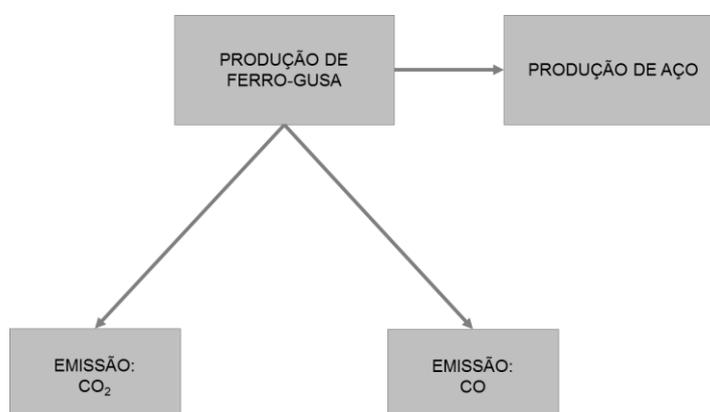


Figura 17 - Fluxos relevantes para o processo de produção de ferro-gusa e aço.

O consumo de ferro-gusa na produção de aço e as emissões de CO₂ e CO são os pontos críticos que envolvem este *dataset* e, por isso, as variáveis de perturbação e incerteza foram avaliadas (Tabela 24).

Tabela 24 - Resultados de perturbação e incerteza para o processo elementar de produção de ferro-gusa.

Fluxo	Processo	Perturbação (Multiplicador, %)	Incerteza (Variância)
Ferro-gusa	Aço	10,6%	0,04
Dióxido de Carbono	Ferro-gusa	4,7%	0,04
Monóxido de Carbono	Ferro-gusa	0,01%	0,69

O fluxo mais sensível neste caso é o consumo de ferro-gusa na produção de aço, apresentando multiplicador de 10,6%. Para as intervenções ambientais, a emissão de dióxido de carbono se mostrou mais sensível que a de monóxido, entretanto, a incerteza na emissão de CO é muito superior à dos demais fluxos. É importante que os dados nacionais para os fluxos mais sensíveis sejam encontrados e que se possível a emissão de monóxido de carbono também seja ajustada.

4.4 COMPARAÇÃO DAS CADEIAS DE PRODUÇÃO E ADAPTAÇÃO DOS DATASETS

4.4.1 Processo de produção de silagem de capim e relação com a produção de leite de vaca

A bovinocultura de leite no Brasil envolveu em 2006 aproximadamente 1,35 milhões de estabelecimentos e a produção ultrapassou 20 bilhões de litros no mesmo ano (IBGE, 2009). A variedade de condições de solo e clima e a abrangência nacional fazem com que as diferentes atividades pecuárias sejam adaptadas de acordo com as necessidades regionais, provocando diferenças nas estruturas das fazendas e na produção (DE LÉIS et al., 2015). Com isso, diferentes

sistemas de produção são encontrados no Brasil. Assis e colaboradores (2005) definiram quatro sistemas (Tabela 25), de acordo com o grau de intensificação e o nível de produtividade: sistema extensivo, semi-extensivo, intensivo a pasto e intensivo em confinamento.

Tabela 25 - Caracterização dos sistemas de produção

Sistema	Produtividade (l/ano)	Grau de intensificação	Regiões predominantes	Total de fazendas (%)	Produção de leite (%)
Extensivo	até 1200	Criados exclusivamente a pasto	Norte, Nordeste e Centro-Oeste	89,47	32,84
Semiextensivo	1200 - 2000	Criados a pasto com suplementação volumosa na época de menor crescimento de pasto	Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste	8,91	37,69
Intensivo a pasto	2000 - 4500	Criados a pasto com forrageiras de alta capacidade de suporte, com suplementação volumosa na época de menor crescimento de pasto (em alguns casos o ano todo).	Sudeste e Sul	1,56	24,85
Intensivo com confinamento	mais de 4500	Criados confinados e alimentados no cocho com forragens conservadas, como silagens e fenos	Sudeste e Sul	0,06	4,62

FONTE: Adaptado de Assis et al. (2005).

O sistema utilizado pelo maior número de fazendas é o extensivo, cuja alimentação baseia-se exclusivamente em pasto, suplementada apenas com sal comum. Em contrapartida, o sistema intensivo com confinamento é o que abrange menor número de fazendas e que menos contribui para a produção nacional de leite. O investimento em estrutura neste tipo de sistema é alto, a alimentação é de boa qualidade e há assistência técnica permanente (ASSIS et al., 2005). A produção de leite no Brasil é basicamente representada pelos dois sistemas de menor produtividade, uma vez que aproximadamente 98% das fazendas estão relacionadas aos sistemas extensivo e semiextensivo, produzindo 70% do leite nacional.

O *dataset* atualmente disponível na base de dados representa a produção de leite do Quebec, no Canadá. Dados foram coletados em 300 fazendas em nove diferentes regiões a fim de alcançar o perfil médio ambiental e socioeconômico da produção do leite no país (SAMSON et al., 2012). Considerando os dados de produção de leite apenas para o Quebec, os autores afirmam que 91% das propriedades utilizam o sistema *tie-stall* ao passo que o restante utiliza o sistema *free-stall*. De acordo com Araújo (2001), nos sistemas *tie-stall* as vacas ficam presas o dia todo e recebem 100% de sua alimentação no cocho. Além disso, possuem alta

taxa de produtividade, passando de 25 kg de leite por dia. Este sistema exige elevado investimento em infraestrutura e mão de obra especializada. No sistema *free-stall* as vacas ficam soltas em uma área cercada, sendo que parte desta área é livre para alimentação e exercícios e a outra parte é constituída por baias individuais para o descanso dos animais (ARAÚJO, 2001). Conclui-se então que os sistemas *tie-stall* podem ser associados ao sistema intensivo com confinamento, que é representativo para o Quebec, mas não retrata a maior parte da produção de leite brasileira.

O gado para abate noecoinvent é um coproduto da produção de leite, uma vez que se considera que os bezerros e as vacas descartadas são vendidos para a produção de carne. Na base de dados, a produção de carne bovina é totalmente relacionada ao gado de leite, mostrando que esta influência é bastante significativa em outros países. De acordo com De Léis (2013) esta relação não representa o Brasil, que possui um sistema independente para o gado de corte e é destaque em termos de produção mundial.

As investigações nos resultados de análise de perturbação mostraram que a silagem de capim é um processo elementar significativo para a adaptação, não só por compor a dieta do gado de leite, mas também pelo fato de o coproduto “gado para abate” estar relacionado à produção de carne bovina. Uma vez que os sistemas de produção de carne no Brasil são independentes, recomenda-se que o *dataset* de carne bovina seja construído a partir de dados coletados e representativos para o país, pois a adaptação não é pertinente neste caso.

A comparação entre a produção de leite no Brasil e no Quebec, região que representa os dados atualmente disponíveis noecoinvent, mostrou que a adaptação deve ser considerada apenas para os sistemas de produção intensivos com confinamento. A representação dos outros sistemas de produção demandaria a criação de novos conjuntos de dados. Com isso, mesmo sabendo que o sistema de produção intensivo com confinamento é responsável pela menor parcela de produção de leite no país, uma pesquisa foi realizada para encontrar informações relacionadas à dieta animal para este sistema a fim de adaptar os dados atualmente disponíveis. Vale ressaltar que apenas o sistema de produção foi considerado e variáveis como raça, idade média e peso do gado não foram levadas em conta na busca por dados regionais, em virtude da grande pluralidade da produção leiteira combinada com a dificuldade de encontrar dados de ICV nacionais.

Os trabalhos de Olszensvski (2011) e De Léis (2013) abrangem dados para a produção de leite para o sistema confinado. Ambas as autoras desenvolveram estudos de ACV contemplando dados primários dos sistemas de produção avaliados e de diferentes matérias-primas envolvidas no ciclo de vida da produção de leite. No que tange à dieta dos animais, ambos os estudos reportam o consumo de silagem de milho, farelo de soja, gérmen de milho, sal mineral, sal comum e concentrado. A silagem de capim não é consumida nestes sistemas, o que mostra que a utilização do *dataset* internacional não representa o contexto brasileiro, conduzindo à má interpretação dos resultados. Assim, as emissões da produção de silagem de capim não necessitam ser adaptadas neste caso, já que esta não é uma entrada do sistema de produção de leite.

Utilizando os dados de inventário de Olszensvski (2011) foi possível alterar o fluxo de entrada de silagem de capim dos *datasets* de produção de leite e de gado para o abate. Neste caso, o modelo do sistema da base de dados escolhido para a adaptação foi o *allocation recycled content*, a fim de comparar os resultados adaptados com os de Olszensvski (2011). O fluxo de silagem de capim foi substituído pelo de milho, visto que não há o consumo daquele componente na dieta do gado bovino. Uma vez que a autora reportou a quantidade de metano emitida no sistema avaliado, este valor também foi alterado por se considerar que faz parte do balanço de massa da dieta do gado, pois está ligado à composição da dieta alimentar. De acordo com Dong (2006), a quantidade de metano emitida depende da idade e do peso do animal e da qualidade e quantidade de ração consumida, além do tipo de trato digestivo.

Dada a relação do gado de leite descartado com o mercado de carne, considerou-se avaliar também os resultados da produção de carne vermelha a partir do *dataset* de gado adaptado.

De acordo com Olszensvski (2011) são consumidos 204,95 kg de silagem de milho para produzir 1000 kg de leite com energia corrigida. Além disso, a produção de 1 kg de leite com a energia corrigida tem como coproduto 0,004 kg de carne e é responsável pela emissão de 0,025 kg de CH₄. Os fatores de alocação econômica utilizados para calcular a quantidade de entrada de silagem e emissão de metano para cada *dataset* foram os mesmos estabelecidos no estudo em questão. Os resultados podem ser observados na Tabela 26.

Tabela 26 - Fluxos alterados nos datasets de produção de leite e de gado para o abate.

	Produção de leite de vaca (1 kg)	Gado para o abate (1 kg)
Fator de alocação	95,8%	4,2%
Silagem de milho (kg)	0,20	1,97
Emissão de CH ₄ (kg)	0,02	0,24

Alterados os fluxos de entrada e saída dos *datasets* relevantes para a adaptação, os resultados de avaliação de impacto puderam ser calculados utilizando o método IMPACT 2002+ e comparados aos resultados dos *datasets* originais. As áreas de dano avaliadas foram qualidade do ecossistema, saúde humana e mudanças climáticas, as quais foram influenciadas pelo processo elementar de silagem de capim, vide Tabela 15. A Figura 18 mostra os resultados comparativos para a produção de leite, gado para abate e carne tendo como unidade funcional comparativa 1kg de cada produto.

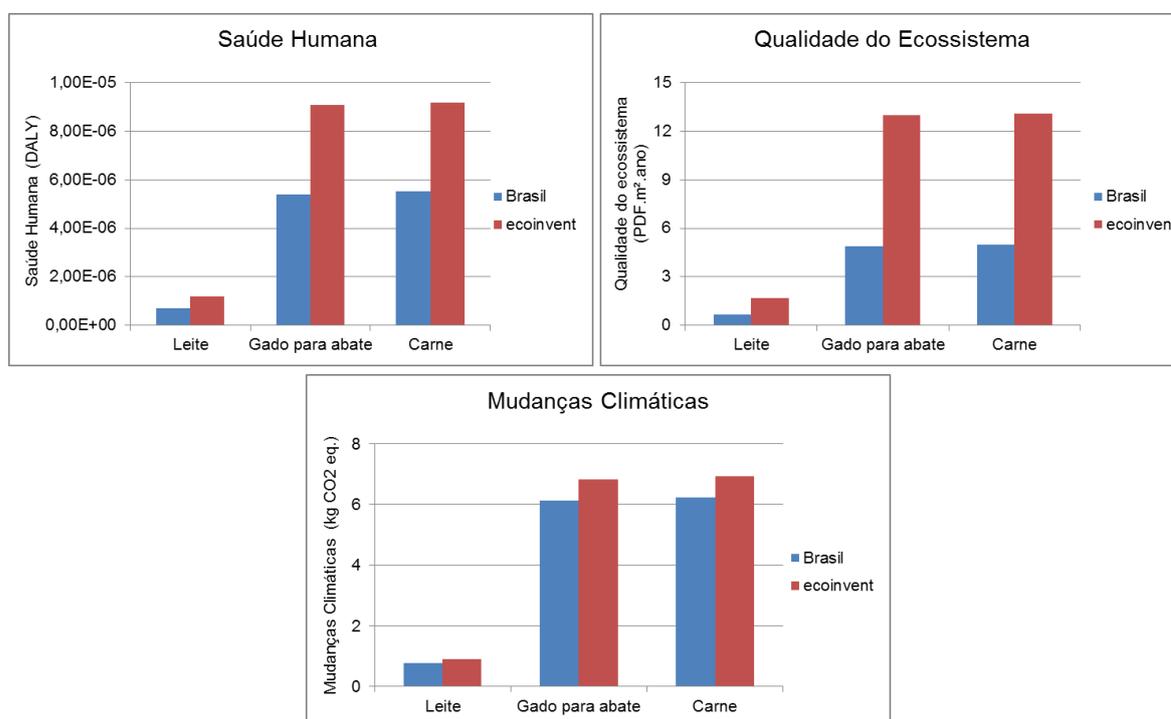


Figura 18 - Resultados comparativos de caracterização para o ciclo de vida do leite, gado para abate e carne.

É possível observar que os resultados de impacto para os *datasets* adaptados são menores do que os da base de dados para todas as áreas de dano

avaliadas. Isso pode ser explicado pelo fato de o consumo de silagem para o sistema de produção de leite abordado por Olszensvski (2011) ser aproximadamente oito vezes menor do que o reportado na base de dados. Ressalta-se que devido à grande variabilidade existente para os componentes das dietas nos sistemas de produção nacional, os dados utilizados para a adaptação neste caso são pouco representativos, uma vez que foram coletados apenas em uma propriedade.

A fim de avaliar o potencial da adaptação de *datasets*, foi realizada uma comparação dos resultados de avaliação de impacto dos dados adaptados com os resultados obtidos por Olszensvski (2011) para a produção de leite. A autora utilizou dados primários na composição do conjunto de dados representativo de tal produção e empregou o método de avaliação CML 2001 adaptado para avaliar as seguintes categorias: depleção abiótica, acidificação, eutrofização, aquecimento global, ocupação de terra e demanda cumulativa de energia. Os resultados obtidos por meio do *dataset* original do ecoinvent também foram calculados. A unidade funcional utilizada nos três casos foi 1000 kg de leite corrigido pela energia e os resultados comparativos são mostrados na Tabela 27.

Tabela 27 - Resultados comparativos de caracterização para o ciclo de vida de produção de leite utilizando o método CML 2001 adaptado.

Categoria de impacto	Unidades	Olszensvski (2011)	Este trabalho	Variação (%)	ecoinvent	Variação (%)
Depleção abiótica	kg Sb eq	1,55	1,99	28%	2,78	79%
Acidificação	kg SO ₂ eq	6,89	8,06	17%	14,57	111%
Eutrofização	kg PO ₄ eq	4,27	4,35	2%	6,38	49%
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	1232,07	1259,42	2%	1387,96	13%
Ocupação de terra	m ² a	451,98	268,99	-40%	953,56	111%
Demanda de energia	MJ	4186,51	16637,67	297%	35791,17	755%

Nota-se que para as categorias de depleção abiótica, acidificação, eutrofização e aquecimento global, os resultados obtidos por este trabalho não apresentaram grandes variações quando comparados aos resultados de Olszensvski (2011), chegando ao máximo de 28%. Ao utilizar o *dataset* original do ecoinvent, sem adaptações, os valores são mais discrepantes. Isto mostra que para estas categorias a adaptação é bastante válida, uma vez que mesmo que poucos

fluxos estejam representando a realidade nacional, os resultados dos dados adaptados não diferem muito do *dataset* composto por dados primários brasileiros.

Para a ocupação da terra, os resultados foram reduzidos em 40% quando se considera os dados adaptados. De acordo com Olszensvski (2011), os principais contribuintes para os impactos nesta categoria são o farelo de gérmen de milho e os concentrados consumidos pelas vacas e novilhas. Já para os dados adaptados, não há a entrada de gérmen de milho e o principal contribuinte para esta categoria é a produção de forragem. Neste ponto, a adaptação de *datasets* está desconsiderando fluxos importantes da produção de leite nacional, subestimando os reais impactos potenciais envolvidos no sistema do produto. Quando se compara o *dataset* original doecoinvent com os resultados de Olszensvski (2011), os resultados de ocupação da terra são 111% superiores. Isto pode ser explicado pelo consumo de silagem de capim, que contribui em aproximadamente 71% do impacto total para esta categoria. Os resultados para a demanda cumulativa de energia apresentaram maior discrepância entre os dados nacionais, adaptados e originais. Tal discrepância pode ser causada por diferentes motivos, tais como a versão utilizada do método de avaliação, o qual sofreu atualizações nos últimos anos e inclusive apresenta uma nova categoria para energia não renovável de biomassa, os fluxos mais relevantes ou as categorias para renováveis e não renováveis avaliadas. Estas incertezas fazem com que este não seja um bom indicador para a comparação neste caso. Mesmo assim, nota-se que a adaptação do *dataset* reduziu a discrepância em 458%, para esta categoria, quando se compara os dados originais com os de Olszensvski (2011). Esta avaliação é bastante útil para medir a eficiência da adaptação, mostrando que a regionalização de alguns fluxos do *dataset* pode trazer resultados satisfatórios em termos de avaliação de impactos ambientais. Para todas as categorias avaliadas o *dataset* regionalizado apresentou resultados mais próximos das condições nacionais levantadas por Olszensvski (2011) do que o *dataset* internacional que abrange a produção de leite de vaca.

É importante destacar que a metodologia para adaptação de *datasets* surgiu em busca de uma solução para mitigar o problema da falta de dados de ICVs nacionais. Contudo, para o caso da produção de leite no Brasil, estes dados já existem. Tanto o trabalho de Olszensvski (2011) quanto o trabalho de De Léis (2013) apresentam dados para diferentes sistemas de produção, inclusive para os sistemas extensivo e semiextensivo, os quais representam a maior parte da produção

nacional. Ambas as autoras coletaram dados primários da produção do leite, e também de algumas das matérias-primas, por exemplo, a silagem e o concentrado. Assim, desenvolveram estudos bastante completos de ACV envolvendo a pecuária leiteira. Em vista disso, e da complexidade da cadeia de produção em questão, recomenda-se fortemente a submissão dos dados destes trabalhos em bases de dados de ACV para que estejam disponíveis para os usuários. Conclui-se assim, que a criação de tais *datasets* é mais vantajosa que a adaptação dos mesmos, uma vez que a parte mais dispendiosa em tempo e recursos já foi realizada.

4.4.2 Processo de produção de eletricidade chinesa a partir de carvão mineral

A matriz energética chinesa depende amplamente do carvão mineral. Em 2013, esta fonte representou 74% do mix primário de energia no país (IEA, 2015). O consumo de carvão mineral foi responsável por três quartos da emissão de CO₂ de combustíveis fósseis na China em 2012 (Olivier et al., 2013).

A influência deste processo elementar nos resultados de impacto da pesquisa foi causada pelo fato de se utilizar *datasets* de região global ou RoW, os quais consideram as entradas de eletricidade de diversas regiões. A fim de mitigar esta influência, todos os produtos selecionados que compõem o vetor de demanda *f* foram adaptados usando a geração de eletricidade brasileira e a contribuição de processos foi recalculada.

Os resultados apontaram que a influência do processo de produção de eletricidade chinesa a partir de carvão mineral foi reduzida após a adaptação dos *datasets* do vetor de demanda *f* em 60% para todas as categorias avaliadas (Tabela 28).

Tabela 28 - Comparação dos resultados após reajuste do fluxo de eletricidade

Áreas de dano	Resultados de contribuição	
	Antes da adaptação	Depois da adaptação
Mudanças Climáticas (kg CO ₂ eq.)	3,95E+06	1,55E+06
Saúde Humana (DALY)	6,44E+06	2,52E+06
Qualidade do Ecossistema (PDF.m ² .yr)	3,90E+06	1,53E+06

É possível notar que mesmo que a redução da contribuição tenha sido considerável, ela não foi completamente solucionada. Isto ocorre porque a adaptação do fluxo de eletricidade foi feita apenas para os produtos que compõem o vetor f , não levando em conta os demais processos. Considera-se que a adaptação em níveis mais profundos poderia reduzir ainda mais a influência da eletricidade chinesa. Em função disso, recomenda-se que os estudos de ACV que utilizam dados secundários tenham a matriz de eletricidade regionalizada, sempre que possível.

4.4.3 Processo de produção de clínquer e cimento Portland

O clínquer é matéria prima para a produção de cimento Portland e é composto por uma mistura que normalmente contém calcário, argila, areia, minério de ferro e outros componentes em proporções definidas (ULLMANN'S, 2001). Tanto no Brasil, quanto em plantas de produção de outros países, o clínquer é gerado por meio de transformação térmica que ocorre em fornos rotativos, cuja temperatura interna é em torno de 1450°C. Existem basicamente duas rotas de obtenção de clínquer: via úmida e via seca. Na via úmida a matéria-prima é fornecida ao forno na forma de lama ou pasta, pois foi moída com a adição de água. Já na via seca, a moagem ocorre sem a adição de água e a matéria-prima é enviada ao forno na forma de pó, denominado cru ou farinha (DE PAULA, 2009). No Brasil, 98% do parque industrial utiliza a via seca para a produção do clínquer por ser mais econômica e apresentar a vantagem de ter menor consumo específico de calor (MARINGOLO, 2001). Noecoinvent, os dados referentes à produção de clínquer também se referem à via seca, uma vez que todas as fábricas na Suíça utilizam este ajuste (KELLENBERGER et al., 2007). De maneira geral, a produção de cimento Portland compreende as etapas de extração de matérias primas, britagem, homogeneização do calcário e argila, clinquerização, adição de substâncias complementares e empacotamento (ABCP, 2015).

A etapa de produção do clínquer é responsável por aproximadamente 83% da emissão de CO₂ de todo o processo de produção do cimento. Neste caso, as fontes deste poluente são a queima dos combustíveis e as reações químicas que ocorrem para a formação do clínquer (ISHAK e HASHIM, 2015). Estudos foram

desenvolvidos a fim de investigar maneiras para reduzir as emissões atmosféricas deste composto e entre as sugestões está o uso de materiais alternativos e a redução da relação clínquer/cimento (ALI, SAIDUR E HOSSAIN, 2011; BENHELAL et al., 2013; GAO et al., 2015).

A redução da quantidade de clínquer utilizada para produzir o cimento é possível, uma vez que aditivos, como escória de alto forno, cinzas volantes e materiais pozolânicos, podem ser incorporados ao processo como materiais cimentantes (WORRELL et al., 2001). A produção do cimento com adições possui vantagens econômicas, ambientais e tecnológicas (YAMAMOTO et al., 1997). De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2013) a produção de cimento Portland simples (CP I), sem adição de materiais alternativos, é bastante inferior à quantidade produzida dos demais tipos, conforme mostra a Tabela 29.

Tabela 29 - Produção anual de cimento Portland, segundo os tipos (em 1.000 toneladas)

ANO	TIPOS DE CIMENTO (1000 t)						SUBTOTAL (1000 t)	AJUSTE (1000 t)	TOTAL (1000 t)
	CP I	CP II	CP III	CP IV	CP V	Branco / White			
2008	346	33.080	8.879	5.714	3.577	86	51.682	288	51.970
2009	84	34.662	7.967	5.097	3.377	-	51.187	560	51.747
2010	88	38.474	8.345	6.686	4.211	-	57.804	1.313	59.117
2011	103	38.659	9.347	8.247	4.973	-	61.329	2.764	64.093
2012	98	39.743	10.000	9.612	5.580	-	65.033	3.776	68.809
2013	263	41.249	9.405	9.863	5.660	-	66.440	3.721	70.161

FONTE: Adaptado de SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO, 2013.

O tipo de cimento mais produzido no país é o Cimento Portland composto CP II, o qual pode variar em Z, E e F, de acordo com os materiais alternativos que o constituem. A norma NBR 11578 (ABNT, 1991) apresenta os limites de composição deste cimento, os quais podem ser visualizados na Tabela 30.

Tabela 30 - Teores dos componentes do Cimento Portland composto

Sigla	Classe de resistência	Componentes (% em massa)			
		Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CP II-E	25 32 40	94 - 56	6 - 34	-	0 - 10
CP II-Z	25 32 40	94 - 76	-	6-14	0-10
CP II-F	25 32 40	94 - 90	-	-	6 - 10

FONTE: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991.

A relação clínquer/cimento varia de acordo com a disponibilidade e a qualidade dos materiais aditivos. Alguns estudos mostram a variação desta relação de acordo com os países em que o cimento é produzido (WBCSD, 2013 e WORRELL, 2001), conforme se pode observar na Tabela 31.

Tabela 31 - Relação clínquer/cimento para diferentes países ao longo do tempo

País/Ano	Worrell et al., 2001	GNR PROJECT (WBCSD/CSI) - 2015										
	1994	1990	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Alemanha	79%	82%	78%	74%	72%	68%	68%	69%	68%	66%	70%	70%
Brasil	77%	80%	74%	67%	68%	70%	69%	69%	69%	68%	67%	67%
Canadá	88%	91%	88%	85%	85%	85%	84%	84%	83%	83%	78%	75%
China	83%	80%	84%	75%	76%	75%	73%	72%	73%	72%	72%	72%
Egito	99%	97%	90%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	89%	88%
Espanha	81%	81%	81%	77%	77%	77%	76%	77%	79%	79%	80%	80%
Estados Unidos	88%	90%	86%	84%	83%	84%	85%	85%	83%	83%	84%	84%
França	74%	74%	75%	76%	76%	76%	75%	74%	74%	73%	73%	74%
Índia	89%	86%	85%	78%	75%	73%	72%	72%	71%	71%	71%	71%
Itália	80%	71%	74%	74%	73%	74%	74%	74%	74%	75%	74%	75%
Marrocos	85%	76%	74%	73%	72%	71%	70%	71%	71%	71%	71%	70%
Polônia	82%	83%	79%	76%	75%	73%	72%	72%	73%	73%	73%	74%
Tailândia	90%	85%	85%	81%	82%	82%	81%	81%	81%	80%	80%	79%

FONTE: Adaptado de Worrell et al., 2001 e GNR PROJECT - WBCSD, 2013.

Os dados apresentados na Tabela 31 representam as porcentagens mássicas de clínquer presente na composição do cimento. Nota-se que no Brasil, a relação clínquer/cimento é a mais baixa para os anos de 2005, 2006, 2012 e 2013

em comparação aos demais países apresentados na tabela. No período de 2007 a 2011 a Alemanha foi o país que apresentou menor relação clínquer/cimento, e o Brasil ocupou o segundo lugar. É possível afirmar que os dados de Worrell et al. (2001) para o ano de 1994 condizem com a série histórica apresentada pela outra fonte, apresentando maior divergência apenas para o Marrocos, cujos valores para o ano de 1990 e 2000 são aproximadamente 10% menores do que o informado por tais autores para o ano de 1994.

A *Cement Sustainability Initiative* (CSI) da *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) é um esforço global de 24 produtores com operações em mais de cem países a fim de buscar o desenvolvimento sustentável na produção do cimento. O projeto *Getting the Numbers Right* buscou desenvolver uma base de dados de informações sobre desempenho de energia e CO₂ da indústria global de cimento. Atualmente, ela apresenta cobertura temporal de dados até o ano de 2013, que correspondem a 941 instalações individuais e a 865 milhões de toneladas de cimento, representando 21% da produção global deste material. Em 2012, a versão 3 do protocolo de coleta de dados passou a ser aplicada e novos índices foram criados. Entre eles está o fator de relação clínquer/cimento (eq.), o qual considera que toda a quantidade de clínquer produzida na instalação e/ou comprada foi consumida (WBCSD, 2011). Com isso, novas proporções foram obtidas para o ano de 2012 e 2013, conforme exibido na Tabela 32. Os valores de clínquer/cimento (eq.) também são representados em porcentagem mássica e são relativamente maiores que os fatores mostrados na Tabela 31, uma vez que se considera que todo o clínquer produzido foi utilizado para formar o cimento Portland. É possível afirmar que, também nesta ocasião, o Brasil foi o país que apresentou os menores consumos de clínquer para a produção do cimento.

De acordo com a WBCSD (2013), os dados para o Brasil representam 77% da produção nacional de cimento, o que do ponto de vista da ACV é bastante relevante. O valor divulgado para a relação clínquer/cimento, entretanto, equivale à média de todos os tipos de cimento produzidos no país e não apenas a produção do CP II, ponto de estudo deste trabalho.

Tabela 32 - Relação clínquer/cimento (eq.)

País/Ano	Relação clínquer/cimento (eq.)	
	2012	2013
Alemanha	71%	72%
Brasil	68%	69%
Canadá	90%	89%
China	74%	74%
Egito	89%	88%
Espanha	79%	79%
Estados Unidos	91%	91%
França	74%	75%
Índia	71%	71%
Itália	74%	74%
Marrocos	71%	70%
Polônia	72%	73%
Tailândia	82%	83%

FONTE: Adaptado de GNR PROJECT (WBCSD/CSI), 2013.

Uma vez que os dados do WBCSD (2013) não apresentam transparência adequada, embora sejam representativos, buscou-se encontrar a relação clínquer/cimento em outras referências bibliográficas e por meio de contato com especialistas da área. A busca por dados de processo, contudo, não foi bem sucedida, visto que os mesmos são confidenciais e variam muito de acordo com a disponibilidade e o preço dos materiais alternativos. A fim de mitigar a ausência dos dados, alguns cenários foram propostos baseando-se na faixa de composição estabelecida pela norma NBR 11578. Com isso, três *datasets* novos foram elaborados para a produção de cimento Portland composto, cada um representando um tipo de CP II. O valor adotado para a relação clínquer/cimento foi a média dos limites mostrados na Tabela 30. Este mesmo procedimento foi adotado por Guerreiro (2014) em seu estudo sobre a Avaliação do Ciclo de Vida dos cimentos de produção mais significativa no Brasil. A título de comparação, os dados propostos pelo projeto do WBCSD (2013) também foram avaliados. Os componentes dos *datasets* e suas frações mássicas podem ser observados na Tabela 33.

Tabela 33 - Composição dos *datasets* para a produção de cimento Portland

Tipos	Componentes (kg/kg de cimento)				
	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material Pozolânico	Material carbonático	Outros
CP II-E	75	20	-	5	-
CP II-Z	85	-	10	5	-
CP II-F	92	-	-	8	-
CP CSI	72	13	3	7	5

FONTE: Autoria própria.

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), geralmente adiciona-se 3% de gesso (sulfato de cálcio) para 97% de clínquer. Esta relação foi considerada no presente estudo para quantificar este fluxo em todos os *datasets* criados, exceto para o CP CSI, no qual foi considerado 69% de clínquer e 3% de gesso.

O *dataset* base doecoinvent utilizado para gerar os resultados de contribuição dos processos no item 4.1 representa a produção do cimento Portland composto tipo CEM II/A. De acordo com Boesch and Hellweg (2010), o cimento de tipo CEM II pode ser constituído por materiais alternativos em uma faixa que varia de 6 a 35%. Na base de dados, o cimento CEM II é dividido em A e B, os quais representam adições de 6 a 20% e 21 a 35%, respectivamente. Os resultados de impacto do CP II-Z e CP II-F foram comparados com o CEM II/A, com até 20% de adições enquanto os CP II-E e CP CSI foram comparados ao CEM II/B.

De acordo com a ABNT (1990), o cimento pozolânico pode ser constituído por diferentes materiais classificados como pozolanas naturais e artificiais. Dentre as pozolanas artificiais estão as argilas calcinadas, as cinzas volantes e demais materiais como a microssilica ou rejeitos silicoaluminosos. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), a sílica ativa que sai das chaminés das fundições de ferro-silício já tem seu uso consagrado como material pozolânico no Brasil, bem como em países mais evoluídos tecnologicamente. Uma vez que um fluxo específico referente ao material pozolânico não foi encontrado na base de dados, considerou-se como entrada nos *datasets* do CP II-Z e CP CSI a entrada de argila calcinada, classificada pela ABNT como uma das pozolanas artificiais.

No que tange às emissões provenientes da produção de clínquer, a análise das variáveis de perturbação e incerteza indicou que os fluxos de saída de CO e

CH₄ devem ser observados com cuidado, uma vez que apresentam maior variação. No entanto, dados para a emissão destes compostos em processos nacionais não foram encontrados, visto que estas saídas ocorrem em menor quantidade e apresentam menor relevância quando comparadas à emissão de CO₂.

De acordo com a WBSCD (2009), as emissões de CO₂ dos fornos de clínquer são originadas pelo processo de calcinação e pela queima dos combustíveis. O processo de produção de clínquer é o mesmo para todos os tipos de cimento em questão, e por isso, os dados referentes à emissão de CO₂ publicados pelo WBSCD (2013) podem ser utilizados. Analogamente à relação clínquer/cimento, estes dados foram obtidos para diferentes anos por meio de cálculos auxiliados por parâmetros coletados nas empresas participantes. A Tabela 34 mostra as emissões de CO₂ por tonelada de clínquer para diferentes regiões em diferentes anos.

Tabela 34 - Emissões de CO₂ por tonelada de clínquer para diferentes regiões ao longo do tempo

Região	Emissões de CO ₂ (kg de CO ₂ /t de clínquer)				
	1990	2000	2010	2012	2013
África	917	851	820	810	806
Ásia (ex. China, Índia, CIS) + Oceania	856	852	842	840	837
Brasil	871	839	862	852	863
América Central	849	853	870	857	864
China	1068	951	870	853	850
CIS	948	926	983	922	903
Europa	907	879	854	839	830
Índia	932	840	838	816	824
Oriente Médio	889	856	851	847	851
América do Norte	1007	973	903	879	876
América do Sul (ex. Brasil)	903	857	859	835	819

FONTE: Adaptado de WBSCD (2013)

Nota-se que o melhor desempenho do Brasil em termos de emissões por tonelada de clínquer ocorreu no ano 2000, sendo naquele ano o país que menos emitiu CO₂ para a atmosfera. Em 2013, houve a emissão de 863 kg de CO₂ por tonelada de clínquer produzido. Este valor foi usado para compor o *dataset* de produção de clínquer no Brasil. Além deste dado, as entradas de eletricidade de

diferentes regiões foram excluídas e considerou-se a entrada apenas de eletricidade brasileira.

Atualmente na base de dados, a quantidade de CO₂ fóssil emitido é aproximadamente 3% menor do que o valor informado acerca das emissões da produção brasileira em 2013 e bastante semelhante ao resultado brasileiro do ano 2000. As fontes de emissão deste composto no *dataset* atual da base de dados também são provenientes da calcinação e da queima de combustíveis. De acordo com a WBCSD (2011), a emissão de CO₂ por tonelada de clínquer na calcinação é consideravelmente estável, uma vez que é proporcional ao conteúdo de cal do clínquer, o qual varia pouco em relação ao tempo ou a diferentes plantas de produção. Então, a diferença nos valores da base de dados e do WBCSD (2013) pode ser causada na etapa de queima dos combustíveis. Devido ao fato de a variação ser pouco expressiva, investigações mais profundas acerca de quais combustíveis estariam causando tal diferença não foram realizadas.

Tendo os *datasets* de clínquer e cimento construídos, os resultados de impacto para a área de dano de mudanças climáticas foram obtidos. A relação clínquer/cimento novamente demonstrou grande influência nos resultados, como se pode notar na Figura 19.

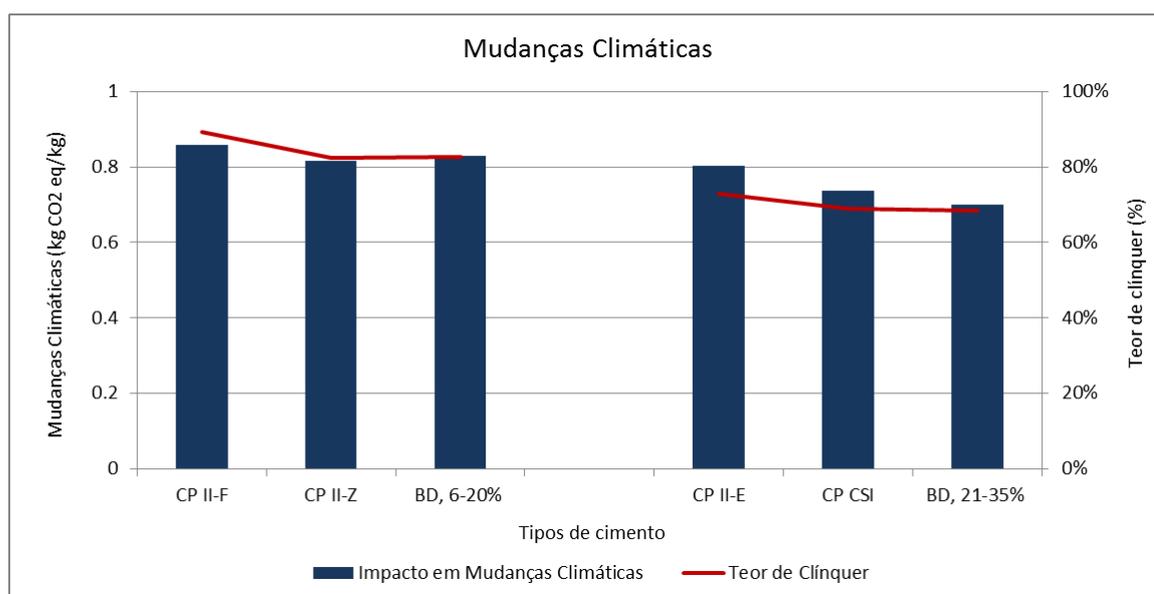


Figura 19 - Resultado de Impacto para Mudanças Climáticas para diferentes tipos de cimento

Para os cimentos enquadrados com 6 a 20% de teor de materiais alternativos, é possível observar que o CP II-Z provoca menor impacto à área de dano de mudanças climáticas, mesmo tendo maior fator de emissão de CO₂ na produção do clínquer quando se compara com o *dataset* atual da base de dados. A justificativa se baseia no teor de clínquer, uma vez que entre os três tipos o CP II-Z tem maior teor de componentes alternativos. O mesmo pode ser concluído para os cimentos com teor de clínquer entre 21 e 35%. Neste caso, o cimento apresentado na base de dados é o que possui o menor teor de clínquer e também o que apresenta menor resultado de impacto. Ao se comparar os três tipos de cimento Portland produzido no Brasil, o resultado de impacto aumenta proporcionalmente ao teor de clínquer. A mesma proporção nos resultados foi obtida em outros estudos da área envolvendo a produção dos Cimentos Portland compostos (GUERREIRO, 2014; OLIVEIRA et al. 2014). Oliveira et al. (2014) afirmam que devido ao fato de as faixas de teores de clínquer serem grandes pode haver sobreposição dos teores para diferentes tipos de cimento. Isto significa que as mesmas quantidades de clínquer podem levar às mesmas emissões de CO₂. Os autores ressaltam que a decisão acerca da escolha ambiental de um dos tipos de cimento somente deve ser feita sabendo-se qual o teor de clínquer real utilizado no cimento. Este dado é bastante difícil de obter, seja por flutuações na disponibilidade dos materiais alternativos ou por confidencialidade industrial, o que justifica novamente o fato de a média ter sido utilizada neste trabalho. Além disso, as quantidades de produção de cada um dos três tipos de CP II também não foram encontradas, o que impediu a obtenção de um único *dataset* representando a produção brasileira do Cimento Portland composto.

4.4.4 Processo de produção de ferro-gusa e aço

Duas rotas tecnológicas principais representam a produção de aço, a por usinas integradas e por usinas semi-integradas. Nas usinas integradas tem-se a produção de aço a partir de minério de ferro, enquanto nas semi-integradas a produção tem como matéria-prima a sucata. A produção a partir de minério de ferro pode ocorrer em altos fornos produzindo ferro-gusa, padrão predominante no setor,

ou em módulos de redução direta que são mais difundidos na Índia e no Oriente Médio e produzem o ferro diretamente reduzido. O processo de produção de aço a partir de sucata é mais compacto e não necessita de equipamentos de redução, pois se inicia na aciaria elétrica (DE PAULA, 2012). De acordo com a *World Steel Association* (WSA, 2014), 72% da produção mundial de aço foi originada pelo processo de aciarias básicas a oxigênio, demonstrando a expressividade desta técnica perante as demais.

O inventário do ciclo de vida da produção nacional de aço já foi avaliado por Ugaya e Coelho (2006). Os dados utilizados pelas autoras são de 2004 e foram coletados em diferentes siderúrgicas nacionais. Embora os dados sejam primários e representativos da produção nacional, encontram-se agregados e relacionados à produção do aço bruto, impossibilitando a sua aplicação para a produção de ferro-gusa.

No que tange à produção de ferro-gusa, o Brasil possui a particularidade de usar como agente redutor o carvão vegetal em algumas de suas usinas. Apesar de as usinas integradas também possuírem altos-fornos a carvão vegetal, a maior parcela do ferro-gusa produzido a partir deste insumo é originada por usinas independentes. Estes produtores, denominados “guseiros”, são responsáveis pela produção apenas do ferro-gusa, sem as etapas de produção de aço a jusante (DE PAULA, 2012; DE PAULA, 2014). O Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (SINDIFER, 2014) publicou em seu anuário estatístico a quantidade produzida de ferro-gusa no Brasil de acordo com a fonte de produção (Figura 20).

A maior parcela do ferro-gusa produzido no país é originada nas usinas integradas tendo como agente redutor o coque, representando aproximadamente 77% da produção total em 2014. Considerando a produção a partir de carvão vegetal, as usinas integradas são pouco expressivas, sendo os produtores independentes responsáveis pela maior quantidade produzida de ferro-gusa a partir deste insumo. Ainda de acordo com o SINDIFER (2014), o estado de Minas Gerais representou em média 56% da produção do ferro-gusa independente entre 2003 e 2014, seguido pelos polos de Carajás, Espírito Santo e Mato Grosso do Sul com 35%, 4% e 5%, respectivamente.

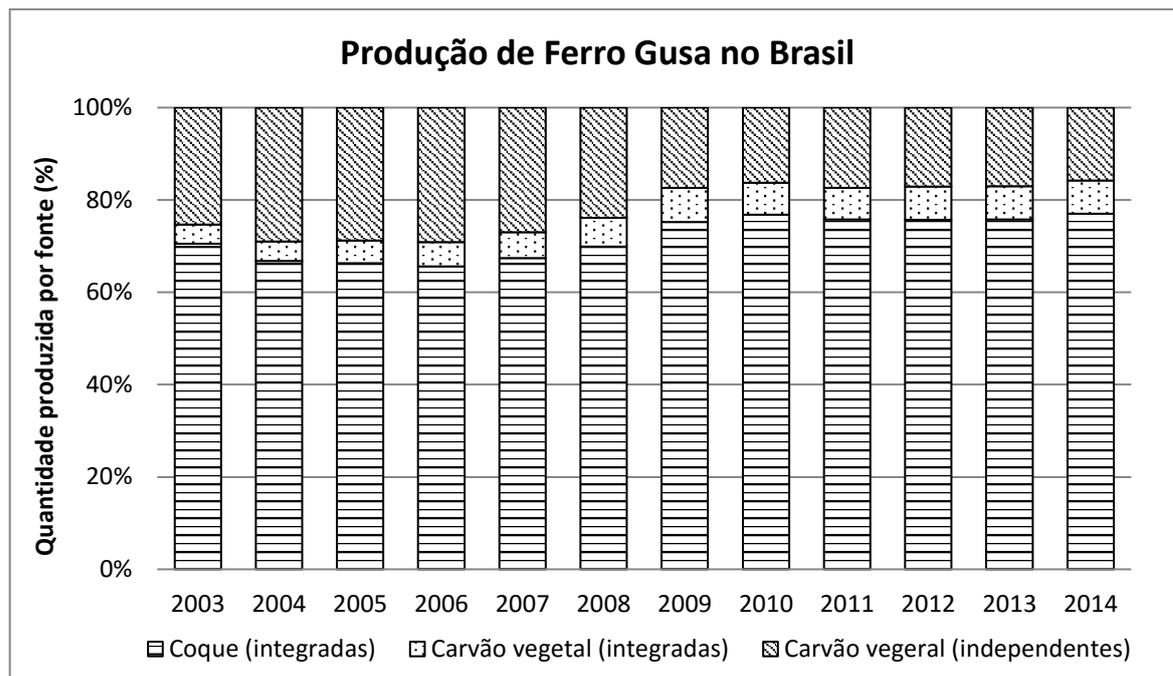


Figura 20 - Produção de ferro-gusa no Brasil de acordo com a fonte produtora.
 FONTE: Adaptado de SINDIFER (2014).

De acordo com Malard (2009), as diferenças entre as propriedades do carvão vegetal e do coque provocam alterações nos projetos dos altos-fornos. Devido ao fato de este produto não suportar altas pressões, o tamanho dos fornos é limitado. A capacidade dos altos-fornos a coque pode chegar até 10.000 ton/dia, ao passo que os fornos a carvão vegetal operam com capacidade bastante inferior, não chegando a 10% da produtividade diária dos fornos a coque (BRAGA, 1979). As exigências acerca da carga metálica também são diferentes quando se compara os dois agentes redutores. Para o bom funcionamento dos fornos a coque, é necessário que a carga metálica seja preparada em forma de sinter ou pelotas. Já para os fornos a carvão vegetal, o minério de ferro granulado pode ser utilizado sem prejudicar a eficiência da operação (MALARD, 2009).

Devido ao fato de a utilização de carvão vegetal ser quase que uma exclusividade brasileira, o *dataset* atual doecoinvent correspondente à produção de ferro-gusa foi construído tendo como base a produção em alto-forno a partir de coque. Além da etapa de produção do ferro-gusa, o conjunto de dados ainda contempla o aquecimento do ar alimentado ao forno e a limpeza do Gás de Alto-Forno (GAF) (CLASSEN et al., 2009).

Considerando as duas possíveis fontes de carbono na produção do ferro-gusa nacional, dois conjuntos de dados diferentes foram avaliados, um para a entrada de coque e outro para o carvão vegetal, baseando-se em diferentes cenários:

- 1) Adaptação apenas dos fluxos de emissão de CO e CO₂ para a produção via coque e via carvão vegetal, considerando neste caso a alteração do agente redutor;
- 2) Adaptação dos demais fluxos dos *datasets* para os quais os dados se encontram disponíveis.

O cenário 1 foi considerado com base nos resultados de análise de perturbação, que determinaram a importância das emissões de monóxido e dióxido de carbono para a avaliação dos impactos da produção de ferro-gusa. A fim de analisar as diferenças causadas pelos demais fluxos nos resultados de impacto, o cenário 2 foi considerado para as duas rotas de produção.

Os dados para a rota via carvão vegetal foram obtidos no trabalho de Malard (2009), que avaliou o setor de siderurgia não integrada no estado de Minas Gerais. De acordo com o autor, o gás de alto-forno é tratado e posteriormente queimado em tochas ou em regeneradores que promovem o aquecimento da corrente de ar do alto-forno. As emissões do processo de produção de ferro-gusa são majoritariamente provenientes da queima deste gás.

Analogamente, para a produção via coque as emissões de CO e CO₂ foram consideradas como sendo provenientes da queima do gás de alto forno. Neste caso, os dados para a adaptação do *dataset* foram obtidos no trabalho de Mosckem (2010), que avaliou o emprego de materiais alternativos no alto forno da uma usina siderúrgica integrada.

A partir da composição do GAF informada por Malard (2009) apud. Jacomino (2002) e Mosckem (2010) (Tabela 35) foi possível calcular a quantidade de carbono contida na corrente de saída de topo do alto forno.

Tabela 35 - Composição do gás de alto forno antes da queima

Componente	Fração volumétrica (%)	
	Carvão vegetal	Coque
CO	20,31	23,22
CO ₂	21,36	23,6
H ₂	4,37	4,14
CH ₄	1,98	0
N ₂	51,98	49,04

FONTE: Adaptado de Malard (2009) *apud*. Jacomino (2002) e Mosckem (2010)

Considerando que a densidade do gás é 1,25 kg/m³, o conteúdo de carbono calculado para a composição estabelecida acima para a rota via carvão vegetal foi de 218,04 g de C/Nm³ e para a rota via coque foi de 229,34 g de C/Nm³ de gás. Na produção de um quilograma de ferro-gusa via carvão vegetal são formados 2Nm³ de GAF (Malard, 2009). Já para a produção via coque, são formados 1,47Nm³/kg de gusa produzido. De acordo com Sablowski (2008), 50% do gás produzido é reutilizado para aquecer o ar e o restante é encaminhado para queima em tochas. As emissões atmosféricas foram então consideradas apenas para a queima do fluxo reciclado, já que a parte enviada para as tochas não está dentro da fronteira deste *dataset*.

Para o cenário 1, considerou-se que são emitidos apenas CO e CO₂, em relação ao elemento carbono, na queima do GAF. O cálculo foi baseado na proporção entre a quantidade de carbono destes dois componentes nas emissões do conjunto de dados atualmente disponível (Tabela 36).

Tabela 36 - Cálculo das emissões de CO e CO₂ na produção de ferro-gusa– cenário 1

Composto	Porcentagem de C em relação ao total	Carvão Vegetal		Coque	
		Quantidade de C após queima (g/Nm ³)	Emissão (g/kg de ferro-gusa)	Quantidade de C após queima (g/Nm ³)	Emissão (g/kg de ferro-gusa)
CO	0,25%	0,54	1,2580	0,57	0,9703
CO ₂	99,75%	217,50	796,94	228,77	614,69

Esta proporção indica que 99,75% do carbono se torna CO₂, enquanto que apenas 0,25% é responsável pela formação do CO, quando se considera apenas estes dois componentes. Assim, para a produção de 1kg de ferro-gusa a partir de

carvão vegetal são emitidos 796,94 g de dióxido de carbono e 1,258 g de monóxido. Já para a produção via coque, a emissão de CO₂ é de 614,69 g e a emissão de CO é de 0,9703 g para cada quilograma de ferro-gusa. Além destes fluxos, o agente redutor também foi alterado na composição do *dataset* via carvão vegetal. A quantidade de carvão consumido no processo foi de 2,74 m³/kg de ferro-gusa (Malard, 2009).

Já para o cenário 2, os demais fluxos do *dataset* foram adaptados para os quais os dados estavam disponíveis. As emissões provenientes da queima do gás de alto-forno foram consideradas de maneira mais completa, tendo como base os dados atualmente disponíveis noecoinvent referentes ao tratamento deste gás para o Brasil. O *dataset* utilizado como base foi o “*treatment of blast furnace gas, in power plant, [BR]*”. Assim, além das emissões de CO e CO₂, diferentes compostos foram considerados, respeitando o balanço de carbono. A Tabela 37 mostra todos os fluxos que foram adaptados no cenário 2, tanto para a produção via carvão vegetal quanto para a produção via coque, bem como as fontes dos dados. Os demais fluxos do *dataset* original foram extrapolados sem adaptações, salvo para o fluxo de gás natural cuja região foi estabelecida como sendo apenas *Rest of the World* (RoW), excluindo a entrada deste insumo originada de diferentes regiões.

Tabela 37 - Fluxos adaptados para o cenário 2

Fluxos adaptados	Fonte dos dados	
	Carvão vegetal	Coque
	<i>Entradas</i>	
Carvão vegetal	Malard (2009)	-
Coque	-	Mosckem (2010)
Carvão mineral	-	Mosckem (2010)
Pellets	-	Mosckem (2010)
Sinter	-	Mosckem (2010)
Sucata de aço	-	Mosckem (2010)
Sucata de ferro	-	Mosckem (2010)
Calcário	Susaki (2008). A quantidade informada de entrada de quartzito pelo autor também foi considerada como calcário.	De acordo com Mosckem (2010), é utilizado quartz no alto-forno. Em virtude de este fluxo não estar disponível na base de dados, foi considerada a inserção de calcário.
Dolomita	Susaki (2008)	-
Minério de ferro	Malard (2009)	Mosckem (2010)
Água	Malard (2009)	-
	<i>Saídas</i>	
Dióxido de enxofre	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Material particulado, <2.5 um	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Monóxido de carbono	Balanco de carbono	Balanco de carbono
Dióxido de carbono	Balanco de carbono	Balanco de carbono
Óxidos de nitrogênio	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Água para o ar	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Água para a água	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Acenafteno	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Acetaldeido	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Ácido acético	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Benzeno	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Benzo(a)pireno	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Butano	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Monoxido de dinitrogênio	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Etano	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Formaldeído	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Hexano	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Metano	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Pentano	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Propano	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Ácido propiônico	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Tolueno	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF	Dataset do ecoinvent para a queima do GAF
Lama de alto forno	Malard (2009)	Calculado a partir do dado de poeira informado por Mosckem (2010). Foi considerado que a poeira representa a massa de 91,4% da lama, baseado no dataset global de produção de ferro-gusa.
Escória de alto forno	Malard (2009)	Mosckem (2010)
Gás de alto forno	Malard (2009)	Mosckem (2010)

Devido ao fato de considerar as emissões de maneira mais completa, a quantidade emitida de monóxido e dióxido de carbono foi menor para o cenário 2. Novamente, o cálculo das emissões desses dois compostos foi baseado no balanço de carbono. A Tabela 38 mostra a quantidade de carbono dedicada à emissão dos diferentes compostos para o cenário 2.

Tabela 38 - Cálculo das emissões de CO e CO₂ na produção de ferro-gusa– cenário 2

Composto	Carvão Vegetal		Coque	
	Quantidade de C após queima (g/Nm ³)	Emissão (g/kg de ferro-gusa)	Quantidade de C após queima (g/Nm ³)	Emissão (g/kg de ferro-gusa)
CO	0,54	1,2579	0,57	0,9702
CO ₂	217,48	796,88	228,75	614,64
Demais compostos	0,02	0,02	0,02	0,015

A quantidade emitida para os demais compostos que possuem carbono não afetou significativamente as emissões de CO e CO₂ quando se comparam os cenários 1 e 2. Tanto para a produção via carvão vegetal quanto para a produção via coque, as emissões de monóxido e dióxido de carbono foram reduzidas em menos de 0,01% para o cenário 2, o qual considera que mais compostos são emitidos após a queima do GAF.

A avaliação de impacto para a área de dano de mudanças climáticas foi calculada para ambos os cenários e comparada com o *dataset* atual de produção de ferro-gusa da base de dados, versão 3.1 utilizando o modelo do sistema *recycled content* (Figura 21).

Dentre os cenários avaliados, a produção via coque para o cenário 2 foi a que apresentou melhores resultados ambientais para mudanças climáticas. Em ambos os casos avaliados, a adaptação de mais fluxos do *dataset* (cenário 2) proporcionou a redução dos impactos ambientais para esta área de dano quando se compara com os resultados do cenário 1 para a mesma rota. Para o caso da produção via carvão vegetal, a redução nos resultados de impacto entre os cenários 1 e 2 foi de 18%, ao passo que para o coque foi de aproximadamente 5%. Confrontando os resultados obtidos pelo *dataset* atual da base de dados, apenas a rota via carvão vegetal para o cenário 1 apresentou impacto mais elevado. Isto se

deve ao fato de o agente redutor coque ter sido alterado pelo carvão vegetal, fluxo responsável pelo aumento no impacto para esta área de dano. Ao alterar os demais fluxos, a carga metálica utilizada para a produção via carvão vegetal foi modificada, não considerando a entrada de sinter e de pellets, o que provocou os resultados de impacto inferiores para o cenário 2 desta mesma rota.

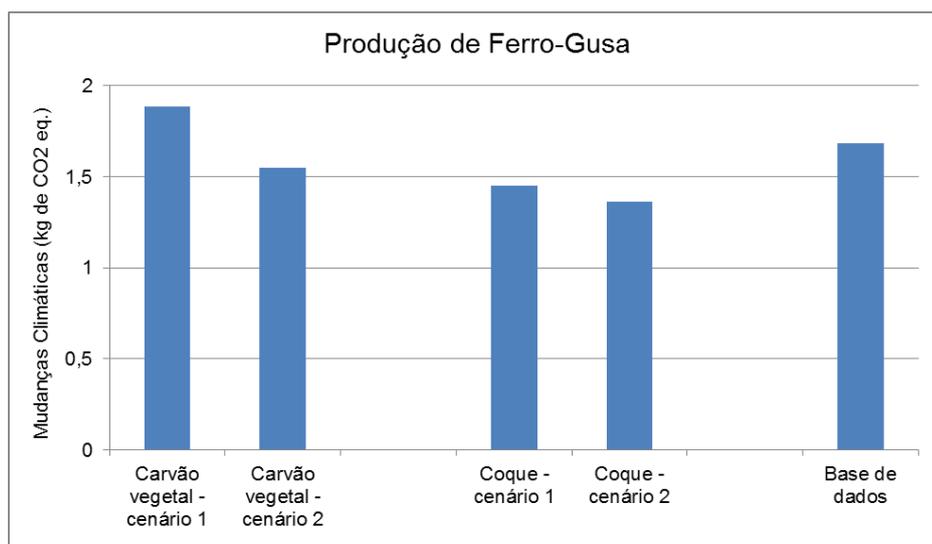


Figura 21- Resultados de avaliação de impacto de mudanças climáticas para a produção de ferro-gusa

Ressalta-se que neste caso as emissões de monóxido e dióxido de carbono, bem como dos demais compostos considerados no cenário 2, foram consideradas como emissões fósseis mesmo na rota via carvão vegetal. Esta consideração foi feita uma vez que no Brasil grande parte do carvão utilizado nas usinas independentes é proveniente de florestas nativas. De acordo com o levantamento realizado por Malard (2009), aproximadamente 40% do carvão vegetal utilizado nas empresas foi originado em florestas nativas. De acordo com Werner e colaboradores (2007), há grande incerteza nos dados referentes à absorção e emissão de carbono no *dataset* de produção de carvão vegetal atualmente contido na base de dados. Os autores ainda afirmam que para países em desenvolvimento que produzem carvão vegetal de florestas nativas, as emissões não podem ser consideradas como carbono neutro. Por isso, optou-se por avaliar os resultados tendo como base o pior caso, que é a emissão de carbono fóssil.

A título de comparação uma análise de sensibilidade foi realizada considerando as emissões de monóxido e dióxido de carbono não fóssil para a produção via carvão vegetal (Figura 22).

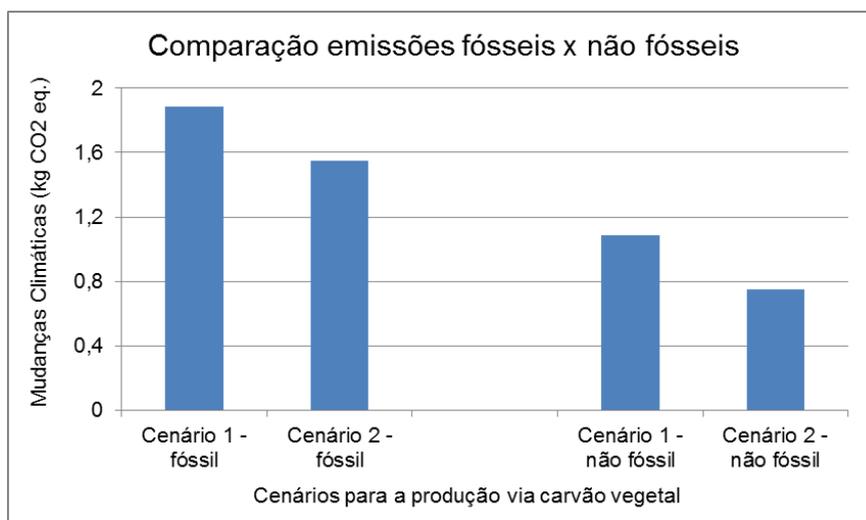


Figura 22 - Análise de sensibilidade entre as emissões fósseis e não fósseis para a rota via carvão vegetal

Se as emissões forem consideradas como não fósseis, os resultados de impacto de mudanças climáticas para a rota via carvão vegetal se tornam menores que aqueles obtidos pela utilização de coque. Isto justifica os investimentos da indústria siderúrgica na produção de ferro-gusa utilizando biomassa como agente redutor a fim de reduzir as emissões de CO₂ para a atmosfera por meio do estoque de carbono gerado nas florestas (DE PAULA, 2014).

O consumo de ferro-gusa para a produção de aço no Brasil, reportado pelo Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 2008), foi de 0,829 t/t de aço para o ano de 2008. Três *datasets* diferentes foram elaborados, considerando a entrada de ferro-gusa produzido via carvão vegetal, para emissões de carbono fóssil e não fóssil, e via coque para o cenário 2. Os fluxos de entrada de eletricidade de diversas regiões foram excluídos, mantendo apenas a entrada de eletricidade brasileira e o valor utilizado foi alterado para a soma de todas as regiões. Os resultados de avaliação de impacto obtidos foram comparados com os do *dataset* de produção de aço atualmente contido noecoinvent (Figura 23).

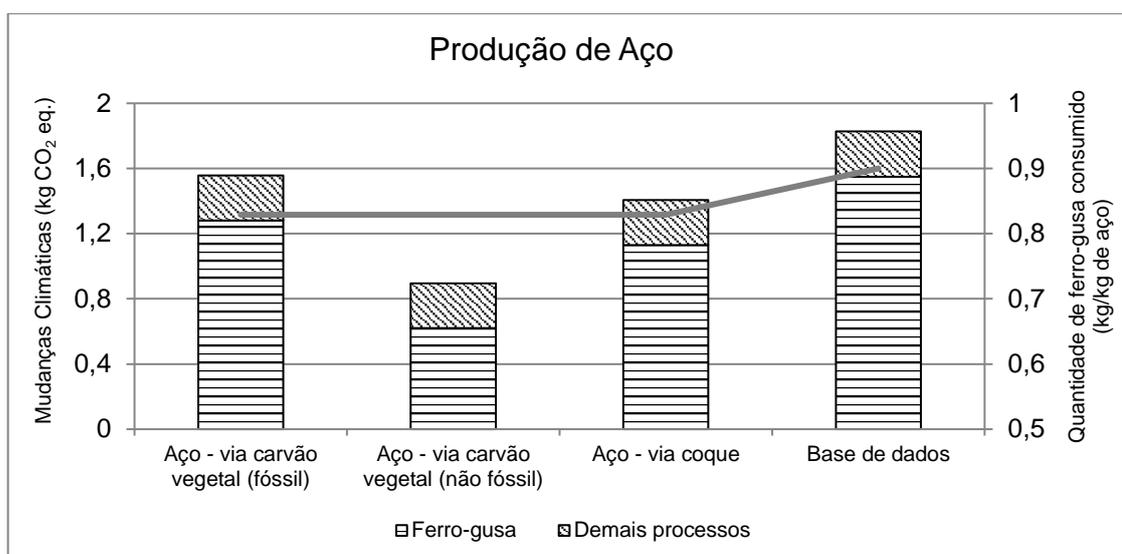


Figura 23 - Produção de Aço considerando a entrada de ferro-gusa obtido por diferentes rotas

A produção de aço tendo como matéria-prima o ferro-gusa a partir de carvão vegetal de florestas plantadas se mostrou mais vantajosa ambientalmente, para a área de dano de mudanças climáticas, uma vez que os impactos foram reduzidos em mais de 50% ao se comparar com o *dataset* global.

Na Figura 23 é possível observar que, apesar de os três primeiros casos consumirem a mesma quantidade de ferro-gusa (linha vermelha), o impacto causado, representado pela barra, é diferente. Isso porque, os impactos totais da produção de aço são fortemente influenciados pela etapa de produção de gusa, a qual foi responsável por mais de 70% dos impactos totais para esses três casos. O mesmo comportamento é observado no processo de produção de aço da base de dados que apresenta 85% da responsabilidade do impacto atribuída ao fluxo de ferro-gusa. Em função disso, sabe-se que o agente redutor utilizado para a produção de ferro-gusa, influencia significativamente o impacto final da produção de aço.

Considerando o aço produzido via carvão vegetal fóssil, os impactos para esta área de dano foram maiores que os da produção via coque, mostrando que há uma desvantagem ambiental na utilização da madeira nativa. Sonter e colaboradores (2015) afirmam que a emissão de CO₂ da produção de aço utilizando carvão vegetal nativo chegou a ser nove vezes maior que a produção via carvão mineral. Assim, ressalta-se a importância de realizar investimentos para a produção sustentável de carvão vegetal, mitigando os impactos do uso de florestas nativas.

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS ABORDAGENS DE PRIORIZAÇÃO

A abordagem utilizada para priorizar os processos elementares para a adaptação neste trabalho difere em alguns aspectos das abordagens utilizadas por Lesage e Samson (2013) e Wang e colaboradores (2011). A Tabela 39 apresenta uma comparação entre as abordagens de priorização levando em conta variáveis como operacionalidade, facilidade de uso, entre outras, citadas por Lacerda et al. (2013) como variáveis para avaliação de métodos.

Tabela 39 - Comparação entre as abordagens de priorização

	País	Número de processos priorizados	Abordagem de priorização	Operacionalidade	Reprodutibilidade	Facilidade de uso
Este trabalho	Brasil	91	Maior contribuição para os impactos	Alta	Alta	Média
Lesage e Samson (2013)	Canadá	587	Setores e eletricidade	Alta	Média	Média
Wang et al. (2011)	China	560	Mais conectados	Alta	Alta	Alta

A abordagem de priorização deste trabalho resultou em um número de processos elementares para a priorização bastante inferior em relação aos demais. A diferença entre as abordagens fez com que processos que não são muito conectados na base de dados, ou em que a eletricidade não é o maior contribuinte para os impactos, fossem relevantes para a priorização no caso deste trabalho.

Quanto à operacionalidade, nos três casos os métodos propostos são capazes de funcionar adequadamente e executar a tarefa pretendida. Já para a reprodutibilidade, o método proposto por Lesage e Samson (2013) envolve decisões governamentais acerca dos setores considerados relevantes para a priorização e, devido a esta subjetividade, a obtenção dos mesmos resultados é mais difícil. O método proposto por Wang et al. (2011) é o que apresenta maior facilidade de uso, ao passo que os demais exigem conhecimentos mais profundos e acesso a softwares de ACV e de programação para a sua aplicação.

O método de priorização proposto neste trabalho apresenta como vantagens em relação aos demais o fato de explorar a sensibilidade dos fluxos, permitindo o mapeamento dos pontos críticos dos processos e servindo como um guia para o

direcionamento de esforços na regionalização. Além disso, ele pode ser reproduzido utilizando diferentes vetores de demanda, sendo passível de ser aplicado em empresas ou diferentes setores da economia.

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE ADAPTAÇÃO

Os processos elementares avaliados nesta pesquisa mostraram que a comparação das cadeias de produção possui caráter qualitativo e que cada caso apresenta suas peculiaridades.

A respeito da silagem de capim, foi constatado que este componente não faz parte da dieta do gado de leite para os sistemas nacionais avaliados, diferindo do que ocorre internacionalmente. A adaptação neste caso levou em conta o ajuste da dieta do *dataset* de leite de vaca e de gado para abate, bem como sua relação com a produção de carne vermelha.

Já para o caso da eletricidade chinesa, verificou-se que a regionalização da matriz de eletricidade deveria ser realizada para todos os produtos que compõem o vetor f , uma vez que não há entradas de eletricidade de outras regiões nos produtos industrializados nacionais. Com isso foi possível reduzir em 60% a contribuição deste fluxo. A adaptação nos demais níveis deste *dataset* como as matérias-primas, por exemplo, poderia reduzir ainda mais a influência deste processo.

O processo de produção de clínquer apresentou maiores semelhanças na comparação das cadeias e teve a saída de CO₂ adaptada para a realidade nacional. Para a produção de cimento Portland tipo II, três *datasets* foram elaborados considerando os tipos CP II-E, CP II-F e CP II-Z. O conjunto de dados englobando os três tipos para representar a produção total de CP II não pôde ser elaborado devido à falta de informações acerca das quantidades produzidas para cada item.

Por fim, para a adaptação do ferro-gusa foram avaliados dois cenários, tanto para a produção via coque quanto para carvão vegetal: com apenas os fluxos prioritários adaptados no cenário 1 e com os demais fluxos adaptados no cenário 2. A diferença entre os cenários foi mais expressiva para a rota de produção via carvão vegetal, uma vez que a produção via coque é muito semelhante nacional e

internacionalmente. Os *datasets* gerados para o cenário 2 foram submetidos para a base de dados ecoinvent.

Assim, considerando os resultados do *ranking* e excluindo os processos elementares que já são brasileiros, a porcentagem do impacto total que eles representam pôde ser calculada Tabela 40.

Tabela 40 - Processos elementares adaptados e sua influência no impacto total.

Processo elementar	Influência no ranking
grass silage, Swiss integrated production//[CH] grass silage production, Swiss integrated production, intensive	7%
electricity, high voltage//[CN] electricity production, hard coal	6%
clinker//[RoW] clinker production	3%
cattle for slaughtering, live weight//[RoW] milk production, from cow	3%
pig iron//[GLO] pig iron production	1%
Total	20%

Os processos elementares avaliados representam 20% do impacto total apresentado no *ranking* de produtos. Este resultado permite reafirmar que poucos processos elementares são responsáveis pelas maiores contribuições para os impactos ambientais e que os estudos realizados a partir dos *datasets* adaptados estariam mais apropriados para a realidade brasileira.

4.6.1 Avaliação da qualidade da adaptação

Uma vez que a adaptação de *datasets* não possui um método genérico que pode ser aplicado para qualquer processo, uma avaliação para cada caso foi realizada, considerando variáveis relevantes para a adaptação (Tabela 41).

A verificação do balanço de massa e/ou energia é um indicador de que as alterações realizadas são coerentes para o sistema de produção em estudo, uma vez que a alteração em um fluxo de entrada ou saída pode exigir mudanças nos demais fluxos.

A comparação dos *datasets* adaptados com aqueles compostos em sua maioria por dados primários é uma análise que auxilia a validação da adaptação, pois os conjuntos de dados primários servem como base para o resultado esperado. Contudo, esta análise não pôde ser realizada em todos os casos, uma vez que não há conjuntos de dados nacionais disponíveis para a comparação, justificando novamente o objetivo do trabalho de mitigar este problema.

De acordo com Dong e colaboradores (2015), a falta de regras para a adaptação pode levar a dificuldades na interpretação dos resultados. Portanto, os autores sugerem que o nível de ajuste seja indicado, de acordo com a responsabilidade dos impactos totais de tal fluxo em determinado processo. Neste caso, por exemplo, a produção de silagem de capim é responsável por 33% do impacto total da produção de leite de vaca, antes da adaptação. Do mesmo modo, a o fluxo de silagem que entra no conjunto de dados de gado para o abate representa 24% do impacto total.

Tabela 41 - Avaliação da adaptação

<i>Datasets</i> adaptados	Principal fluxo avaliado	Balanco de massa verificado	Balanco de energia verificado	Comparação com dados primários	Nível de ajuste (contribuição do fluxo em pontuação única)	Qualidade da adaptação
Produção de leite de vaca	Produção de silagem de capim	Não	Não se aplica	Sim	33%	Baixa
Produção de gado para o abate	Produção de silagem de capim	Não	Não se aplica	Não	24%	Baixa
Produção de carne vermelha	Gado para o abate	Sim	Não se aplica	Não	9%	Alta
Produção de cimento Portland	Produção de clínquer	Sim	Não se aplica	Não	58%	Alta
Produção de clínquer	Emissão de CO ₂	Não	Não se aplica	Não	57%	Média
Produção de aço	Produção de ferro-gusa	Não	Não se aplica	Não	11%	Média
Produção de ferro-gusa	Emissão de CO ₂	Sim	Não se aplica	Não	30%	Alta
Produtos do vetor de demanda <i>f</i>	Entrada de eletricidade chinesa	Não se aplica	Sim	Não se aplica	Varia para cada caso	Alta

Considerando a produção de cimento Portland, o fluxo de entrada de clínquer é responsável por 58% dos impactos totais. Neste caso, a alteração do consumo de clínquer exigiu a adaptação dos demais componentes alternativos, sendo possível verificar o balanço de massa dos fluxos que entram no sistema para produzir o cimento. A emissão de CO₂ na produção de clínquer é o segundo fluxo de

maior contribuição dentre todos os avaliados, mostrando que a regionalização deste dado é bastante relevante, uma vez que ele é responsável por mais da metade dos impactos totais causados por este conjunto de dados.

Quanto à produção de ferro-gusa, só a emissão de dióxido de carbono é responsável por 30% dos impactos totais. Neste caso, para o cenário 2, outros fluxos foram adaptados, aumentando o nível de ajuste.

Para o caso da eletricidade chinesa a partir de carvão mineral, os *datasets* adaptados foram os 55 produtos que compõem o vetor de demanda *f*. A única alteração realizada nestes casos foi a região do fluxo de eletricidade, antes compostos por um mix de diversas regiões, que após a adaptação levou em conta apenas a entrada de eletricidade brasileira. Portanto, não houve modificações nos valores dos fluxos de eletricidade, e os sistemas em questão não foram afetados neste sentido.

A avaliação destes indicadores não reduz a característica qualitativa da adaptação de *datasets*, a qual é bastante específica para cada caso estudado. Entretanto, estes exemplos são úteis para mostrar que a adaptação não pode ser realizada de forma imprudente e que o amplo conhecimento dos conjuntos de dados que serão adaptados é fortemente recomendado, evitando a adoção inapropriada de dados. Além disso, destaca-se que tais alterações devem ser expostas de maneira mais transparente possível, para que o procedimento de adaptação não seja encarado de forma subjetiva.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho contribuiu em dois grandes pontos para a ACV: (i) na determinação de pontos críticos de processos e (ii) na importância de aproximar os conjuntos de dados de ICV para a realidade brasileira. Além disso, os resultados obtidos na priorização de processos elementares são úteis para fomentar o desenvolvimento de políticas públicas acerca da construção de inventários de ciclo de vida no país, servindo como um guia para quais setores os esforços devem ser direcionados.

Os processos elementares de maior contribuição para os impactos ambientais, bem como os fluxos mais sensíveis a variações, foram identificados por meio da metodologia proposta neste trabalho. Com isso, a prioridade de adaptação em termos de fluxos elementares e intermediários pôde ser estabelecida.

A fim de avaliar a influência do método de AICV, uma análise de sensibilidade foi realizada para o cálculo de contribuição dos processos com cinco métodos de ponto final. Mesmo com o aumento no número total de processos relevantes de 91 para 137, os resultados evidenciam que poucos processos elementares são responsáveis pela maior parte do impacto causado. Isto mostra que a abordagem *top-down* proposta neste trabalho é pertinente para indicar os principais processos elementares que devem ser estudados em nível nacional. Recomenda-se que a adaptação siga a prioridade estabelecida no ranking, sempre que possível, e ressalta-se que este é um procedimento iterativo, pois conforme os processos são adaptados, novas influências são geradas.

Diferente de outras metodologias propostas para a priorização de processos elementares, neste trabalho aplicou-se a análise de perturbação. Esta aplicação teve o objetivo de identificar os fluxos mais sensíveis a mudanças e, assim, tornar a adaptação de *datasets* mais eficiente, já que ela mostra que nem todos os fluxos são capazes de alterar significativamente os resultados de impacto. Os resultados de perturbação demonstraram que poucos fluxos são capazes de provocar variação maior que 1% nos impactos para todas as áreas de dano. Esta vantagem pôde ser observada no caso de adaptação do clínquer, por exemplo, uma vez que de todo o *dataset*, apenas três fluxos elementares são relevantes para os resultados de avaliação de impacto. Este resultado contribui para a eficiência da promoção de

dados de ICV nacionais, uma vez que a coleta de dados nacionais pode ser focada nos pontos críticos dos processos, proporcionando maior economia em tempo e recursos financeiros associados a esta etapa.

Ressalta-se que a justificativa deste trabalho é baseada na falta de dados de ICVs nacionais e pode-se afirmar que há realmente uma grande barreira na obtenção de informações sobre os processos produtivos brasileiros. Um exemplo disso foi o dado industrial referente ao teor de clínquer no cimento Portland II que, por confidencialidade ou por variação na composição, não é disponibilizado para o público. Para a produção de ferro-gusa por carvão mineral, por exemplo, dados representativos são publicados de maneira agregada, fazendo com que não se saiba exatamente a que processos as matérias-primas se destinam. A carência por dados representativos e desagregados força os estudos de ACV nacionais a serem mal representados por dados internacionais. A comparação entre os resultados obtidos para a produção de leite de vaca mostrou as discrepâncias que podem ser encontradas. Por isso, pesquisadores que desenvolvem estudos relacionados à construção de conjuntos de dados de processos nacionais devem ser encorajados a publicar seus trabalhos em bases de dados. Desta forma, os dados se encontrarão disponíveis aos usuários em um formato adequado, com a qualidade garantida e passíveis de serem reutilizados por meio da conexão com outros processos.

Para os casos em que não há *datasets* nacionais disponíveis, a adaptação de processos elementares internacionais mostrou que é possível tornar os conjuntos de dados mais representativos para a realidade nacional. Este fato foi evidenciado na comparação dos impactos ambientais causados na produção do leite, em que o *dataset* adaptado reduziu as discrepâncias entre os resultados brasileiros e internacionais. O procedimento de adaptação dos *datasets* foi realizado para cinco processos elementares, os quais representam 20% do impacto total apontado no *ranking* de processos.

Nem todos os produtos do relatório do IBGE foram encontrados na base de dados escolhida para o desenvolvimento da pesquisa. Os resultados de correspondência entre estes produtos mostram que 34% dos itens do relatório não puderam ser avaliados. Este fato é considerado uma limitação da metodologia proposta, uma vez que os resultados são baseados nos produtos avaliados, não podendo prever a contribuição ambiental dos itens que não foram contemplados. Indica-se que estes itens sejam estudados pela comunidade científica e inventários

acerca de seus ciclos de vida sejam criados, uma vez que são expressivos nacionalmente em termos de produção e vendas. Bem como para os produtos não contemplados na pesquisa, a metodologia de adaptação não foi capaz de prever a influência dos fluxos que ocorrem apenas nos processos nacionais, uma vez que se baseia nos fluxos que já existem nos conjuntos de dados internacionais.

Para que a identificação dos processos elementares prioritários para adaptação pudesse ser realizada, foram avaliados os produtos industriais mais relevantes nacionalmente. A determinação de pontos críticos por meio da contribuição de processos pode ser aplicada para outros casos. Nesta pesquisa, buscou-se avaliar os impactos ambientais oriundos da produção industrial nacional, mas outros estudos podem aplicar esta metodologia em diferentes segmentos de produção, como construção civil, agrícola, químicos, entre outros, visando identificar potenciais de melhorias de estudos de ACV.

Como perspectiva futura, recomenda-se estudar as relações entre os processos de produção e de mercado, não levados em conta na eliminação da dupla contagem.

REFERÊNCIAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do Cimento Portland. 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

_____. Fluxograma de fabricação de cimento. 2015. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/basico-sobre-cimento/fabricacao/fabricacao>> Acesso em: 23 fev 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland pozolânico. NBR 5736. Rio de Janeiro – RJ, 1990.

_____. Cimento Portland composto. NBR 11578. Rio de Janeiro – RJ, 1991.

_____. Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida - princípios e estrutura. NBR ISO 14040. Rio de Janeiro – RJ, 2009.

ALI, Mohamed. B.; SAIDUR, Rahman.; HOSSAIN, Mohamed S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2252-2261, 2011.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. Rio de Janeiro, 2012.

ARAUJO, Alexandre P. de. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de instalações para produção de leite tipo B, com ênfase nos índices de conforto térmico e na caracterização econômica**. 2001. 69 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

ASSIS, Airdem G. et al. Sistemas de Produção de Leite no Brasil. **Circular Técnica 85**. Minas Gerais, 2005.

BAILIS, Rob et al. Innovation in charcoal production: A comparative life-cycle assessment of two kiln technologies in Brazil. **Energy for sustainable development**, v. 17, n. 2, p. 189-200, 2013.

BAUMANN, Henrikke; TILLMAN, Anne-Marie. **The hitch hiker's guide to LCA: an orientation in life cycle assessment methodology and application.** Lund, Sweden: Studentlitteratur, 2004.

BENHELAL, Emad et al. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 51, p. 142-161, 2013.

BOESCH, Michael E.; HELLWEG, Stefanie. Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment. **Environmental science & technology**, v. 44, n. 23, p. 9143-9149, 2010.

BRAGA, Raimundo N. B. **Os parâmetros da qualidade do carvão e seus reflexos na produção de gusa.** Circular Técnica IPEF, Piracicaba, SP, n. 73, p. 15, 1979.

CHAU, Chi K. et al. Environmental impacts of building materials and building services components for commercial buildings in Hong Kong. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 18, p. 1840-1851, 2007.

CHOMA, Ernani F.; UGAYA, Cássia M. L. Environmental impact assessment of increasing electric vehicles in the Brazilian fleet. **Journal of Cleaner Production**, 2015.

CLASSEN, Mischa et al. Life Cycle Inventories of Metals. **Final report ecoinvent data v2.1, No. 10.** EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2009.

CLCD – Chinese Reference Life Cycle Database. **Integrate Knowledge for our Environment (IKE).** Disponível em: < <http://www.ike-global.com/archives/1094.html>>. Acesso em: 05 mai. 2015.

CONMETRO – CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida.** 2010. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/resc/pdf/RESC000236.pdf>> Acesso em: 27 abr. 2014.

CURRAN, Mary Ann et al. **Summary of global life cycle inventory data resources.** US Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, 2006.

DE EICKER, Margarita O. et al. The applicability of non-local LCI data for LCA. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 30, n. 3, p. 192-199, 2010b.

DE EICKER, Margarita O. et al. Using non-local databases for the environmental assessment of industrial activities: The case of Latin America. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 30, n. 3, p. 145-157, 2010a.

DE LÉIS, Cristiane M. **Desempenho ambiental de três sistemas de produção de leite no sul do Brasil pela abordagem da avaliação do ciclo de vida**. 2013. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

DE LÉIS, Cristiane M. et al. Carbon footprint of milk production in Brazil: a comparative case study. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 1, p. 46-60, 2015.

DE PAULA, Germano M. **Siderurgia**. Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono. Ribeirão Preto, 2012.

DE PAULA, Germano M. **Produção Independente de Ferro-Gusa (“Guseiros”)**. Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono. Ribeirão Preto, 2014.

DE PAULA, Luiz G. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com co-processamento de Misturas de Resíduos**. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia). Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

DE SMET, Bea; STALMANS, Mark. LCI data and data quality. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 1, n. 2, p. 96-104, 1996.

DERU, Michael. U.S. Life Cycle Inventory Database Roadmap. **National Renewable Energy Laboratory (NREL)**. Estados Unidos, 12 p. 2009.

DIAS, Victor P.; FERNANDES, Eduardo. Fertilizantes: uma visão global sintética. **BNDES Setorial**, n. 24, p. 97-138, 2006.

DONG, Hongmin. et al. **Emissions from livestock and manure management**. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2006.

DONG, Ya H. et al. Substituting local data for overseas life cycle inventories—a case study of concrete products in Hong Kong. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, p. 414-422, 2015.

ELCD – European reference Life Cycle Database. **Joint Research Centre. European Platform on Life Cycle Assessment**. Disponível em: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/?page_id=126>. Acesso em: 14 abr. 2015.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional 2012: Ano base 2011. Rio de Janeiro, 2012.

FINNVEDEN, Göran et al. Recent developments in life cycle assessment. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 1, p. 1-21, 2009.

FRISCHKNECHT, Rolf et al. **Overview and methodology – data v2.0. ecoinvent report No. 1**. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2007.

FRISCHKNECHT, Rolf. Transparency in LCA-a heretical request?. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 9, n. 4, p. 211-213, 2004.

GAO, Tianming et al. Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 160-170, 2015.

GOMES, Fernanda et al. Adaptation of environmental data to national and sectorial context: application for reinforcing steel sold on the French market. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 5, p. 926-938, 2013.

GUERREIRO, Agenara Q. **Avaliação do ciclo de vida dos cimentos de produção mais significativa no Brasil**. 2014. 89 f. Trabalho de Diplomação (Graduação). Curso Superior de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

HANSEN, Adriana P.; DA SILVA, Gil A.; KULAY, Luiz. Evaluation of the environmental performance of alternatives for polystyrene production in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 532, p. 655-668, 2015.

HEIJUNGS, Reinout. Identification of key issues for further investigation in improving the reliability of life-cycle assessments. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3, p. 159-166, 1996.

_____. Sensitivity coefficients for matrix-based LCA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 5, p. 511-520, 2010.

HEIJUNGS, Reinout; KLEIJN, René. Numerical approaches towards life cycle interpretation five examples. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 6, n. 3, p. 141-148, 2001.

HEIJUNGS, Reinout; SUH, Sangwon. **The computational structure of life cycle assessment**. Springer Science & Business Media, 2002.

HUMBERT, Sébastien et al. **IMPACT 2002+: User Guide**. 2012.

IAB - Instituto Aço Brasil – Estatísticas – Produção Siderúrgica Brasileira, 2012. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp?par=20121>> Acesso em: 24 abr 2015

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2006. Rio de Janeiro, 2009.

_____. Pesquisa Industrial Anual – Produto. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/industria/pia/produtos/produto2011/defaulttabzip_xls.shtm> Acesso em: 24 abr 2015.

IBICT - Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. Portal de Avaliação do Ciclo de Vida. Disponível em: < <http://acv.ibict.br/>> Acesso em: 24 abr 2015.

IBS - INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. Siderurgia Brasileira: Relatório de Sustentabilidade 2008.

IEA – International Energy Agency. Energy Balances of Non-OECD Countries, 2012 - 2013. OECD, Paris, 2015.

ILCD Handbook – International Reference Life Cycle Data System – **Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment**. Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability, 2010. European Commission.

ISHAK, Siti A.; HASHIM, Haslenda. Low carbon measures for cement plant—a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 103, p. 260-274, 2015.

JACOMINO, Vanusa M. F. et al. **Controle Ambiental das Indústrias de Ferro-Gusa em Altos- Fornos a Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente. Segrac Editora e Gráfica Ltda. 2002. 302 p.

KELLENBERGER, Daniel et al. Life Cycle Inventories of Building Products. **ecoinvent report No. 7**. Dübendorf, 2007.

KOSKELA, Sirkka; HILTUNEN, Marja-Riitta. **A guide to the utilization of LCI/LCA databases for Estonian enterprises**. Suomen ympäristökeskus, 2004.

LACERDA, Daniel P. et al. Design science research: A research method to production engineering. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

LAMB, Celina R.; LUSTOSA, Carla G. Gestão do Banco de Dados de Inventários de Ciclo de Vida. In: **Congresso Brasileiro sobre Gestão Pelo Ciclo de Vida**, 4, 2014, São Bernardo do Campo. **Anais**. p. 285-289. Organizadores: Associação Brasileira de Ciclo de Vida, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Escola SENAI Mario Amato. São Bernardo do Campo, 2014

LESAGE, Pascal; SAMSON, Réjean. The Quebec Life Cycle Inventory Database Project. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. p. 1-8, 2013.

LEWANDOWSKA, Anna et al. Adaptation of ecoinvent database to Polish conditions. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, n. 4, p. 319-327, 2008.

MALARD, Antonio A. M. **Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do Estado de Minas Gerais**. 2009. 201 f. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

MARINGOLO, Vagner. **Clínquer coprocessado: produto de tecnologia integrada para sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento**. 2001. 174 f. Tese (Doutorado em Mineralogia e Petrologia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MiLCA – Multiple Interface Life Cycle Assessment. **Japan Environmental Management Association for Industry (JEMAI)**. Disponível em: <<http://www.milca-milca.net/english/index.php>>. Acesso em: 05 mai. 2015.

MME – Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico, 117p. 2012.

MOSCKEM, Sérgio L. **Análise do emprego de materiais alternativos no alto forno da ArcelorMittal Tubarão**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

MY-LCID – Malaysia Life Cycle Inventory Database. **LCA Malaysia**. SIRIM Berhad. Disponível em: <<http://mylcid.sirim.my/sirimlca/>>. Acesso em: 05 mai. 2015.

NEBEL, Barbara; ALCORN, Andrew; WITTSTOCK, Bastian. **Life Cycle Assessment: Adopting and adapting overseas LCA data and methodologies for building materials in New Zealand**. Ministry of Agriculture and Forestry, 2011.

NREL - National Renewable Energy Laboratory. **U.S. Life Cycle Inventory Database**. Disponível em: <<https://www.lcacommons.gov/nrel/search>>. Acesso em: 14 abr. 2015.

OLIVEIRA, Vanessa C. H. C. et al. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 167-181, 2014.

OLIVIER, Jos G. J. Trends in global CO₂ emissions: 2013 Report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. The Hague, 2013.

OLSZENSWSKI, Francieli T.. **Avaliação do ciclo de vida da produção de leite em sistema semi extensivo e intensivo: estudo aplicado**. 2011. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

OMETTO, Aldo R.; HAUSCHILD, Michael Z.; ROMA, Woodrow N. L. Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. **The international journal of life cycle assessment**, v. 14, n. 3, p. 236-247, 2009.

PEGORETTI, Thaís d. S. et al. Use of recycled natural fibres in industrial products: A comparative LCA case study on acoustic components in the Brazilian automotive sector. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 84, p. 1-14, 2014.

PETIT-BOIX, Anna et al. Environmental and economic assessment of a pilot storm water infiltration system for flood prevention in Brazil. **Ecological engineering**, v. 84, p. 194-201, 2015.

REBITZER, Gerald et al. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment international**, v. 30, n. 5, p. 701-720, 2004.

RIBEIRO, Flávio d. M.; DA SILVA, Gil A. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 1, p. 44-54, 2010.

ROCHA, Mateus H. et al. Life cycle assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions: A meta-analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 37, p. 435-459, 2014.

ROJAS, Silvia P. et al. Sistema brasileiro de inventário de ciclo de vida (SICV Brasil) e a iso 14044: 2009. In: CONGRESSO BRASILEIRO EM GESTÃO DO CICLO DE VIDA DE PRODUTOS E SERVIÇOS, 3, 2012, Maringá. **Anais**. p. 391-396. Organizadores: Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani e Amélia Masae Morita. Maringá, 2012.

SABLOWSKI, Alexander R. M. **Balço de materiais na gestão ambiental da cadeia produtiva do carvão vegetal para produção de ferro-gusa em Minas Gerais**. 2008. 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SAMSON, Réjean. et al. Environmental and socioeconomic life cycle assessment of canadian milk. **Quantis Canada, AGEKO and CIRAIG for Dairy Farmers of Canada**, p. 1-253, 2012.

SANTOS, Alexandre A. O. et al. Comparing environmental impacts of native and introduced freshwater prawn farming in Brazil and the influence of better effluent management using LCA. **Aquaculture**, v. 444, p. 151-159, 2015.

SINDIFER - Sindicato da indústria do ferro no estado de Minas Gerais. Anuário Estatístico do Setor de Ferro-Gusa. Minas Gerais, 2014.

SNIC - SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>> Acesso em: 06 fev. 2016.

SONNEMANN, Guido et al. Global guidance principles for life cycle assessment databases: development of training material and other implementation activities on the publication. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 18, n. 5, p. 1169-1172, jun. 2013.

SONNEMANN, Guido et al. Process on “global guidance for LCA databases”. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 16, n. 1, p. 95-97, jan. 2011.

SONNEMANN, Guido; VIGON, Bruce. Global guidance principles for life cycle assessment databases: a basis for greener processes and products. **Publication of the UNEP/ SETAC Life Cycle Initiative**. Paris, 160 p. 2011.

SONTER, Laura J. et al. Carbon emissions due to deforestation for the production of charcoal used in Brazil’s steel industry. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 4, p. 359-363, 2015.

SPINE@CPM Database – **Center for Environmental Assessment of Product and Material Systems**. Disponível em: <<http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/AboutDatabase.htm>>. Acesso em: 14 abr. 2015.

SUSAKI, Katsujiro. **NT Fundentes e escorificantes – situação atual com tendências 2025**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília, 2008.

TONISSI, Rafael H. de et al. **Alimentos e Alimentação Animal**. Universidade Federal da Grande Dourados. Editora UFGD, 2013.

TSIROPOULOS, Ioannis et al. Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 19, n. 5, p. 1049-1067, mai. 2014.

UGAYA, Cássia. M. L.; COELHO, Carla. Life Cycle Inventory of Steel in Brazil. In: IV Global Conference on Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering, 2006, São Carlos. Sustainable Manufacturing, 2006.

UGAYA, Cássia M. L.; WALTER, Arnaldo C. S. Life cycle inventory analysis - a case study of steel used in brazilian automobiles. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 9, n. 6, p. 365-370, nov. 2004.

ULLMANN'S, SPRUNG, Siegbert; KROPP, Jörg. Cement and concrete. **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry**, 2001.

WANG, Hongtao et al. Development of Chinese Reference Life Cycle Database (CLCD) – Guidelines, Documentation and Tools. In: LIFE CYCLE MANAGEMENT - TOWARDS LIFE CYCLE SUSTAINABILITY MANAGEMENT. 2011, Alemanha. **Anais Eletrônicos**. 2011, Alemanha. Disponível em: <<http://www.lcm2011.org/papers.html>> Acesso em: 24 abr. 2015.

WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Getting the numbers right project. 2013. Disponível em: <<http://www.wbcSDcement.org/GNR-2013/index.html>> Acesso em: 23 fev. 2016.

_____. Cement industry energy and CO₂ performance: “getting the numbers right”. 2009.

_____. CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry. The cement CO₂ and energy protocol. Version 3.0. 2011.

WEIDEMA, Bo P. et al. **Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3**. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2013.

WEIDEMA, Bo P. Multi-user test of the data quality matrix for product life cycle inventory data. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 3, n. 5, p. 259-265, 1998.

WEIDEMA, Bo P.; WESNÆS, Marianne S. Data quality management for life cycle inventories—an example of using data quality indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 4, n. 3, p. 167-174, 1996.

WERNER, Frank et al. Life Cycle Inventories of wood as a fuel and construction material. Data v2.0 (2007). **ecoinvent report No. 9**. EMPA Dübendorf, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2007.

WILLERS, Camila D.; RODRIGUES, Luciano B.. A critical evaluation of Brazilian life cycle assessment studies. **International Journal of Life Cycle Assessment**. v. 19, n.1, p. 144–152, jan. 2014.

WORRELL, Ernst et al. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. **Annual review of energy and the environment**, v. 26, n. 1, p. 303-329, 2001.

WSA - WORLD STEEL ASSOCIATION. Steel Statistical Yearbook 2014.

YAMAMOTO, Jorge K. et al. Environmental impact reduction on the production of blended portland cement in Brazil. **Environmental Geosciences**, v. 4, n. 4, p. 192-206, 1997.

ANEXO A - Produção e vendas dos 100 maiores produtos e/ou serviços industriais, segundo a posição nacional em valor das vendas.

Posição	Descrição do produto e Unidades da Federação	Unidade de medida	Produção		Vendas	
			Quantidade	Valor (1 000 R\$)	Quantidade	Valor (1 000 R\$)
1	Minérios de ferro em bruto ou beneficiados (classificados, concentrados, triturados, etc.), exceto pelotizados ou sinterizados	t	316 878 205	56 543 673	282 405 408	50 851 340
2	Óleo diesel	mil m3	50 725	58 650 964	41 700	48 114 125
3	Automóveis, jipes ou camionetas, para passageiros, com motor a gasolina, álcool ou bicombustível, de cilindrada maior que 1 500 cm ³ e menor ou igual a 3 000 cm ³ , inclusive CKD (<i>completely knocked down</i>)	um	1 172 262	41 191 396	1 151 350	40 339 827
4	Óleos brutos de petróleo	mil m3	124 284	138 155 579	28 770	32 202 561
5	Automóveis, jipes ou camionetas, para passageiros, com motor a gasolina, álcool ou bicombustível, de cilindrada menor ou igual a 1.000 cm ³ , inclusive CKD (<i>completely knocked down</i>)	um	1 185 467	29 875 530	1 211 963	30 624 483
6	Minérios de ferro pelotizados ou sinterizados	t	151 146 219	29 558 631	158 907 054	29 343 154
7	Gasolina automotiva ou para outros usos, exceto para aviação	m3	27 492 906	29 853 068	24 791 869	26 670 500
8	Álcool etílico não desnaturado, com teor alcoólico em volume maior ou igual a 80%, anidro ou hidratado para fins carburantes	mil l	20 595 110	25 322 839	21 537 796	25 960 268
9	Carnes de bovinos frescas ou refrigeradas	t	4 675 383	27 930 458	4 046 142	24 131 151
10	Caminhões, com motor diesel, de capacidade máxima de carga (cmc) superior a 5 t, inclusive CKD (<i>completely knocked down</i>)	um	164 243	21 397 400	151 270	19 834 486
11	Cervejas ou chope	mil l	13 743 457	21 898 158	12 504 104	19 456 640
12	Aduos ou fertilizantes com nitrogênio, fósforo e potássio (NPK)	t	18 944 452	17 181 806	20 088 351	18 208 536
13	Açúcar cristal	t	17 536 177	18 014 942	16 652 203	17 054 921
14	Refrigerantes	mil l	16 725 173	18 547 626	15 025 734	16 382 716
15	Óleos combustíveis, exceto diesel	m3	26 974 283	26 952 193	15 353 507	15 472 542
16	Açúcar VHP (<i>very high polarization</i>)	t	14 869 829	14 153 348	15 214 310	14 436 912
17	Partes, peças e acessórios para veículos automotores, não especificados	mil	4 137 772	14 213 264	3 695 042	13 201 693
18	Tortas, bagaços, farelos e outros resíduos da extração do óleo de soja	t	21 993 261	15 336 362	19 104 287	13 113 372
19	Carnes ou miudezas de aves congeladas	t	7 868 773	24 839 495	4 427 054	13 098 892
20	Cimentos Portland compostos (CP - II)	t	62 610 326	13 632 282	53 941 228	11 692 346
21	Automóveis, jipes ou camionetas, para passageiros, com motor a gasolina, álcool ou bicombustível, de cilindrada maior que 1 000 cm ³ e menor ou igual a 1 500 cm ³ , inclusive CKD (<i>completely knocked down</i>)	um	444 330	11 676 024	444 257	11 684 010
22	Televisores (receptores de televisão)	um	14 177 131	11 324 422	13 572 316	10 817 340
23	Telefones celulares	um	60 842 275	10 457 602	61 118 145	10 515 575

24	Caminhão-trator, inclusive CKD (<i>completely knocked down</i>), para reboques e semirreboques	um	56 762	11 628 430	49 099	10 162 013
25	Peças ou acessórios, não especificados, para o sistema de motor de veículos automotores (blocos de cilindro, virabrequins, carburadores, válvulas, polias, juntas, etc.)	mil	2 248 360	10 440 655	2 177 333	9 923 478
26	Pastas químicas de madeira, processo sulfato, branqueadas ou não	t	10 467 248	10 709 746	9 899 660	9 915 630
27	Carnes de bovinos congeladas	t	1 964 970	11 053 325	1 596 794	9 387 168
28	Rações e outras preparações utilizadas na alimentação de animais	t	30 033 944	28 033 475	8 698 675	9 252 742
29	Motocicletas (inclusive os motociclos) com motor de pistão alternativo de cilindrada superior a 50 cm ³ e menor ou igual a 250 cm ³	um	1 928 754	8 692 857	1 889 597	8 521 408
30	Veículos para o transporte de mercadorias (camionetas, furgões, <i>pick-ups</i> , etc.), com motor a gasolina e/ou álcool, de capacidade máxima de carga (cmc) não superior a 5 t, inclusive CKD (<i>completely knocked dow</i>)	um	285 661	8 450 161	280 158	8 285 775
31	Lingotes, blocos, tarugos ou placas de aços ao carbono	t	17 997 793	19 453 431	7 477 854	8 271 664
32	Serviços relacionados à extração de petróleo e gás (perfuração, reperfuração, desmantelamento de torres, etc.), exceto a prospecção	-	-	8 201 847	-	8 201 847
33	Gás liquefeito de petróleo (GLP)	m3	13 273 573	8 803 553	12 317 510	8 024 283
34	Querosenes de aviação	m3	5 536 569	8 080 511	5 053 251	7 367 282
35	Massa de concreto preparada para construção; concreto usinado	m3	27 863 425	7 187 958	27 822 620	7 180 593
36	Naftas para petroquímica	m3	8 232 572	8 432 380	6 905 168	7 047 925
37	Aviões ou outros veículos aéreos de peso superior a 15 000 kg	um	(x)	(x)	(x)	(x)
38	Bobinas a quente de aços ao carbono, não revestidos	t	6 440 628	8 988 813	4 682 006	6 918 576
39	Caixas de papelão ondulado ou corrugado, impressas ou não	t	3 299 567	7 191 639	3 143 846	6 785 674
40	Fios, cabos e condutores elétricos com capa isolante, para tensão menor ou igual a 1000v	t	677 979	7 036 023	645 950	6 529 186
41	Veículos para o transporte de mercadorias (camionetas, furgões, <i>pick-ups</i> , etc.), com motor diesel, de capacidade máxima de carga (cmc) não superior a 5 t, inclusive CKD (<i>completely knocked down</i>)	um	96 837	6 219 586	95 993	6 135 277
42	Leite esterilizado / UHT/ Longa Vida	mil l	5 310 985	7 519 454	4 172 170	5 926 440
43	Biodiesel	kg	2 979 114 363	6 045 669	2 892 898 705	5 871 612
44	Computadores pessoais portáteis (<i>laptops, notebook, handhelds e semelhantes</i>)	um	5 958 185	5 982 789	5 758 123	5 781 097
45	Preparações em xarope para elaboração de bebidas, para fins industriais	l	74 072 732	6 665 095	67 370 412	5 735 018
46	Farinha de trigo	t	6 062 600	6 809 909	5 425 134	5 679 565
47	Ladrilhos, placas e azulejos de cerâmica para pavimentação ou revestimento, esmaltados (lado superior ou igual a 7cm)	m2	837 338 100	5 793 411	795 225 068	5 548 924

48	Vergalhões de aço ao carbono	t	3 461 603	5 952 256	3 175 426	5 519 769
49	Óleo de soja refinado	t	2 734 160	6 611 123	2 130 829	5 438 060
50	Tratores agrícolas, inclusive motocultores	um	66 232	5 556 919	63 298	5 331 654
51	Gás natural	mil m3	23 800 064	13 711 718	9 163 990	5 277 601
52	Medicamentos contendo produtos misturados ou não misturados, não especificados		-	5 277 529	-	5 277 529
53	Polipropileno (PP)	t	1 685 548	5 964 966	1 438 659	5 086 025
54	Chassis com motor para ônibus	um	48 015	6 010 961	40 779	5 047 872
55	Calçados de couro (sapatos, botas, sandálias, chinelos, etc.), feminino - exceto tênis e para uso profissional	par	116 621 912	4 695 336	120 820 121	5 011 997
56	Biscoitos e bolachas	t	1 734 642	6 084 681	1 394 036	4 916 398
57	Ferro-gusa	t	7 009 224	5 951 155	5 793 397	4 915 331
58	Óleo de soja em bruto, mesmo degomado	t	5 135 504	10 681 923	2 410 756	4 810 150
59	Alumínio não ligado em formas brutas (líquido, massa, lingotes, biletos, granalhas, etc.)	t	1 431 258	4 937 127	1 370 690	4 730 306
60	Arroz semibranqueado ou branqueado, polido, brunido, parboilizado ou não	t	4 609 648	5 574 900	4 035 559	4 718 443
61	Papel para usos na escrita, impressão e outros fins gráficos (ofsete, bíblia, <i>bouffant</i> , <i>couché</i> , monolúcido, etc.), não revestido	t	2 320 605	4 576 902	2 380 421	4 714 180
62	Refrigeradores ou congeladores (<i>freezers</i>), inclusive combinados, para uso doméstico	um	7 970 792	4 923 335	7 630 097	4 710 262
63	Máquinas para colheita, não especificados	um	21 911	4 883 125	20 798	4 524 891
64	Café torrado e moído, inclusive aromatizado (mesmo descafeinado)	t	520 013	4 543 382	512 584	4 503 930
65	Pneumáticos novos de borracha, usados em ônibus ou caminhões	mil	8 626	4 446 523	8 739	4 469 611
66	Tubos, canos ou perfis ocos de aço com costura, não especificados	t	1 840 953	4 952 472	1 659 720	4 396 416
67	Carnes ou miudezas de aves, frescas ou refrigeradas	t	2 012 319	5 334 796	1 593 319	4 318 117
68	Fumo processado industrialmente (destalamento e outros beneficiamentos elaborados em unidades industriais)	t	618 262	5 709 330	459 614	4 265 009
69	Fio-máquina de aço ao carbono	t	3 580 020	5 084 270	2 922 952	4 223 055
70	Bobinas ou chapas de aço zincadas (galvanizadas)	t	1 945 369	4 385 391	1 856 613	4 196 114
71	Barras, perfis ou vergalhões de cobre ou de ligas de cobre (latão, cuproníquel, <i>maillechort</i> , etc.)	t	345 580	4 264 254	331 718	4 169 956
72	Óxido de alumínio (alumina calcinada)	t	8 615 286	4 783 253	7 782 955	4 070 851
73	Carrocerias para ônibus	um	33 962	4 071 730	33 184	3 950 672
74	Ouro (incluído o ouro platinado), em formas brutas, semimanufaturadas ou em pó, para usos não monetários	kg	45 700	3 848 823	46 466	3 913 791
75	Pedras britadas	m3	138 536 535	4 484 910	122 103 659	3 912 044
76	Sucos concentrados de laranja	mil l	1 106 240	4 068 821	1 050 805	3 804 089
77	Eixos, semieixos, engrenagens, mancais, juntas de articulação ou outras peças para transmissão para veículos automotores	um	77 340 221	6 551 853	52 084 103	3 763 596
78	Computadores pessoais de mesa (PC <i>desktops</i>)	um	3 910 217	3 606 202	4 071 454	3 721 156

79	Medicamentos à base de compostos heterocíclicos exclusivamente de heteroátomos de nitrogênio - exceto dipirona, captopril e loratadina		-	3 693 247	-	3 693 247
80	Peças e acessórios para motocicletas, triciclos, motocicletos e outros ciclomotores, não especificados	um	419 464 898	3 883 953	410 901 341	3 678 346
81	Bobinas a frio de aços ao carbono, não revestidos	t	2 504 147	4 196 732	2 190 111	3 675 993
82	Caixas ou outras cartonagens dobráveis de papel-cartão ou cartolina, impressas	t	604 272	3 683 146	603 642	3 665 166
83	Sabões ou detergentes em pó, flocos, palhetas, grânulos ou outras formas semelhantes	t	1 871 734	5 307 797	1 197 935	3 609 722
84	Herbicidas, inibidores de germinação e reguladores de crescimento para plantas	t	323 864	3 691 371	337 316	3 557 067
85	Motores diesel ou semidiesel para ônibus ou caminhões	um	342 297	4 872 528	240 400	3 554 168
86	Peças ou acessórios para os sistemas de marcha ou transmissão, não especificados, para veículos automotores	um	284 270 149	3 546 004	269 635 708	3 406 989
87	Peças ou acessórios de plástico, reforçados ou não, para veículos automotores, motocicletas, bicicletas e similares	kg	460 611 499	3 580 979	437 375 639	3 301 803
88	Açúcar refinado de cana	t	3 125 296	2 863 920	3 577 808	3 269 392
89	Pneumáticos novos de borracha, usados em automóveis, camionetas ou utilitários	mil	37 556	3 297 122	37 079	3 269 147
90	Chapas, bobinas, fitas e tiras de aço, relaminadas, inclusive revestidas, pintadas ou envernizadas	t	1 513 292	3 550 196	1 386 096	3 268 859
91	Minérios de cobre (azurita, cuprita, etc.) em bruto ou beneficiados	t	792 763	3 265 880	788 953	3 250 013
92	Polietileno de alta densidade (PEAD)	t	1 034 886	3 546 037	961 732	3 239 930
93	Reboques ou semirreboques para usos não especificados	um	56 811	3 394 028	53 641	3 204 723
94	Tintas ou vernizes dissolvidos em meio aquoso, para construção	t	1 130 044	3 380 727	1 088 903	3 198 478
95	Barras de aços ao carbono	t	1 397 501	2 996 218	1 534 904	3 187 663
96	Garrafas, garrafões, frascos e artigos semelhantes de plástico	mil	14 533 746	3 757 037	12 768 273	3 169 869
97	Freios (travões) e servofreios para veículos automotores	mil	114 772	3 188 350	112 648	3 146 014
98	Jogos de fios para velas de ignição e outros chicotes elétricos para veículos automotores	um	140 410 138	3 499 271	135 983 636	3 125 566
99	Artefatos diversos de ferro e aço	t	1 925 860	3 178 240	1 865 125	3 106 320
100	Estruturas de ferro e aço, em chapas ou em outras formas ⁽¹⁾	t	(x)	(x)	(x)	(x)

(1) - Produto desidentificado com o objetivo de evitar individualização da informação.

Fonte: Adaptado de IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Indústria, Pesquisa Industrial Anual - Produto 2011.

ANEXO B - Composição do vetor de demanda *f*

Produto	Quantidade produzida	Unidade
iron ore, beneficiated, 65% Fe/[GLO] iron ore beneficiation to 65% Fe	1,52E+11	kg
diesel/[RoW] petroleum refinery operation	4,27E+10	kg
petroleum/[RoW] petroleum and gas production, off-shore	6,36E+09	kg
petroleum/[RoW] petroleum and gas production, on-shore	7,07E+08	kg
iron pellet/[RoW] iron pellet production	1,38E+11	kg
petrol, unleaded/[RoW] petroleum refinery operation	2,06E+10	kg
ethanol, without water, in 95% solution state, from fermentation/[BR] ethanol production from sugar cane	1,67E+10	kg
ammonium sulfate, as N/[RoW] ammonium sulfate production	2,85E+08	kg
urea, as N/[RoW] urea production, as N	1,07E+09	kg
phosphate fertiliser, as P2O5/[RER] diammonium phosphate production	8,37E+06	kg
phosphate fertiliser, as P2O5/[RoW] single superphosphate production	6,67E+09	kg
phosphate fertiliser, as P2O5/[RoW] triple superphosphate production	7,70E+08	kg
potassium chloride, as K2O/[RoW] potassium chloride production	7,59E+08	kg
ammonia, liquid/[RoW] ammonia production, steam reforming, liquid	1,08E+09	kg
ammonium nitrate, as N/[RoW] ammonium nitrate production	3,67E+08	kg
phosphate fertiliser, as P2O5/[RER] monoammonium phosphate production	1,15E+09	kg
phosphoric acid, fertiliser grade, without water, in 70% solution state/[RoW] phosphoric acid production, dihydrate process	1,81E+09	kg
sulfuric acid/[RoW] sulfuric acid production	4,98E+09	kg
sugar, from sugarcane/[BR] cane sugar production with ethanol by-product	3,24E+10	kg
heavy fuel oil/[RoW] petroleum refinery operation	2,76E+10	kg
soybean meal/[BR] soybean meal and crude oil production	2,20E+10	kg
cement, alternative constituents 6-20%/[RoW] cement production, alternative constituents 6-20%	6,26E+10	kg
display, cathode ray tube, 17 inches/[GLO] display production, cathode ray tube, 17 inches	1,42E+07	p
sulfate pulp/[RER] sulfate pulp production, unbleached	1,05E+10	kg
maize grain/[RoW] maize grain production	1,50E+10	kg
steel, unalloyed/[RoW] steel production, converter, unalloyed	3,52E+10	kg
liquefied petroleum gas/[RoW] petroleum refinery operation	9,49E+06	kg
kerosene/[RoW] petroleum refinery operation	4,45E+09	kg
concrete, normal/[RoW] concrete production, normal	2,79E+07	m ³
naphtha/[RoW] petroleum refinery operation	5,78E+09	kg
corrugated board box/[RoW] corrugated board box production	3,30E+09	kg
vegetable oil methyl ester/[BR] esterification of soybean oil	2,98E+09	kg
computer, laptop/[GLO] computer production, laptop	5,96E+06	p
soybean oil, refined/[RoW] soybean oil refinery operation	2,73E+09	kg
natural gas, high pressure/[RoW] natural gas production	2,38E+10	m ³
polypropylene, granulate/[RoW] polypropylene production, granulate	1,55E+09	kg
pig iron/[GLO] pig iron production	1,71E+09	kg
soybean oil, crude/[RoW] soybean meal and crude oil production	5,14E+09	kg
aluminium, primary, liquid/[RoW] aluminium production, primary, liquid, prebake	1,43E+09	kg
paper, newsprint/[RoW] paper production, newsprint, virgin	2,32E+09	kg
copper/[RoW] copper production, primary	3,46E+08	kg
aluminium oxide/[GLO] aluminium oxide production	5,87E+09	kg
gold/[RoW] gold production	4,57E+04	kg

computer, desktop, without screen//[GLO] computer production, desktop, without screen	3,91E+06	p
display, liquid crystal, 17 inches//[GLO] display production, liquid crystal, 17 inches	3,91E+06	p
soap//[RoW] soap production	1,87E+09	kg
polyethylene, high density, granulate//[RoW] polyethylene production, high density, granulate	7,49E+08	kg
acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state//[RoW] acrylic varnish production, product in 87.5% solution state	1,13E+09	kg
red meat, live weight//[GLO] cattle for slaughtering, live weight to generic market for red meat, live weight	1,84E+10	kg
cow milk//[RoW] milk production, from cow	5,48E+09	kg
printed paper, offset//[RoW] offset printing, per kg printed paper	6,04E+08	kg
passenger car, petrol/natural gas//[GLO] passenger car production, petrol/natural gas	2,80E+09	kg
lorry, 16 metric ton//[RoW] lorry production, 16 metric ton	1,64E+05	p
electric bicycle//[RoW] electric bicycle production	1,93E+06	p
electricity, high voltage//[BR] electricity, high voltage, production mix	5,32E+11	kWh