

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

CASSIANO MORO PIEKARSKI

**PROPOSTA DE MELHORIA DO DESEMPENHO AMBIENTAL
ASSOCIADO AO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DO PAINEL DE
MADEIRA MDF**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2013

CASSIANO MORO PIEKARSKI

**PROPOSTA DE MELHORIA DO DESEMPENHO AMBIENTAL
ASSOCIADO AO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DO PAINEL DE
MADEIRA MDF**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco

PONTA GROSSA

2013

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.09/13

P613 Piekarski, Cassiano Moro

Proposta de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da
produção do painel de madeira MDF / Cassiano Moro Piekarski. -- Ponta Grossa:
2013.

147 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do
Paraná. Ponta Grossa, 2013.

1. Ciclo de vida do produto - Avaliação. 2. Impacto ambiental - Avaliação. 3.
Indústria madeireira. I. Francisco, Antonio Carlos de. II. Universidade Tecnológica
Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. III. Título.

CDD 670.42



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação Nº **224/2013**

PROPOSTA DE MELHORIA DO DESEMPENHO AMBIENTAL ASSOCIADO AO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DO PAINEL DE MADEIRA MDF

por

Cassiano Moro Piekarski

Esta dissertação foi apresentada às **10 horas e 30 minutos de 01 de março de 2013** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Gestão Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Osvaldo Luiz Gonçalves Quelhas
(UFF)

Prof. Dr. Daniel Poletto Tesser (UTFPR)

Prof^a . Dr^a. Joseane Pontes (UTFPR)

Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco
(UTFPR) - *Orientador*

Visto do Coordenador

Prof. Dr. João Luiz Kovaleski (UTFPR)
Coordenador do PPGEP

A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR – CÂMPUS PONTA GROSSA

AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho se deu mediante muito estudo, dedicação, e, principalmente, oportunidades. Neste sentido, cabe aqui agradecer àqueles que contribuíram, das mais variadas formas, para o alcance dos resultados findados.

Primeiramente a Deus, pelas bênçãos, proteção e forças a mim concebidas.

Aos meus pais, Mara Lucia Moro e Marcelo Piekarski, por toda orientação, amor e educação, os quais puderam me proporcionar incontáveis oportunidades. Sou eternamente grato aos seus esforços para meu desenvolvimento.

À minha namorada, Stella, por todo apoio, amor e compreensão a mim confiados. Seu carinho e sua amizade foram combustíveis essenciais para o alcance dos meus objetivos neste último ano.

Às minhas irmãs, Camilla e Caroline, pela paciência e pelos momentos de distração oferecidos, principalmente nas etapas finais deste trabalho. E a toda minha família que sempre esteve me apoiando e incentivando.

Ao meu orientador, professor e grande amigo, Antonio Carlos de Francisco. Sou grato pelas oportunidades, pelos ensinamentos e pela confiança a mim acreditada.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, incluindo professores, servidores, alunos, funcionários, e, em especial, os colegas do LESP, que auxiliaram, das mais variadas maneiras, no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores, Osvaldo Quelhas, Daniel Poletto Tesser e Joseane Pontes, pelas sugestões e contribuições prestadas para esta dissertação.

À empresa que colaborou com o fornecimento de dados e informações que sustentam este trabalho. Em especial, ao gestor que tomou frente deste projeto, por seu interesse, colaboração e prestatividade.

Ao SAGE/COPPE/UFRJ pela oportunidade de realização do treinamento avançado do software Umberto®, ministrado pela ifu Hamburg GmbH.

A CAPES/CNPQ e ao Programa de Assistência ao Ensino (PAE), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelo apoio financeiro.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelos recursos, pela estrutura e pela excelência em ensino nestes últimos seis anos, entre a graduação e o mestrado em Engenharia de Produção.

RESUMO

PIEKARSKI, Cassiano Moro. **Proposta de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF**. 2013. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2013.

A presente pesquisa objetivou propor ações de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF, através da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A consecução deste estudo acompanhou as diretrizes normativas das normas NBR ISO 14040 e 14044. Para procedimentos de cálculos e modelagem de cenários da produção do painel, utilizou-se o software Umberto® v.5.6, junto à base de dados de inventários do ciclo de vida Ecoinvent v.2.2. A proposta de ações de melhoria do desempenho ambiental da produção do painel MDF foi formulada com base nos resultados obtidos na aplicação da ACV. Diante do exposto, construiu-se o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) para a produção do painel de madeira MDF, em condições da cadeia produtiva brasileira. A partir dos dados do ICV, avaliaram-se os impactos do ciclo de vida da produção do painel, através dos métodos CML (2001), EDIP (1997) e USEtox (2008). As categorias de impactos avaliadas foram: potencial de acidificação, aquecimento global, depleção da camada de ozônio, depleção de recursos abióticos, formação fotoquímica de ozônio troposférico, ecotoxicidade, eutrofização, e toxicidade humana. Os resultados apontaram seis pontos potenciais contribuidores às categorias de impactos (*hotspots*): consumo de gás natural utilizado na planta térmica, resina UF (ureia formaldeído), consumo de energia elétrica, consumo de resíduos de madeira na planta térmica, consumo de cavacos de madeira e o transporte dos cavacos de madeira até a fábrica. De acordo com os *hotspots* identificados formularam-se as ações para melhoria do desempenho ambiental do produto. As ações foram analisadas sensitivamente em diferentes cenários a fim de verificar a eficiência na redução dos impactos potenciais observados. A proposta de melhoria do desempenho ambiental compreendeu as seguintes ações: extinção do consumo de gás natural na planta térmica, redução proporcional de combustíveis de madeira que não receberam tratamento químico prévio, realização de análise especializada para verificação de eficiência de combustão em planta térmica, redução do consumo de energia elétrica, redução no consumo da resina UF, redução no consumo de madeira e minimização de distância dos fornecedores de madeira. Quanto às análises sensitivas de cenários alternativos que podem incorporar a proposta, destaca-se o fato da extinção do consumo de gás natural na planta térmica, onde se tem uma redução de aproximadamente 30% nos impactos potenciais de depleção de recursos abióticos e da camada de ozônio. A proposta formulada nesta dissertação subsidia e orienta ações estratégicas sustentáveis que, por serem avaliadas em uma abordagem de ciclo de vida, não se limitam somente ao processo produtivo ou a uma única atividade operativa.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Avaliação de impacto ambiental. Desempenho ambiental. Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Painéis de madeira. Painel de fibras de média densidade (MDF).

ABSTRACT

PIEKARSKI, Cassiano Moro. **Proposal for improvement of environmental performance associated with MDF production life cycle**. 2013. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2013.

The present research aims to propose actions in order to improve the environmental performance associated with the MDF production life cycle, by means of Life Cycle Assessment (LCA) application. This study was conducted following the guidelines of regulatory standards ISO 14040 and 14044. In order to calculations procedures and panel production scenarios modeling was used the Umberto® software v.5.6, with the life cycle inventory database entitled Ecoinvent v.2.2. The actions proposed in order to improve the environmental performance of the MDF production were formulated based on the LCA results. Faced with these peculiarities, was constructed the Life Cycle Inventory (LCI) for MDF production, under the Brazilian production chains conditions. Based on LCI data, was evaluated the impacts of panel production life cycle by the methods CML (2001), EDIP (1997) and USEtox (2008). The categories of impacts assessed were: acidification potential, global warming, ozone layer depletion, abiotic resource depletion, photochemical formation of tropospheric ozone, ecotoxicity, eutrophication and human toxicity. The results showed six potential contributors to impacts categories (hotspots): consumption of natural gas in the thermal plant, resin UF (urea formaldehyde), electricity consumption, consumption of wood waste in thermal plant, consumption of wood chips, and transportation of wood chips to industry. According to the hotspots identified were formulated actions in order to improve the environmental performance of the product. The actions were sensitively analyzed in different scenarios in order to verify the effectiveness in reducing potential impacts. The proposal for improving the environmental performance was included the following actions: extinction of natural gas used in the thermal plant, proportional reduction of wood fuel that not have been chemically treated, accomplish specialized analysis to check the efficiency of combustion in thermal plant, reduction the electricity consumption, reduction of resin UF consumption, reduction of wood consumption and minimize the distances of wood suppliers. As regards the sensitive analysis of alternative scenarios that can incorporate the proposal, we highlight the fact that the extinction of natural gas consumption in the thermal plant can reduce approximately 30% of the potential impacts of depletion of resources abiotic and ozone layer. The proposal presented in this research subsidizes and guides sustainable strategic actions that, by virtue of being evaluated on a life cycle approach, are not only limited to the production process or a single operational activity.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA). Environmental Impact Assessment. Environmental performance. Wood based panels. Medium Density Fibreboard (MDF).

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1 - Estrutura da Pesquisa..... | 20 |
| Figura 2 – As fases da ACV e seus relacionamentos | 23 |
| Figura 3 - Procedimento simplificados para a análise de inventário..... | 27 |
| Figura 4 - Elementos da fase de AICV | 30 |
| Figura 5 - Relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV | 32 |
| Figura 6 - Categorias de impacto a <i>midpoint</i> e <i>endpoint</i> | 35 |
| Figura 7 – Representação de componentes de rede do Umberto® | 40 |
| Figura 8 - Painéis MDF sem revestimentos..... | 43 |
| Figura 9- Evolução da participação de cada tipo de painel no consumo mundial | 46 |
| Figura 10 - Evolução da participação de painéis de madeira reconstituída no consumo brasileiro | 46 |
| Figura 11 - Localização das fábricas de painéis de madeira reconstituída no Brasil em 2009 | 47 |
| Figura 12 - Oferta x demanda de painéis de madeira | 48 |
| Figura 13 - Diagrama do sistema produtivo do MDF para ACV – Fronteira <i>gate-to-gate</i> | 49 |
| Figura 14 - Fronteira <i>cradle-to-gate</i> da produção do painel MDF..... | 53 |
| Figura 15 - Instruções para preenchimento do questionário | 63 |
| Figura 16 - Sistema de produto e fronteiras definidas para a produção do painel MDF | 68 |
| Figura 17 - Balanço de energia térmica para produção de 1,0 m ³ do MDF estudado | 95 |
| Figura 18 - Dependência de fontes renováveis e não renováveis na produção do MDF | 96 |
| Figura 19 - Potencial de acidificação estratificado, <i>cradle-to-gate</i> (CML 2001)..... | 99 |
| Figura 20 - Potencial de aquecimento global estratificado, <i>cradle-to-gate</i> (CML 2001) | 101 |
| Figura 21 - Potencial de eutrofização estratificado, <i>cradle-to-gate</i> (CML 2001)..... | 103 |
| Figura 22 - Potencial de ecotoxicidade estratificado, <i>cradle-to-gate</i> (USEtox)..... | 104 |
| Figura 23 - Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico estratificado, <i>cradle-to-gate</i> (CML 2001) | 106 |
| Figura 24 - Potencial de toxicidade humana estratificado, <i>cradle-to-gate</i> (USEtox 2008) | 108 |
| Figura 25 - Potencial de depleção de recursos abióticos estratificado, <i>cradle-to-gate</i> (CML 2001) | 110 |
| Figura 26 - Potencial de depleção de camada de ozônio estratificado, <i>cradle-to-gate</i> (CML 2001) | 111 |
| Figura 27 – Matriz de relacionamento dos pontos críticos potenciais (<i>hotspots</i>) | 114 |
| Figura 28 - Análise sensitiva para alterações em gás natural (<i>cradle-to-gate</i>)..... | 117 |

| | |
|---|-----|
| Figura 29 - Análise sensitiva para alterações em consumo de energia elétrica (<i>cradle-to-gate</i>)..... | 120 |
| Figura 30 - Análise sensitiva para alterações em consumo de resina UF (<i>cradle-to-gate</i>)..... | 122 |
| Figura 31 - Análise sensitiva para alterações em consumo e transporte de cavaco de madeira (<i>cradle-to-gate</i>)..... | 124 |
| Figura 32 - Modelagem sistema de produção do painel MDF, fronteira <i>cradle-to-gate</i> | 146 |
| Figura 33 – Modelagem dos subsistemas sistema de produção do painel MDF, fronteira <i>cradle-to-gate</i> | 147 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Objetivos das Etapas da fase de interpretação da ACV..... | 33 |
| Quadro 2 - Principais métodos para AICV | 36 |
| Quadro 3 - Tipos e Características de Painéis de Madeira Reconstituída | 44 |
| Quadro 4 - Levantamento de Estudos de ACV em painéis de madeira reconstituída tipo MDF..... | 55 |
| Quadro 5 - Métodos de AICV utilizados em estudos de ACV de painéis de madeira reconstituída..... | 57 |
| Quadro 6 - Considerações à cerca sistemas incluídos e excluídos da ACV do painel MDF | 70 |
| Quadro 7 - Categorias de impactos contempladas nos métodos de AICV do estudo | 74 |
| Quadro 8 - Origem de dados secundários utilizados no estudo | 76 |
| Quadro 9 - Atualização da matriz elétrica brasileira de 2005 para 2010 | 77 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Resultado da análise de inventário do processo 1 - Pátio de cavacos | 82 |
| Tabela 2 - Resultado da análise de inventário do processo 2 - Peneiras..... | 83 |
| Tabela 3 - Resultado da análise de inventário do processo 3 – Desfibrador | 84 |
| Tabela 4 - Resultado da análise de inventário do processo 4 – <i>Blowline</i> | 85 |
| Tabela 5 - Resultado da análise de inventário do processo 5 - Secador | 86 |
| Tabela 6 - Resultado da análise de inventário do processo 6 - Formação..... | 87 |
| Tabela 7 - Resultado da análise de inventário do processo 7 – Prensa..... | 88 |
| Tabela 8 - Resultado da análise de inventário do processo 8 - Resfriador | 89 |
| Tabela 9 - Resultado da análise de inventário do processo 9 - Lixadeira | 90 |
| Tabela 10 - Resultado da análise de inventário do processo 10 – Corte | 91 |
| Tabela 11 - Resultado da análise de inventário do processo 11 – Planta Térmica I. | 92 |
| Tabela 12 - Resultado da análise de inventário do processo 12 – Planta Térmica II | 93 |
| Tabela 13 - Inventário para produção de 1 m ³ de MDF (<i>gate-to-gate</i>)..... | 94 |
| Tabela 14 - Inventário de emissões atmosféricas na produção de 1,0 m ³ de MDF (<i>gate-to-gate</i>)..... | 97 |
| Tabela 15 - Potencial de acidificação por m ³ de painel MDF produzido..... | 99 |
| Tabela 16 Potencial de Aquecimento Global por m ³ de painel MDF produzido | 100 |
| Tabela 17 - Potencial de eutrofização por m ³ de painel MDF produzido | 102 |
| Tabela 18 - Potencial de Ecotoxicidade por m ³ de painel MDF produzido – Método USEtox 2008 | 104 |
| Tabela 19 - Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico por m ³ de painel MDF produzido | 106 |
| Tabela 20 - Potencial de Toxicidade humana por m ³ de painel MDF produzido | 107 |
| Tabela 21 - Potencial de Depleção de recursos abióticos por m ³ de painel MDF produzido..... | 109 |
| Tabela 22 - Potencial de Depleção da camada de ozônio por m ³ de painel MDF produzido..... | 111 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACV | Avaliação do Ciclo de Vida |
| AICV | Avaliação de Inventário de Ciclo de Vida |
| BNDES | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social |
| BR | Brasil |
| CFCs | Clorofluorcarbonos |
| CML | <i>Center for Environmental Science</i> |
| CTU | <i>Comparative Toxic Unit</i> |
| DfE | <i>Design for Environmental</i> |
| EPA | <i>Environmental Protection Agency (United States)</i> |
| EPE | Empresa de pesquisa energética |
| FID | Detector por Ionização de Chama |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| HDF | <i>High Density Fibreboard</i> |
| ICV | Inventário de Ciclo de Vida |
| ILCD | <i>International Reference Life Cycle Data System</i> |
| LCA | <i>Life Cycle Assessment</i> |
| MDF | <i>Medium Density Fiberboard</i> |
| MDP | <i>Medium Density Particleboard</i> |
| NBR | Norma Brasileira Registrada |
| OSB | <i>Oriented Strand Board</i> |
| PA | Potencial de Acidificação |
| PAF | <i>Potentially Affected Fraction of Species</i> |
| PAG | Potencial de Aquecimento Global |
| PDCO | Potencial de Depleção da Camada de Ozônio |
| PDRA | Potencial de Depleção dos Recursos Abióticos |
| PE | Potencial de Eutrofização |
| PFFOT | Potencial de Formação Fotoquímica de Ozônio Troposférico |
| PLC | Controlador Lógico Programável |
| PTH | Potencial de Toxicidade Humana |
| SDF | <i>Super Density Fiberboard</i> |
| TC | Comitê Técnico |
| UF | Ureia Formaldeído |
| VOCs | Compostos Orgânicos Voláteis |

LISTA DE ACRÔNIMOS

| | |
|---------|--|
| ABIPA | Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira |
| ABRAF | Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas |
| CETESB | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo |
| CORRIM | <i>Consortium for Research on Renewable Industrial Materials</i> |
| EDIP | <i>Environmental Design for Industrial Products</i> |
| ETA | Estação de Tratamento de Água |
| GLO | <i>Geographical area Ecoinvent code for Global</i> |
| IfEU | Instituto de Pesquisa Ambiental e Energética de Heidelberg |
| IfU | Instituto de Informática Ambiental da Universidade de Hamburgo |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| NOx | Óxidos de Nitrogênio |
| PEcotox | Potencial de Ecotoxicidade |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| RER | <i>Geographical area Ecoinvent code for Europe</i> |
| SETAC | <i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i> |
| SOx | Óxidos de Enxofre |
| UNEP | <i>United Nations Environment Programme</i> |
| USEPA | <i>United States Environmental Protection Agency</i> |
| WRAP | <i>Waste & Resources Action Programme</i> |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 OBJETIVOS..... | 16 |
| 1.1.1 Objetivo Geral..... | 16 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos..... | 16 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA..... | 17 |
| 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO | 19 |
| 2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA..... | 21 |
| 2.1 ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA ACV..... | 23 |
| 2.1.1 Definição de Objetivo e Escopo..... | 25 |
| 2.1.2 Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)..... | 26 |
| 2.1.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)..... | 29 |
| 2.1.4 Interpretação..... | 31 |
| 2.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CICLO DE VIDA | 34 |
| 2.2.1 CML 2001 | 37 |
| 2.2.2 EDIP 1997 | 38 |
| 2.2.3 USEtox 2008..... | 39 |
| 2.3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ACV: <i>SOFTWARE UMBERTO®</i> ..39 | |
| 3 PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA MDF..... | 43 |
| 3.1 CENÁRIO MERCADOLÓGICO DOS PAINÉIS MDF..... | 45 |
| 3.2 ETAPAS DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE MDF..... | 49 |
| 4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO MDF – ESTADO DA ARTE..... | 54 |
| 4.1 MÉTODOS DE AICV ADOTADOS EM ACV DE PAINÉIS DE MADEIRA..... | 57 |
| 5 METODOLOGIA..... | 59 |
| 5.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA..... | 59 |
| 5.2 APLICAÇÃO DA PESQUISA..... | 59 |
| 5.3 PASSOS PARA DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA..... | 60 |
| 5.4 PROCEDIMENTOS PARA COLETA E ANÁLISE DE DADOS | 62 |
| 5.5 <i>SOFTWARE</i> DE ACV E BASE DE DADOS UTILIZADOS..... | 64 |
| 5.6 SELEÇÃO E CONSIDERAÇÕES DOS MÉTODOS DE AICV | 64 |
| 6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DO PAINEL DE MADEIRA MDF | 66 |
| 6.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO..... | 66 |
| 6.1.1 Objetivos da ACV..... | 66 |
| 6.1.2 Escopo da ACV..... | 67 |
| 6.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA | 81 |
| 6.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CICLO DE VIDA DO PAINEL MDF..... | 98 |
| 6.3.1 Potencial de Acidificação (PA)..... | 98 |
| 6.3.2 Potencial de Aquecimento Global (PAG)..... | 100 |

| | |
|---|------------|
| 6.3.3 Potencial de Eutrofização (PE) | 102 |
| 6.3.4 Potencial de Ecotoxicidade (PEcotox) | 103 |
| 6.3.5 Potencial de Formação Fotoquímica de Ozônio Troposférico (PFFOT) | 105 |
| 6.3.6 Potencial de Toxicidade Humana (PTH) | 107 |
| 6.3.7 Potencial de Depleção de Recursos Abióticos (PDRA) | 109 |
| 6.3.8 Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (PDCO)..... | 111 |
| 6.4 INTERPRETAÇÃO..... | 112 |
| 7 PROPOSTA DE AÇÕES DE MELHORIA DO DESEMPENHO AMBIENTAL | 116 |
| 7.1 ALTERAÇÕES QUANTO AO CONSUMO DE GÁS NATURAL: ANÁLISE DE CENÁRIOS..... | 116 |
| 7.2 ALTERAÇÕES QUANTO AOS RESÍDUOS DE MADEIRA UTILIZADOS COMO COMBUSTÍVEL PARA PLANTA TÉRMICA..... | 117 |
| 7.3 ALTERAÇÕES QUANTO AO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA: ANÁLISE DE CENÁRIOS..... | 119 |
| 7.4 ALTERAÇÕES QUANTO AO CONSUMO DE RESINA UF: ANÁLISE DE CENÁRIOS..... | 121 |
| 7.5 ALTERAÇÕES QUANTO AO TRANSPORTE E CONSUMO DE MADEIRA (CAVACO): ANÁLISE DE CENÁRIOS | 122 |
| 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 125 |
| 8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 129 |
| REFERÊNCIAS..... | 130 |
| APÊNDICE A - Questionário de Pesquisa | 142 |
| APÊNDICE B – Modelagem do sistema de produção do painel de madeira MDF realizado no software Umberto (cradle-to-gate)..... | 145 |

1 INTRODUÇÃO

A crescente conscientização por parte de organizações e consumidores em relação a temas como sustentabilidade, economia verde, ecologia industrial, e outros afins, caracterizam um novo desafio à indústria moderna: planejar, direcionar e orientar ações efetivas com vista à melhora de desempenho ambiental associado ao ciclo de vida de produtos e serviços.

Neste aspecto, dentre diversas metodologias utilizadas para analisar o perfil ambiental de produtos, processos e serviços, Löfgren, Tillman e Rinde (2011) categorizam a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) como a metodologia mais importante na gestão ambiental industrial moderna. Esta afirmação, segundo Cambria e Pierangeli (2012) justifica-se pela unicidade da ACV em identificar e quantificar impactos ambientais de forma a analisar e elencar quais fases do ciclo de vida do produto possui impacto ambiental mais considerável.

A ACV vem sendo aplicada em diversos setores e ramos da indústria mundial e tornou-se elemento-chave para desenvolver ações na esfera ambiental (GUINÉE, 2011). Nos setores de produtos de origem florestais, em especial o de painéis de madeira, os estudos de ACV são relativamente novos e arquitetam um importante campo da ciência onde a aplicação da ACV permite avaliar impactos, propor alternativas para melhora de desempenho ambiental de diferentes sistemas de produção ou fases do ciclo de vida, conhecer informações ambientais ainda desconhecidas, e voltar estudos científicos para áreas mais impactantes (GONZÁLEZ-GARCIA et al., 2009a; JEFFERIES et al., 2012).

O setor de painéis de madeira no Brasil é marcado pelo importante destaque do painel de madeira reconstituída MDF (*Medium Density Fibreboard*). Este apresentou o maior crescimento do setor durante a última década. Em 2011, o MDF assumiu a posição de maior capacidade nominal instalada de produção de painéis no país (4.860.000 m³/ano), superando a marca que até 2010 era do painel MDP (*Medium Density Particleboard*). O MDF apresenta também o maior consumo interno de painéis de madeira no Brasil (3.171.806 m³/ano) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAINEIS DE MADEIRA – ABIPA, 2012a).

As tecnologias dos processos produtivos das indústrias brasileiras de MDF são similares ao estado da arte da tecnologia mundial (BNDES, 2010; RIVELA, MOREIRA E FEIJOO, 2007). Entretanto, as características inerentes a cada cadeia

de produtiva de diferentes países (por exemplo, a composição da matriz elétrica, meios de transporte de insumos, destinação final de resíduos, entre outros) podem apresentar variações que resultam em diferentes impactos sobre o meio ambiente. Na perspectiva de ciclo de vida, o mesmo painel MDF produzido em diferentes sistemas produtivos pode apresentar diferentes desempenhos ambientais.

A realização de um estudo de ACV do painel de madeira MDF, produzido em características da cadeia produtiva brasileira, colabora com a identificação de pontos potenciais de melhoria. Com isso, torna-se possível formular ações que melhoram o desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. As ações podem promover, além de ganhos ambientais, diferenciais competitivos à indústria produtora do painel.

Neste contexto, o presente trabalho se propõe a responder o seguinte problema de pesquisa: **Quais ações se mostram efetivas para a melhora do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida de produção do painel MDF mediante a aplicação da ACV?**

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Propor ações de melhoria de desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida da produção do painel MDF, mediante a Avaliação do Ciclo de Vida.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Construir o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) da produção do painel de madeira MDF.
- Avaliar os impactos ambientais associados à produção do painel de madeira MDF, utilizando diferentes métodos de avaliação.
- Identificar as atividades de produção que possuem contribuição significativa para os impactos potenciais totais associados ao produto.
- Realizar análises sensíveis de cenários alternativos que possam subsidiar a incorporação das propostas de ações de melhoria.

1.2 JUSTIFICATIVA

As questões ambientais antes consideradas como custos, atendimento a conformidades, concessão de licença de operações ou apenas prevenção de riscos, passaram a ser vistas como vantagem competitiva, gerando criação de valor e inovação de incentivos (MATOS e QUELHAS, 2008). Neste panorama, ferramentas que subsidiam conhecimentos mais aprofundados sobre a temática ambiental, como a ACV, passaram a ser mais valorizadas e incorporadas na indústria moderna.

A aplicação da ACV fornece resultados amplamente utilizados para a geração de valor em organizações e nas grandes áreas da Engenharia de Produção, tais como Gestão Ambiental, Gestão da Produção e Operações, Planejamento Estratégico e Sustentabilidade Corporativa.

Nesse contexto, a ACV é vista como instrumento de gestão sustentável nas organizações e, também, na academia. A ACV pode contribuir para a identificação de pontos de melhoria dos aspectos ambientais do MDF em diversos pontos de seu ciclo de vida; na comparação de sistemas produtivos e produtos; na tomada de decisão estratégica (planejamento estratégico, definição de prioridades, projetos e reengenharia de processos e produtos); na seleção de indicadores de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição; e no *marketing* corporativo (por exemplo, uma declaração ambiental, programa de rotulagem ecológica ou declaração ambiental de produto) (ABNT, 2009a).

Tais benefícios citados são provenientes de uma propulsão mundial de estudos de ACV que se deu na década de 90, onde se voltaram pesquisas ao ciclo de vida dos produtos de maior representatividade em termos de produção e consumo, entre eles os de origem florestal. Desde que se voltaram esforços para aplicação da ACV em produtos florestais naquela década (RIVELA, MOREIRA e FEIJOO, 2007), os painéis de madeira industrializados ganharam destaque somente no final da década de 2000 devido ao aumento da capacidade produtiva mundial e ao acréscimo contínuo da demanda de painéis de madeira para confecção de móveis e arquitetura de interiores.

Estudos recentes sobre o desempenho ambiental de painéis de madeira, sobretudo do MDF (WILSON, 2010; RIVELA, MOREIRA e FEIJOO, 2007; ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2009; WRAP, 2009), foram desenvolvidos predominantemente na Europa, EUA e Canadá, com intuito de fornecer informações

ambientais do painel, avaliar seus impactos, propor melhorias no sistema de produção, direcionar estudos científicos para redução de impactos ambientais, compondo um grupo de decisões tomadas voltadas à sustentabilidade.

No Brasil, o MDF é o painel de madeira mais consumido e o que se apresenta com maior capacidade produtiva (ABIPA, 2012a). Apesar da importante representatividade para a economia nacional (BNDES, 2010; ABRAF, 2012), não existiam estudos anteriores a este para a avaliação dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida de produção do MDF produzido nas condições brasileiras. Ou seja, considerando o ciclo de vida e as características inerentes às cadeias produtivas de insumos nacionais. A ACV da produção do painel MDF possibilita a identificação de pontos potenciais de melhoria do desempenho ambiental, em uma abordagem até então não avaliada no Brasil: a do ciclo de vida do produto.

Além da originalidade da aplicação da pesquisa em uma indústria produtora de MDF no Brasil, a representatividade do setor de painéis de madeira nacional caracteriza-se como outro ponto favorável para os objetivos propostos nesta dissertação. De acordo com ABRAF (2012), nos últimos 12 anos (2000-2011), a produção de painéis de madeira no Brasil cresceu de 2,7 milhões de toneladas para 6,5 milhões, um crescimento médio de 8,3% ao ano. O consumo de painéis também obteve um incremento médio de 8,7% ao ano no país. Se comparado ao crescimento do PIB (Produto Interno Bruto) entre 1997 e 2008, o maior crescimento se deu pelo painel MDF, onde cresceu em média 11,8% para cada incremento de 1% do PIB nacional no período (BNDES, 2010). O destaque do crescimento do setor é protagonizado pelo painel MDF, este se apresenta com o maior consumo interno e a maior capacidade produtiva instalada de painéis de madeira no Brasil (ABRAF, 2012a).

Para a ABRAF (2012), as perspectivas para esse mercado são muito favoráveis à medida que a modernização tecnológica do parque fabril, o desempenho da construção civil/setor imobiliário e a temática de sustentabilidade se firmam como fatores decisivos para o desenvolvimento do setor.

De acordo com o World Panel Industry (2012), as tecnologias e os processos de fabricação do painel MDF são bastante similares ao redor do mundo por se tratarem de uma tecnologia recente. Desta forma, torna-se possível direcionar estudos científicos para áreas onde o impacto ambiental associado ao ciclo de vida

do MDF é mais efetivo e representativo, incluindo a análise de diferentes cenários produtivos. Segundo Benetto, Becker e Welfring (2009), a ACV é considerada uma das ferramentas mais pertinentes para identificar oportunidades de melhoria em comparação com projetos alternativos na perspectiva ambiental.

Em suma, pode-se afirmar que os principais fatores que justificam os objetivos traçados para esta dissertação são: a representatividade no contexto econômico nacional do painel MDF, bem como sua capacidade produtiva instalada e potencial de consumo interno, a originalidade da aplicação, subsídios em pesquisas das grandes áreas da Engenharia de Produção, e a grande inovação/engenharia deste estudo que consiste na formulação de propostas de melhorias no desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF.

Além destes expostos, um dos produtos gerado por este estudo é a construção de um inventário do ciclo de vida da produção do painel MDF. Este inventário, além de contribuir para a construção da base de dados de inventários do ciclo de vida brasileiros, poderá servir de apoio para outros trabalhos científicos de ACV para comparação de desempenho ambiental de produtos que utilizem o MDF produzido no Brasil como matéria-prima, principalmente em produtos mobiliários.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação encontra-se estruturada em oito capítulos. O primeiro capítulo apresentou a contextualização do tema, trazendo o problema de pesquisa, os objetivos e a justificativa do estudo.

Os capítulos 2, 3 e 4 tratam da fundamentação teórica deste trabalho. O capítulo 2 aborda a Avaliação do Ciclo de Vida, explanando sobre a estrutura metodológica sugerida pela ISO 14040, sobre métodos de avaliação de impactos de ciclo de vida e ferramentas computacionais para ACV. O terceiro capítulo trata dos painéis de madeira MDF, caracterizando o cenário mercadológico e as etapas do ciclo de vida de sua produção. O capítulo 4 explana sobre ACVs de painéis de madeira MDF, exibindo o estado da arte de estudos realizados no cenário mundial.

A metodologia do trabalho está exposta no quinto capítulo. Enquanto que os resultados desta dissertação estruturam-se nos capítulos 6 e 7.

O sexto capítulo apresenta a avaliação do ciclo de vida do painel de madeira

MDF. Enquanto que o capítulo 7 elenca a proposta de ações de melhorias elaborada e as análises sensitivas de cenários alternativos que possam subsidiar a incorporação das propostas de ações de melhoria. Por fim, o capítulo 8 apresenta as considerações finais do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

Com intuito de fornecer uma visão geral do desenvolvimento deste estudo, a Figura 1 ilustra um fluxograma dos passos delineados nesta dissertação.

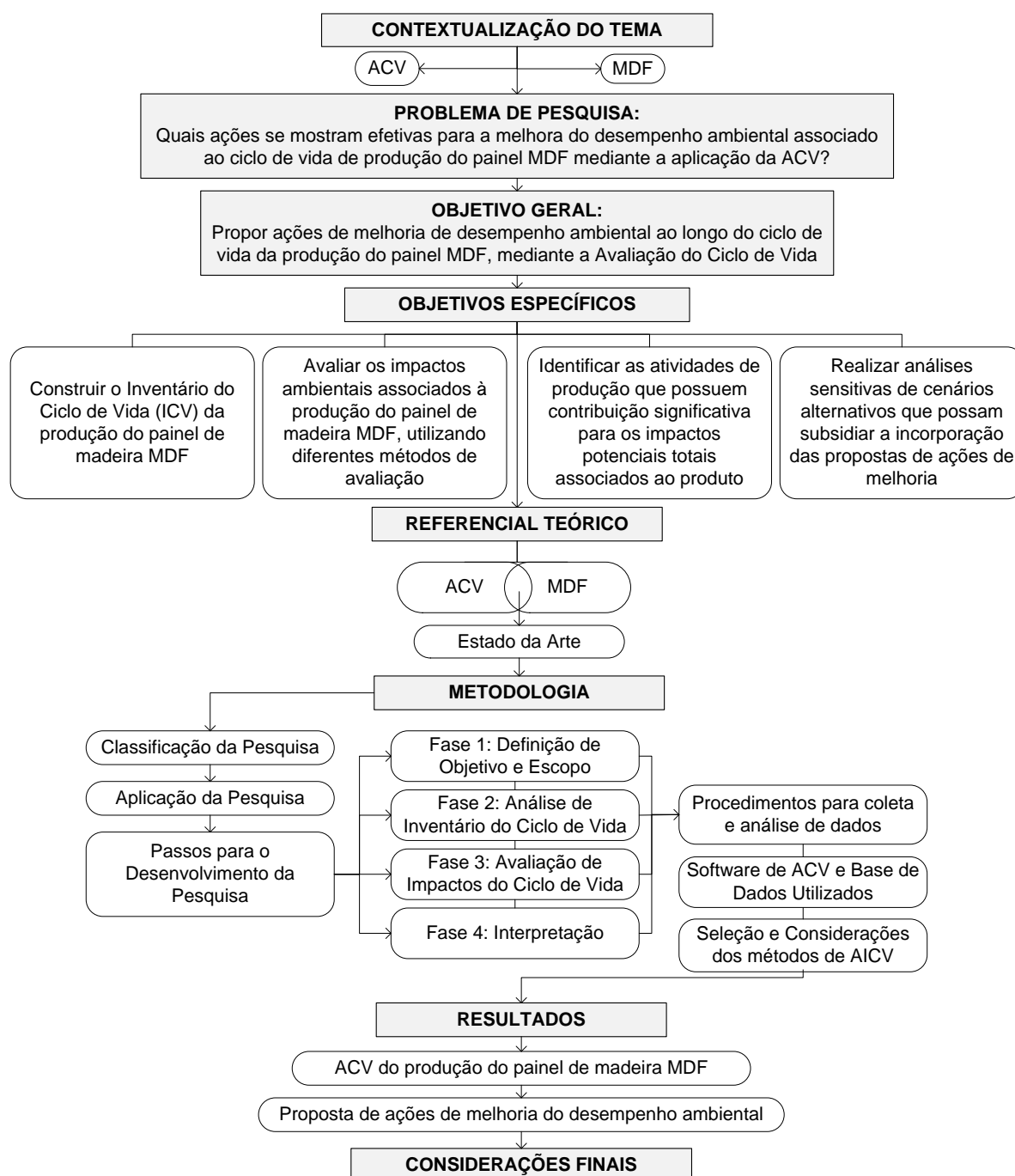


Figura 1 - Estrutura da Pesquisa
Fonte: Autoria Própria.

2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Ao passar dos anos, organizações têm demonstrado crescente aumento na responsabilidade ambiental e têm promovido ações ambientais que também gerem benefícios sociais e econômicos. É neste contexto que surgem iniciativas e formas de gestão sustentáveis.

A ótica de sustentabilidade discutida neste trabalho está apoiada no conceito do *Triple Bottom Line*, onde a interseção das dimensões ambientais, sociais e econômicas compõe a sustentabilidade (UNEP, 2007). Na comunidade empresarial, o termo *triple bottom line* foi coíncido para explicar a importância de se alcançar resultados sustentáveis, ou seja, buscar ações que gerem benefícios nas esferas ambientais, econômicas e sociais (ELKINGTON, 1997).

A utilização de metodologias, técnicas e ferramentas que promovam a sustentabilidade no ambiente corporativo vem se tornando, além de um desejo intrínseco de stakeholders, uma necessidade para a perenidade e competitividade da indústria moderna.

Neste âmbito, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que permite quantificar e avaliar o desempenho ambiental¹ de um produto ao longo de todo seu ciclo de vida. A característica única da ACV em focar sua aplicação na perspectiva do ciclo de vida do produto (FINNVEDEN et al., 2009) faz com que se forneça grande parte de informações ambientais necessárias para interpretar, prever e gerar soluções sustentáveis para sistemas industriais (BLENGINI et al., 2012).

De acordo com Guinée et al. (2011), a ACV tem se desenvolvido rapidamente nas últimas três décadas. O desenvolvimento da metodologia partiu de uma mera análise de energia e de cargas ambientais de produtos, durante a década de 70, e atualmente, a metodologia vem sendo utilizada vastamente por pesquisadores, organizações e indústrias (GARRIGUES et al., 2012) que buscam quantificar consumos de recursos naturais, emissões e impactos ambientais e de saúde associados a produtos e serviços (WELZ, HISCHER, HILTY; 2011).

¹ De acordo com a definição apresentada na ISO 14001:2004 (ABNT, 2004), entende-se por desempenho ambiental os resultados mensuráveis da gestão de uma organização sobre seus aspectos ambientais.

A metodologia da ACV é estruturada e normatizada internacionalmente pela Organização Internacional para Normalização (ISO), pertencendo às normas ISO 14040 e 14044 (ISO, 2006a; ISO, 2006b). Ambas são consideradas as principais e mais importantes normas para avaliação ambiental baseada no ciclo de vida do produto e servem de base para outras normas mais específicas como ISO 14025 (Declaração de Produto Ambiental), ISO 14067 (Pegada de Carbono), ISO 14045 (Ecoeficiência), entre outras (KLÖPFFER, 2012).

No Brasil, as duas normas que regulam a ACV são:

- ABNT NBR ISO 14040:2009, Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura (ABNT, 2009a);
- ABNT NBR ISO 14044:2009, Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações (ABNT, 2009b).

Ambas foram elaboradas no Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental (ABNT/CB-38), pela comissão de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (CE-38:005. 01). Estas normas são idênticas, em conteúdo técnico, estrutura e redação às normas internacionais ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006, respectivamente, ambas elaboradas pelo TC 207. Elas cancelam e substituem as normas NBR ISO 14041, NBR ISO 14042, e a NBR ISO 14043 (ABNT, 2009a).

De acordo com a ISO 14040 (ABNT, 2009a), a ACV permite avaliar os impactos ambientais potenciais e os recursos utilizados durante todo o ciclo de vida de um produto (por exemplo, desde a aquisição de matérias-primas, envolvendo as etapas de produção, de consumo e disposição final do produto), através do levantamento e compilação de entradas e saídas de um sistema, avaliando os impactos potenciais associados a essas entradas e saídas e interpretando os resultados em relação aos objetivos de estudo.

A perspectiva da ACV identifica e quantifica impactos ambientais de forma a analisar e elencar quais fases do ciclo de vida do produto possui impacto ambiental mais considerável (CAMBRIA e PIERANGELI, 2012). Este é um dos principais propósitos das ACV: a identificação dos chamados “*hotspots*”, termo que segundo Jefferies et al. (2012) é comumente utilizado em estudos ACV para identificar atividades durante o ciclo de vida do produto que possui contribuição significativa para o impacto potencial total associado ao produto.

Outra grande característica da ACV citada por Yan, Humphreys e Holden

(2011) é a unicidade da metodologia que permite a avaliação de diferentes sistemas produtivos através da determinação de impactos relativos a uma unidade de produto, possibilitando avaliar a implementação de melhorias ou alternativas com vistas ambientais para produtos, processos ou serviços.

Guinée (2001) complementa que a utilização da ACV promove ainda benefícios como: possibilitar a escolha entre uma série de produtos comparáveis, promover a concepção de novos produtos, analisar as origens dos problemas relacionados a um determinado produto; possibilitar melhorias por meio da comparação de variantes de um determinado produto.

Tais benefícios qualificam a ACV como uma das mais importantes metodologias na gestão ambiental industrial moderna (LÖFGREN, TILLMAN, E RINDE, 2011). A estrutura metodológica para a ACV é apresentada a seguir.

2.1 ESTRUTURA METODOLÓGICA PARA ACV

A estrutura metodológica da ACV é sugerida pelas ISO 14040 e ISO 14044 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b), e compreende quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. As fases e a interação entre as mesmas são ilustradas na Figura 2.

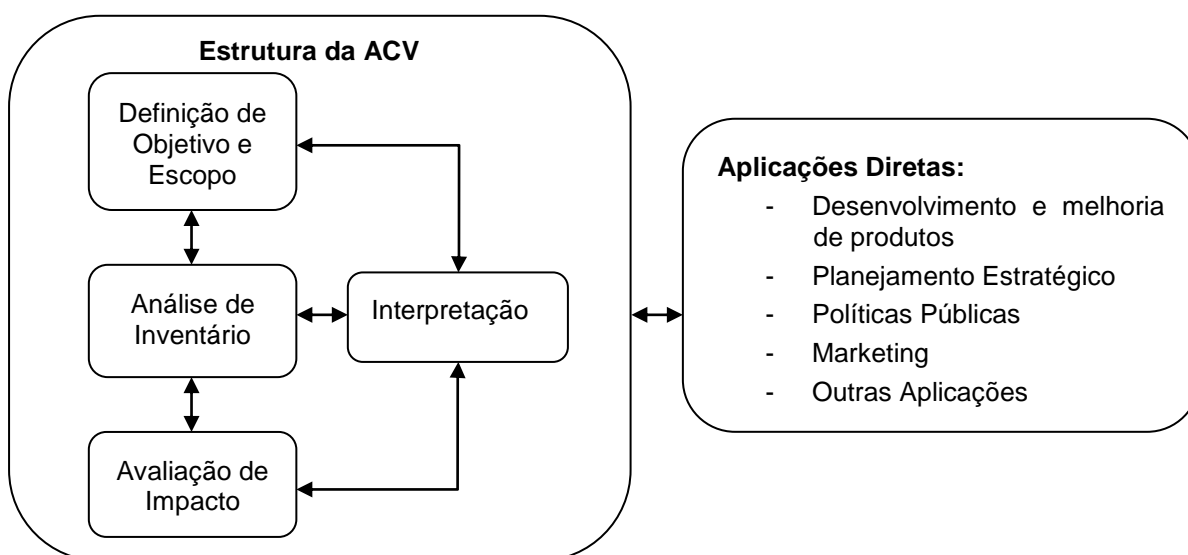


Figura 2 – As fases da ACV e seus relacionamentos
Fonte: ABNT (2009a)

Na fase de objetivo e escopo, a unidade funcional (U.F, na qual todas as entradas e saídas são relacionadas), fronteiras do sistema, procedimentos de

alocações (particionamento de entradas e saídas) são definidos dependendo das pretensões objetivadas no estudo. Para a fase de análise de inventário do ciclo de vida (ICV), as entradas e saídas do estudo são definidas, quantificadas e listadas. O ICV é relacionado com categorias e indicadores de impactos ambientais por meio da Avaliação de Impactos (AICV) e, na quarta fase, interpretando os resultados com os objetivos traçados para a ACV (ABNT, 2009a; YAN, HUMPHREYS, HOLDEN, 2011).

A ACV é uma metodologia dinâmica que permite o fluxo de informações e mudanças em itens das fases ao decorrer do estudo. A ABNT NBR ISO 14040 (2009a, p.7) justifica o exposto afirmando que a Avaliação do Ciclo de Vida possui uma abordagem iterativa. “As fases individuais de uma ACV utilizam os resultados das outras fases. Essa abordagem iterativa dentro e entre fases contribui para a completeza e consistência do estudo e dos resultados relatados”. É possível que o escopo necessite ser ajustado dependendo dos resultados obtidos durante o estudo.

A ACV é composta por algumas características que contribuem para o delineamento e desenvolvimento do estudo de avaliação do ciclo de vida. Entre as características chave definidas pela ISO 14040 (ABNT, 2009a) pode-se mencionar:

- É conveniente que os estudos da ACV envolvam os aspectos ambientais de sistemas de produto de maneira sistêmica e adequada, desde aquisição da matéria-prima até a disposição final;
- O grau de detalhe e o período de tempo de um estudo ambiental podem variar em larga escala de acordo com a definição de objetivo do escopo;
- Convém que o escopo, as suposições, a descrição da qualidade dos dados, as metodologias e a saída de estudos da ACV sejam transparentes.
- Convém que os estudos da ACV discutam e documentem as fontes de dados e que sejam clara e propriamente comunicados.
- Recomenda-se que sejam tomadas providências para respeitar questões de confidencialidade e propriedade, dependendo da aplicação pretendida do estudo da ACV.
- Não existe base científica para reduzir resultados da ACV a um único número ou nota, uma vez que existem balanços de pós e contras, e complexidades para os sistemas analisados em diferentes estágios do seu ciclo de vida.
- Não existe um único método para conduzir estudos da ACV. Convém que as organizações tenham flexibilidade para implementar praticamente a ACV

conforme estabelecido na série da norma ISO 14040, com base na aplicação específica e nos requisitos de cada organização.

Quanto às limitações da ACV, podem se destacar, de acordo com Carvalho (2010), os seguintes aspectos: a metodologia é abrangente, o que pode ser um fator limitante se não houver simplificações para alguns aspectos; é um método físico que não permite inserir demanda de mercado ou situações sociais; podem-se assumir erros caso haja escolha da unidade funcional imprópria, ou realizar uma exclusão incorreta de etapas consideradas de pouca influência, ou ainda utilizar de dados disponíveis incorretos.

Diante da compreensão das particularidades e limitações da metodologia ACV, podem-se analisar as quatro fases metodológicas da estrutura da avaliação do ciclo de vida independentemente.

2.1.1 Definição de Objetivo e Escopo

O objetivo e escopo de um estudo da ACV devem, segundo a ISO 14040 (ABNT, 2009a), ser consistentes com a aplicação pretendida e devem ser claramente definidos. O objetivo de um estudo ACV deve declarar de forma clara e concisa a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público alvo.

Já o escopo do estudo ACV deve ser considerado e claramente descrito, para que a extensão, a profundidade e o grau de detalhe do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender o objetivo estabelecido. A ISO 14044 (ABNT, 2009b) define itens que devem ser considerados e descritos no escopo de forma clara:

- o sistema de produto a ser estudado;
- as funções do sistema de produto ou, no caso de estudos comparativos, dos sistemas;
- a unidade funcional;
- a fronteira do sistema;
- procedimentos de alocação, se utilizado;
- metodologia de AICV e tipos de impactos;

- interpretação a ser utilizada;
- requisitos de dados;
- pressupostos;
- escolha de valores e elementos opcionais;
- limitações;
- requisitos de qualidade dos dados;
- tipo de revisão crítica, se aplicável;
- tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

O Athena Sustainable Materials Institute (2009) relata que a definição do objetivo compreende a finalidade do estudo, indicações se o estudo será comunicado externamente ou utilizado apenas para necessidades internas da empresa, os limites do sistema e a unidade funcional para o estudo.

Ainda segundo o instituto, os limites do sistema estabelecem o que será considerado no âmbito do estudo e o que será excluído. A unidade funcional define explicitamente o serviço ou uma função fornecida pelo sistema de produtos. Os resultados do estudo de ACV devem ser relacionados diretamente com a unidade funcional, por exemplo, se a unidade funcional for a produção de 1,0 m³ de produto, os resultados podem incluir o montante bruto dos recursos e dos poluentes liberados para cada m³ do produto produzido.

A definição da unidade funcional é um tema importante que permite uma comparação justa entre diferentes sistemas através da ACV. A adoção de uma única unidade funcional para vários sistemas garante que os impactos destes possam ser comparados (BONTON et al., 2012). Complementando a primeira fase da ACV, o objetivo e a definição do escopo definem também os dados e as informações que deverão ser coletados, e como os dados serão avaliados para a coerência, qualidade e impactos ambientais. A segunda fase da ACV é a análise de inventário.

2.1.2 Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

A ICV compreende a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas de um sistema de produto (ABNT, 2009a). Esta fase

caracteriza-se pela elaboração de um inventário de entradas e saídas relevantes de um sistema produtivo, envolvendo balanço de massas e balanço/fluxo energético que contribuem para questões ambientais (ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2009).

De acordo com Pereira (2008), os limites estabelecidos na fase anterior norteiam e dão condição para a coleta de dados para o sistema do produto. O produto do inventário é uma lista envolvendo os volumes consumidos de energia, de materiais e as quantidades de emissões poluentes ao meio ambiente.

A Figura 3 apresenta um fluxograma com os passos operacionais delineados para a execução do plano para a análise de inventário do ciclo de vida, sugerido pela ISO 14044 (ABNT, 2009b).

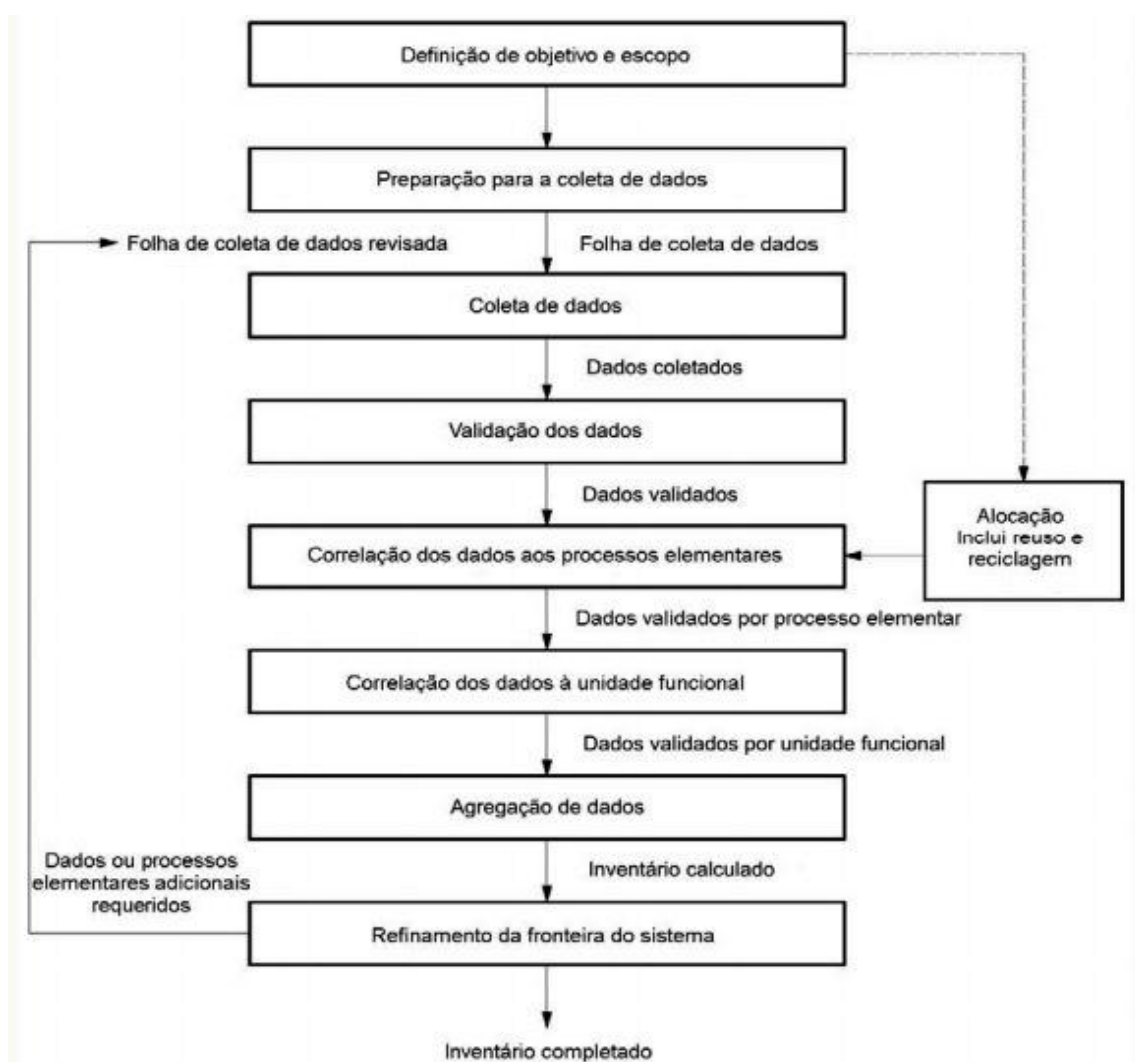


Figura 3 - Procedimento simplificado para a análise de inventário
Fonte: ABNT (2009b)

Analisando a Figura 3, tem-se que após a definição do objetivo e escopo do trabalho, pode-se preparar a coleta de dados. Segundo Passuelo (2007), a preparação pode incluir a definição de quais dados serão primários e secundários, o preparo das planilhas de coleta e o treinamento do pessoal para a coleta dos dados.

Existem duas fontes de coleta de dados. Os dados podem ser primários ou secundários. Os primários são dados coletados diretamente do processo estudado, a partir das medições e estimativas das principais atividades. Os dados secundários são baseados em informações retiradas de bases de dados já existentes, levantadas por outros estudos (ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2009). A definição da origem dos dados deve estar contida no escopo do estudo.

A ISO 14044 (ABNT, 2009b) fornece em anexo alguns exemplos de folhas para a orientação na coleta de dados. Os dados, segundo a norma, devem ser coletados para cada processo elementar incluído na fronteira do sistema. Os dados coletados quantificam as entradas e saídas de um processo elementar.

Para Costa (2007) quando alguns dados não estão disponíveis, pode-se estimá-los baseados nos dados existentes, para preencher lacunas nas séries de dados ou selecionar e ajustar dados provenientes de diferentes fontes. A qualidade e transparência na coleta de dados podem ser consideradas elementos fundamentais para garantir a qualidade e confiabilidade dos resultados da ACV.

Após a coleta dos dados, os dados necessitam ser tratados, calculados e validados. De acordo com Costa (2007), para se efetuar o cálculo completo de todo sistema, pode-se fazer uso do balanço de massa e energia para validar se as informações estão completas.

Segundo o Athena Sustainable Materials Institute (2009), normalmente os balanços de massas e de energia são modelados através de um dos muitos pacotes de *software* de ACV. A utilização do *software* facilita operacionalização dos dados, a validação dos dados por processo elementar, por unidade funcional, a agregação dos dados e, por fim, fornece o inventário calculado.

Zoldan (2008) destaca a necessidade de alocação para reciclagem de produtos, subprodutos e dos resíduos (atividade ilustrada na Figura 3, p.27). De acordo com o autor, os processos de reuso ou reciclagem podem ser definidos em dois grupos distintos. O primeiro, o ciclo aberto, ocorre nos casos em que um determinado rejeito de um sistema de produto é usado por outro sistema produto. O segundo, o ciclo fechado, pode ocorrer em casos em que um ou mais processos do

sistema de produto são coletados e retornados ao mesmo sistema de produto ou também quando um produto final é reutilizado sem deixar o sistema.

A última atividade proposta no fluxograma da Figura 3 (p.27) é o refinamento da fronteira do sistema. Segundo a ISO 14044 (ABNT, 2009b), decisões com relação aos dados a serem incluídos devem ser baseadas em uma análise de sensibilidade para determinar sua significância. A análise de sensibilidade pode resultar em:

- exclusão de estágios do ciclo de vida ou de processos elementares caracterizados como não significativos pela análise de sensibilidade;
- exclusão de entradas e saídas não significativas para os resultados do estudo;
- ou inclusão de novos processos elementares, entradas e saídas caracterizados como significativos pela análise de sensibilidade.

A ISO 14040 (ABNT 2009a, p.14) justifica o refinamento das fronteiras do sistema pelo fato que “à medida que os dados são coletados e se amplia o conhecimento sobre o sistema, novos requisitos ou limitações dos dados podem ser identificados, requerendo mudança nos procedimentos de coleta de dados”.

Com o ICV determinado, é possível relacionar categorias de impacto e indicadores ambientais através da próxima fase da ACV, a Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV).

2.1.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

Esta fase constitui o núcleo da ACV, onde é realizada de forma efetiva a avaliação da significância dos impactos ambientais potenciais (SILVA, 2010). O processo associa dados do inventário com categorias de impacto específicas e indicadores da categoria, tentando assim entender tais impactos. A fase da AICV também fornece informações para a interpretação do ciclo de vida (ABNT, 2009a).

A avaliação do impacto do ciclo de vida é conduzida utilizando dados do ICV para calcular a significância dos impactos ambientais potenciais (OOTEGHEM e XU, 2012). Os elementos da fase de AICV são ilustrados na Figura 4.

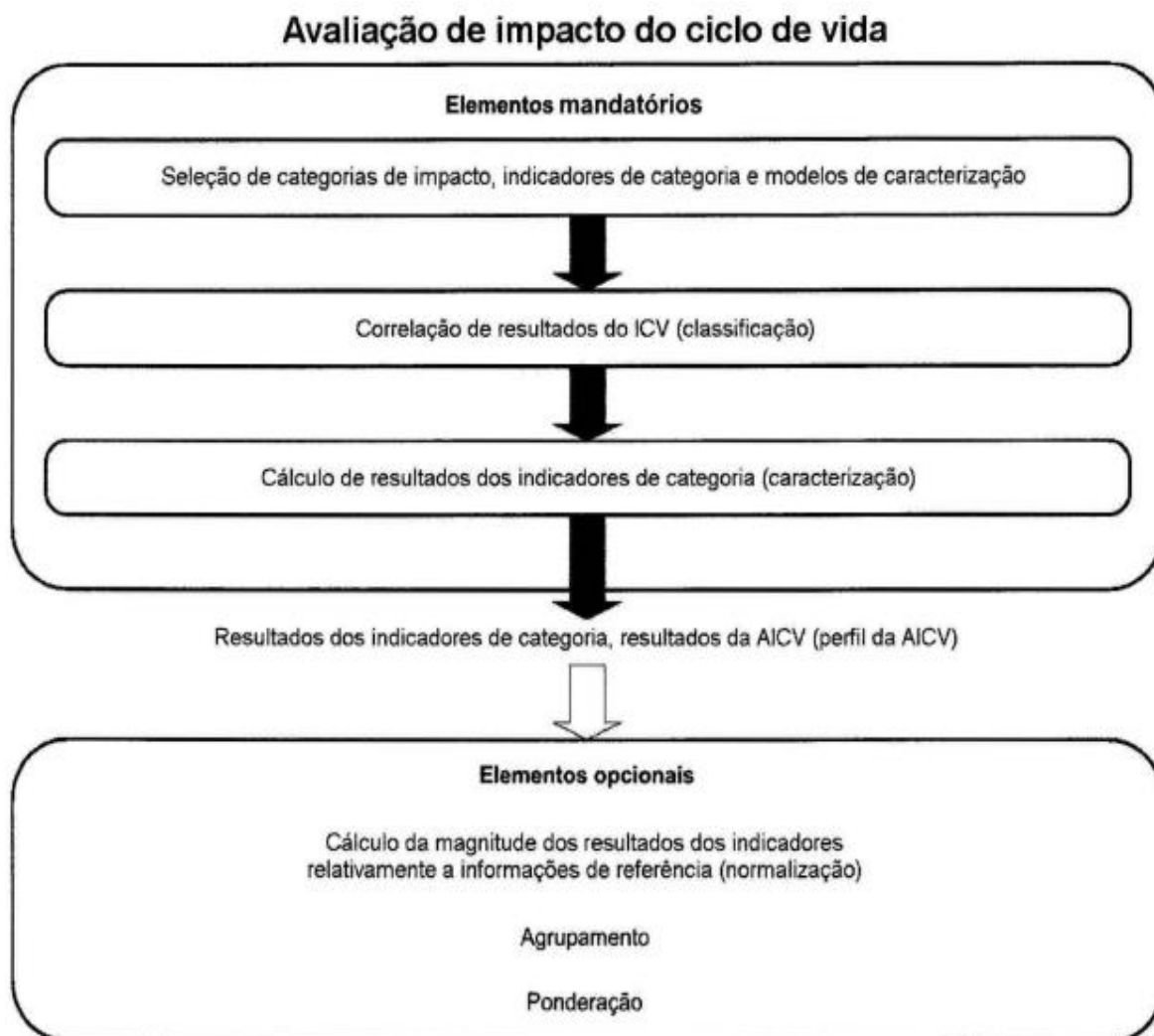


Figura 4 - Elementos da fase de AICV
 Fonte: ABNT (2009b)

De acordo com a ISO 14044 (ABNT, 2009b), para a maioria dos estudos de ACV, na primeira etapa da fase de AICV as categorias de impacto, indicadores de categoria ou modelos de caracterização já existentes são selecionados. Em casos específicos, no entanto, estes elementos não são suficientes para satisfazer o objetivo e escopo definidos para a ACV. Desta forma, novas categorias de impacto, indicadores de categoria ou modelos de caracterização devem ser definidos.

O elemento seguinte da AICV é a classificação. Nesta etapa, correlacionam-se os resultados obtidos no Inventário do Ciclo de Vida com cada uma das categorias de impactos selecionadas e identificadas na primeira etapa do AICV, de acordo com sua habilidade de contribuir a diferentes problemas ambientais (ABNT, 2009b; SILVA, 2010).

O terceiro e último elemento obrigatório da AICV, a caracterização, envolve o cálculo dos resultados dos indicadores de categoria. Saídas com impactos similares podem ser caracterizadas e compõem uma mesma categoria de impacto (MYLLYVIITA et al., 2012). Segundo a ISO 14044 (ABNT, 2009b), a caracterização expõe a conversão dos resultados do ICV para unidades comuns e a agregação dos resultados convertidos dentro da mesma categoria de impacto.

O modelo de caracterização calcula fatores de caracterização de substâncias específicas que expressam o impacto potencial de cada fluxo elementar em termos da unidade comum do indicador de categoria. Deste modo, os fatores de caracterização são multiplicados com os dados do inventário, e os produtos são os resultados da categoria de indicadores, expressos em uma unidade comum a todas as contribuições dentro da categoria de impacto (por exemplo, quilogramas equivalentes de CO₂ de gases de efeito estufa – GEE - que contribui para o impacto da categoria de mudanças climáticas) (HAUSCHILD et al., 2012).

Estes modelos de caracterização são conhecidos como métodos de AICV e abrangem os três elementos mandatórios da AICV (Figura 4, p.30). Devido à importância e a necessidade de se conhecer os métodos de AICV antes de sua aplicação, a Seção 2.2 (p.34) deste trabalho aborda esta temática de modo particular.

2.1.4 Interpretação

A quarta fase da ACV é a interpretação. É nesta fase em que as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto são consideradas em conjunto, de forma consistente, com o objetivo e o escopo definidos, propondo fornecer conclusões e recomendações para o estudo realizado (ABNT, 2009a).

Segundo Silva (2010), esta fase trata-se, basicamente, da conclusão do estudo ACV. É onde são apresentados os resultados de forma consistente com o objetivo e escopo previamente definidos.

A norma ISO 14040 (ABNT 2009a, p.17), afirma que “as constatações dessa interpretação podem tomar a forma de conclusões e recomendações aos tomadores de decisão, consistentes com o objetivo e escopo do estudo”.

Neste cenário, a interpretação do ciclo de vida é uma fase de avaliação do

ciclo de vida em que os produtos gerados pela ICV ou pela AICV, ou ambos, são avaliados em relação ao escopo e objetivo do trabalho a fim de proporcionar recomendações e conclusões (ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2009).

Esta etapa final de uma ACV compreende uma investigação dos aspectos ambientais mais significativos e sua relação com fluxos ou unidades de processos. O Athena Sustainable Materials Institute (2009) enfatiza o exposto exemplificando que caso os resultados de uma AICV indicarem um valor particularmente elevado para o indicador potencial de aquecimento global, por exemplo, o analista da ACV pode mapear no inventário quais fluxos ambientais e quais unidades de processo estão mais contribuindo para o elevado valor.

Esse fato fornece uma espécie de controle da qualidade e essas informações podem ser utilizadas para refinar a definição do escopo e concentrar-se nas mais importantes unidades de processo. A Figura 5 ilustra o relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV.

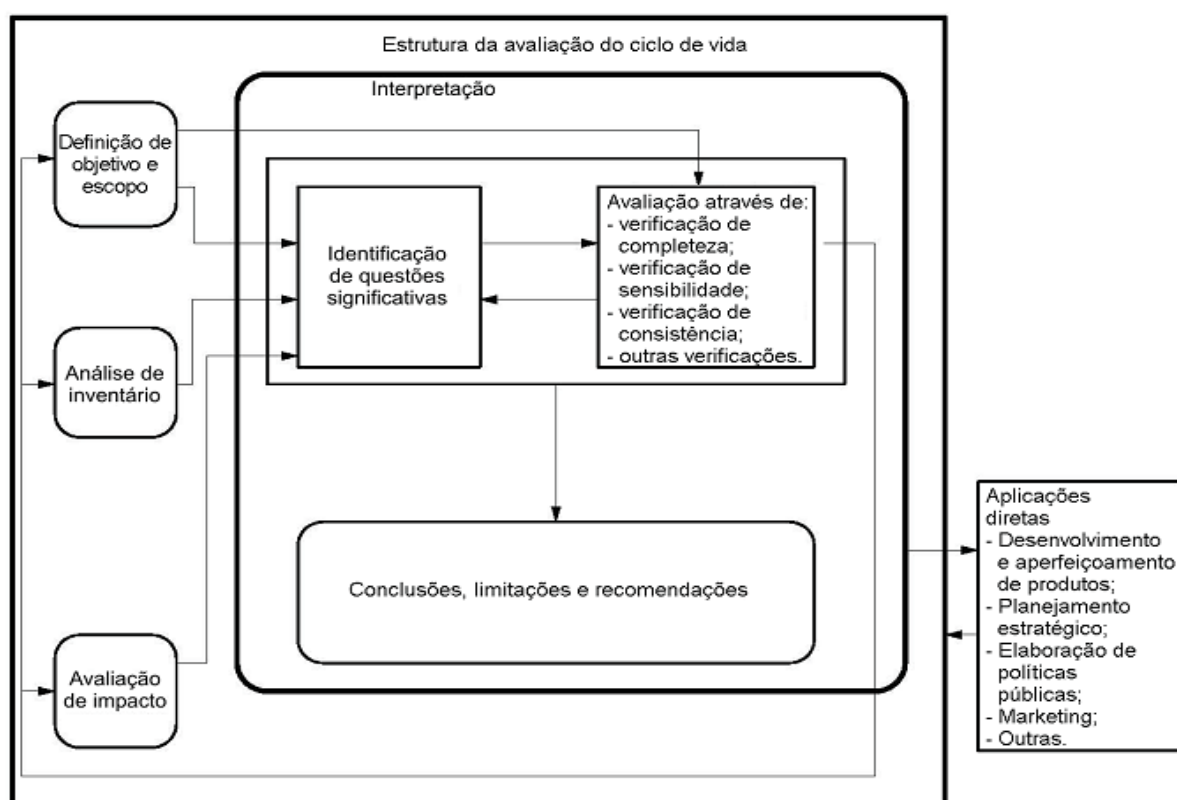


Figura 5 - Relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV
Fonte: ABNT (2009b)

A fase de interpretação relaciona-se com todas as outras fases da metodologia ACV e ainda fornece, através de seus resultados, aplicações diretas no desenvolvimento e aperfeiçoamento de produtos, planejamento estratégico, elaboração de políticas públicas, marketing e outras.

Esta fase da ACV compreende três etapas: identificação de questões significativas; avaliação através de verificação de completeza, sensibilidade e consistência e; conclusões, limitações e recomendações. As características de cada etapa são exploradas no Quadro 1.

| Etapas | | Objetivos |
|---|----------------------|--|
| Identificação de questões significativas | | Estruturar os resultados das fases de ICV ou AICV para ajudar a determinar as questões significativas, de acordo com a definição de objetivo e escopo, e interativamente com o elemento avaliação. O propósito dessa interação é considerar as implicações dos métodos utilizados, os pressupostos adotados etc. nas fases precedentes, tais como regras de alocação, decisões de corte, seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos. |
| Avaliação através de verificação de: | Completeza | Assegurar que todas as informações relevantes e os dados necessários para a interpretação estejam disponíveis e completos. Se alguma informação relevante estiver ausente ou incompleta, deve ser considerada a necessidade de tal informação para satisfazer o objetivo e escopo da ACV. |
| | Sensibilidade | Avaliar a confiabilidade dos resultados finais e conclusões, determinando de que forma eles são afetados por incertezas nos dados, métodos de alocação ou cálculo dos resultados dos indicadores de categoria etc. |
| | Consistência | Determinar se os pressupostos, métodos e dados são consistentes com o objetivo e escopo. |
| Conclusões, limitações e recomendações | | Chegar a conclusões, identificar limitações e fazer recomendações para o público-alvo da ACV. |

Quadro 1 - Objetivos das Etapas da fase de interpretação da ACV
Fonte: ISO 14044 (ABNT, 2009b)

Neste contexto, pode-se notar a complexidade e o grande número de informações necessárias para avaliar o ciclo de vida de produtos. A fase de

interpretação é resultante das avaliações obtidas a partir dos métodos utilizados na fase de AICV.

Neste sentido, cabe à próxima seção explicar sobre os métodos diferentes de AICV, e detalhar mais a fundo os três adotados neste estudo.

2.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CICLO DE VIDA

Os métodos de avaliação de impactos de ciclo de vida são aplicados durante a terceira fase da ACV (AICV), como visto anteriormente. Os métodos apresentam características individuais específicas e podem ser classificados em duas categorias de acordo com sua abordagem: *midpoint* (ponto médio) e *endpoint* (ponto final).

De acordo com Cavalett et al. (2012), ao nível *midpoint* todas as substâncias referentes ao ICV são adequadamente agregadas em categorias de impacto de acordo com uma característica comum na cadeia de causa efeito do mecanismo ambiental. Estas características não representam as consequências finais sobre o percurso ambiental das emissões listadas no inventário do ciclo de vida (ICV), mas são indicadores de impacto em potencial.

A modelagem *endpoint* consiste basicamente em caracterizar a gravidade ou as consequências de categorias de impacto de ponto médio nas áreas de proteção em nível de ponto final. Esta caracterização a nível *endpoint* exige modelar todos os mecanismos ambientais que conectam os resultados do inventário, com o respectivo impacto sobre as áreas de proteção sendo, portanto, quantificadas as consequências (danos) finais das emissões (CAVALETT et al., 2012).

De acordo com Bare et al. (2000) devido ao fato dos métodos *endpoint* serem direcionados ao dano, são geralmente considerados mais compreensíveis para os tomadores de decisão, apresentando mais relevância na tomada de decisão, no entanto, possuem alta subjetividade. Já, os métodos *midpoint* apresentam menor subjetividade, mas também possuem menor relevância no suporte à tomada de decisão.

As características mais relevantes num método de AICV são suas categorias de impacto ambiental (ALVARENGA, 2010). Sendo que cada método apresenta um conjunto de categorias específicas. Algumas das categorias de impactos comumente

relacionados aos dados do ICV e a métodos *midpoint* e *endpoint* podem ser observadas na Figura 6.

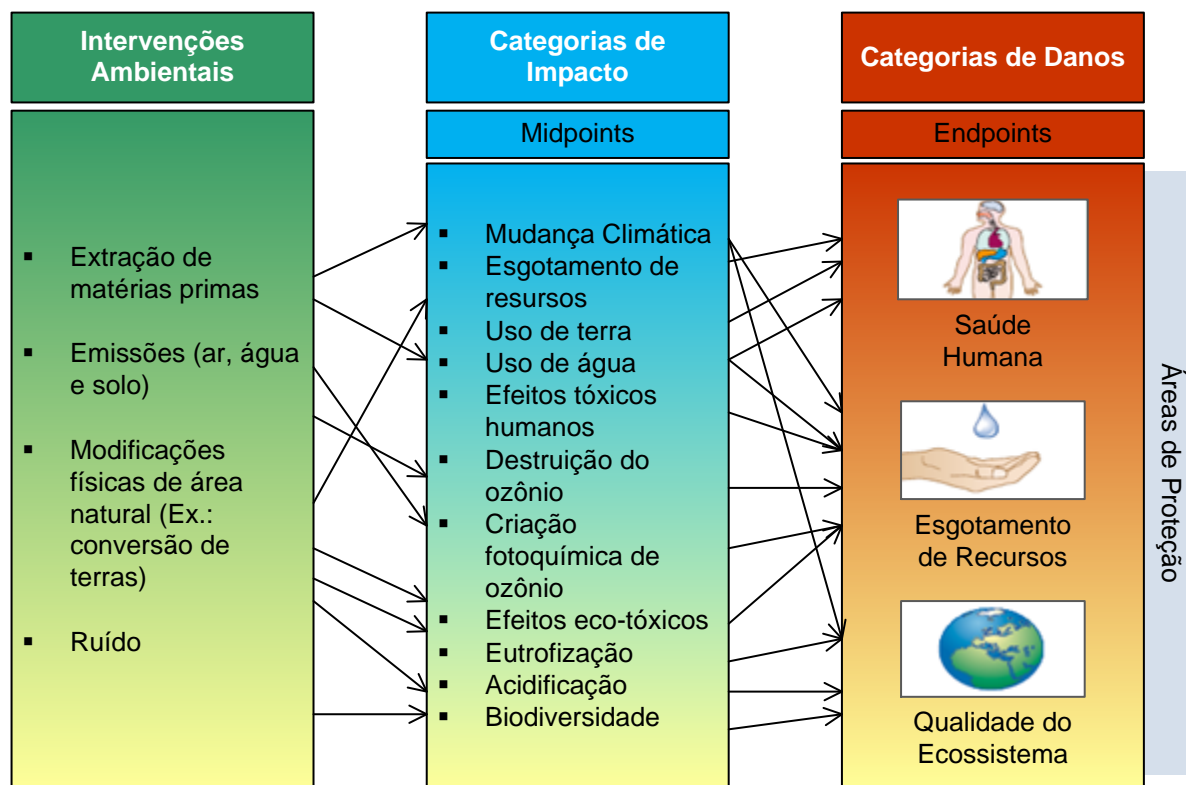


Figura 6 - Categorias de impacto a *midpoint* e *endpoint*
 Fonte: United Nations Environment Programme (2011)

Vários métodos de avaliação de impacto têm sido desenvolvidos e aplicados em estudos de ACV. Cada método de AICV possui categorias de impacto e/ou categorias de danos diferenciadas. O Quadro 2 ilustra os métodos de AICV mais citados e aplicados em estudos ACV (CCI, 2010). São indicadas as formas de abordagem dos métodos, suas características e a respectiva referência de detalhamento.

| Método | Abordagem | Característica do método | Detalhamento do método |
|----------|-----------------|--|---|
| CML 2001 | <i>Midpoint</i> | É o método mais utilizado em abordagens <i>midpoints</i> e apresenta uma ampla lista de categorias de avaliação de impactos. | Guinée et al. (2001a); Guinée et al. (2001b); Guinée et al. (2001c) |

(Continua)

(Continuação)

| Método | Abordagem | Característica do método | Detalhamento do método |
|--------------------------------|--------------------------|--|--|
| Eco-Indicator 99 | <i>Endpoint</i> | É o método mais utilizado em abordagens <i>endpoints</i> . É realizada a caracterização e a avaliação dos danos ambientais sobre a saúde humana, a qualidade do ecossistema e recursos; e a normalização e valoração dos impactos. | Goedkoop et al. (1998); Goedkoop e Spriensma (2000a); Goedkoop e Spriensma (2000b) |
| Ecopoints (Escassez ecológica) | <i>Endpoint</i> | Fornecer caracterização e fatores de ponderação de várias emissões e extrações com base em metas de políticas públicas e objetivas. O método original foi desenvolvido para Suíça | Brand et al. (1998), Frischknecht et al. (2009). |
| EDIP 1997 | <i>Midpoint</i> | Abordagem típica <i>midpoint</i> , abrange a maioria dos impactos relacionados a emissões, uso de recursos e impactos no meio ambiente de trabalho. | Wenzel et al. (1997) |
| EDIP 2003 | <i>Midpoint</i> | É uma evolução do EDIP 97, entretanto não o substitui. A versão de 2003 apresenta um modelo de caracterização diferenciado espacialmente. Recomenda-se que o mesmo seja usado como uma alternativa para ao EDIP97 em uma caracterização local genérica (de preferência europeia) | Hauschild e Potting (2005) |
| EPS | <i>Endpoint</i> | Ajuda designers e desenvolvedores de produtos em apoio à decisão. | Steen (1999a); Steen (1999b), Steen (2001) |
| Impact 2002+ | <i>Midpoint/Endpoint</i> | A proposta do método Impact2002+ é a junção dos métodos <i>midpoint</i> com <i>endpoint</i> , a fim de absorver suas respectivas limitações e agrupar os pontos positivos de outros métodos. | Jolliet et al. (2003) |
| LIME | <i>Midpoint/Endpoint</i> | Desenvolve listas de <i>midpoints</i> (caracterização), <i>endpoints</i> (avaliação de danos) e a ponderação que reflete as condições ambientais do Japão. | Itsubo et al. (2004); Hayashi et al. (2006). |
| LUCAS | <i>Midpoint</i> | Fornecer uma metodologia para AICV adaptada ao contexto canadense | Toffoletto et al. (2007). |
| MEEuP | <i>Midpoint</i> | Permite avaliar em que medida vários produtos que consomem energia cumprem determinados critérios que os tornam elegíveis para implementação de medidas sob a concepção ecológica. | Kemna et al. (2005). |
| Pegada Ecológica | <i>Endpoint</i> | Fornecer um indicador da área biológica produtiva para fatores de demanda humana. | Wackernagel (2005); Huijbregts et al. (2006). |
| ReCiPe 2008 | <i>Midpoint/Endpoint</i> | A metodologia é harmonizada em termos de princípios de modelagem e escolhas, oferecendo resultados orientados a problemas e a danos. | Goedkoop et al. (2009) |
| TRACI | <i>Midpoint</i> | É um método de avaliação de impacto que representa as condições dos EUA/EPA. | Bare et al. (2003) |
| USEtox | <i>Midpoint</i> | Fornecer fatores de caracterização para toxicidade humana e ecotoxicidade na AICV. É o método mais completo em termos de requisitos toxicológicos. | Hauschild et al. (2008b); Rosenbaum et al. (2008). |

Quadro 2 - Principais métodos para AICV

Fonte: Elaborado com base em CCI (2010) e ECOINVENT (2010).

Estes métodos estão integrados as bases de dados (como por exemplo, a Ecoinvent) e aos *softwares* de ACV (PIZZOL et al. 2011). A escolha do método de avaliação é feita tomando-se como base a análise das questões ambientais relevantes para o ciclo de vida do produto estudado (SILVA, 2012). De acordo com Zhou et al. (2011), não há informações claras ou até mesmo orientações para a escolha de métodos adequados para AICV, cabe a cada estudo definir os métodos que atendam aos objetivos propostos de acordo com estudos publicados.

Ao final da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, tem-se como produto final um perfil ambiental do sistema de produto em estudo. Lembrando que a AICV enfoca somente as questões ambientais que estão definidas no objetivo e escopo. Neste contexto, a AICV não é uma avaliação completa de todas as questões ambientais do sistema de produto sobre o estudo (ABNT, 2009b).

A seguir foram fornecidos detalhes mais específicos, bem como as categorias de impactos e as considerações gerais sobre os métodos de AICV empregados neste estudo: CML 2001, EDIP 1997 e USEtox 2008. A justificativa para a escolha destes métodos está exposta na Seção 5.6, do Capítulo 5 – Metodologia (p.64).

2.2.1 CML 2001

O método CML 2001 (ou CML 01) surgiu por meio de estudos de um grupo de cientistas associados ao Centro de Ciências Ambientais (CML) da Universidade de Leiden, Holanda. O grupo publicou um guia operacional para as normas ISO (GUINÉE et al, 2001b; GUINÉE et al, 2001c), nomeado *Dutch Handbook on LCA* (CML). A proposta geral é fornecer orientações com guias operacionais para conduzir um estudo de ACV passo a passo, utilizando o método proposto.

O guia relatou uma diferenciação na abordagem dos impactos ambientais. A abordagem orientada ao problema (*midpoint*) e a orientada ao dano (*endpoint*) foram diferenciadas. Neste aspecto, o método holandês CML 2001 foi criado com diferentes categorias de impactos relacionados à abordagem orientada ao problema (*midpoint*).

As categorias de impacto propostas pelo CML estão disponíveis em diversos outros métodos de AICV, e permitem comparações de seus resultados entre

métodos. São elas: Acidificação, Depleção da camada de ozônio, Depleção de recursos abióticos, Ecotoxicidade, Eutrofização, Formação fotoquímica de ozônio troposférico, Mudança Climática, Oxidação fotoquímica, Radiação ionizante, Toxicidade humana e Uso do solo (GUINÉE, 2001a).

A amplitude das categorias de impacto associadas ao CML 2001 releva sua importante representatividade na comunidade científica, além de ser considerado pioneiro nos métodos de AICV no mundo. Alvarenga (2010) afirma que o CML 2001 é o método mais utilizado em estudos de ACV que adotam uma abordagem *midpoint*.

2.2.2 EDIP 1997

O método EDIP 1997 foi desenvolvido durante quatro anos pela Universidade Tecnológica da Dinamarca, em conjunto com diversas indústrias dinamarquesas e com a Agência de Proteção Ambiental da Dinamarca, tendo seu lançamento no ano de 1996. A sigla EDIP significa *Environmental Design of Industrial Products*.

O método EDIP 1997 possui uma abordagem típica *midpoint*, abrangendo a maioria dos impactos relacionados a emissões, ao uso de recursos e impactos no meio ambiente de trabalho. As categorias de impactos são: Acidificação, Aquecimento global, Depleção da Camada de Ozônio, Ecotoxicidade, Formação fotoquímica de ozônio troposférico, Toxicidade humana, Uso do solo. O método também contempla categorias de geração de resíduos sólidos, permitindo a classificação (porém não a caracterização) dos resíduos em: sólidos, perigosos, radioativos e cinzas.

Em 2003 surgiu uma nova versão do método, o EDIP 2003, entretanto não substitui sua versão anterior. A versão 2003 trouxe melhorias para as categorias de impactos utilizadas tornando modelos de caracterização mais regionalizados, com foco nas condições Europeias. Esta versão menos global não contempla a classificação dos resíduos sólidos gerados e alterou os fatores de caracterização para as categorias de impactos não globais. As referências para a normalização também foram alteradas. (HAUSCHILD; POTTING, 2005; SILVA, 2012).

2.2.3 USEtox 2008

O USEtox 2008 é um modelo consensual desenvolvido por especialistas em escala mundial de países como Dinamarca, Holanda, Estados Unidos e Canadá através de uma Força Tarefa em Impactos Toxicológicos da UNEP-SETAC *Life Cycle Initiative*.

O método foi disponibilizado no ano de 2008 e teve em seu desenvolvimento o embasamento de outros métodos de AICV, tais como o TRACI, EDIP 1997, Impact 2002+. O principal propósito do desenvolvimento do método foi reduzir níveis de incerteza e conclusões distintas provenientes de falhas na caracterização toxicológica das substâncias apresentadas em outros métodos de AICV (ROSENBAUM et al., 2008; SILVA, 2012).

Na base de dados Ecoinvent, são distinguidos quatro diferentes fatores de AICV para o método USEtox – um fator para ecotoxicidade e três para toxicidade humana (representada por cancerígeno, não-cancerígeno e impacto total). Estas duas categorias de impactos propostas (ecotoxicidade e toxicidade humana) foram aceitas pela comunidade científica internacional e aprovadas pela UNPE/SETAC, pois apresentam a maior cobertura de substâncias caracterizadas toxicologicamente na atualidade e apresentam maior nível de precisão comparado a outros métodos de AICV (BERTHOUD et al., 2011; HAUSCHILD et al., 2008; ROSENBAUM et al., 2008).

A fim de viabilizar e facilitar os estudos ACV, bem como as avaliações de impactos através de diferentes métodos, existem diversos *softwares* desenvolvidos e destinados à ACV, entre os mais conhecidos estão: Umberto®, SimaPro, GaBi . A próxima seção discute tais sistemas computacionais, destacando o utilizado neste trabalho, o *software* alemão Umberto®.

2.3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ACV: SOFTWARE UMBERTO®

Muitos são os *softwares* existentes no mercado que auxiliam e são utilizados como ferramenta para a ICV e ACV. Zoldan (2008) afirma que uma dificuldade nos estudos de ICV é a grande quantidade de dados envolvidos no processamento da

análise, pois um inventário de ciclo de vida compreende um conjunto de inventários de diversos sistemas e subsistemas técnicos.

A utilização de um *software* para o estudo ICV garante maior confiabilidade e facilidade ao decorrer do estudo. O autor cita os principais *softwares* utilizados comercialmente para tal, entre eles estão: Umberto®, GaBi, SimaPro, LCA it, eVerdEE, Idemat.

Uma pesquisa realizada por Andrade (2005) envolvendo cinco *softwares* de análise de ciclo de vida, Umberto®, SimaPro, GaBi, TEAM e Gemis, revelou o Umberto® com melhor avaliação geral. Os critérios envolvidos no estudo foram: facilidades e funcionalidade de interface; abrangência e qualidade do banco de dados; segurança; licenças; importação/exportação de dados; suporte; hardware mínimo necessário; flexibilidade da plataforma; apresentação dos resultados e interconectividade.

Além de o *software* Umberto® apresentar-se com melhor avaliação nos critérios envolvidos na pesquisa, ele possui em sua criação um caráter científico, já que foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Ambiental e Energética de Heidelberg (IfEU) e Instituto de Informática Ambiental da Universidade de Hamburgo (IfU) (SARAIVA et al., 2007).

A operacionalização do Umberto® é baseada na elaboração de redes de fluxo com base em redes de Petri, possuindo como princípios básicos três tipos de componentes: transições, lugares e setas/fluxos (Figura 7) (NUNES et al., 2010).

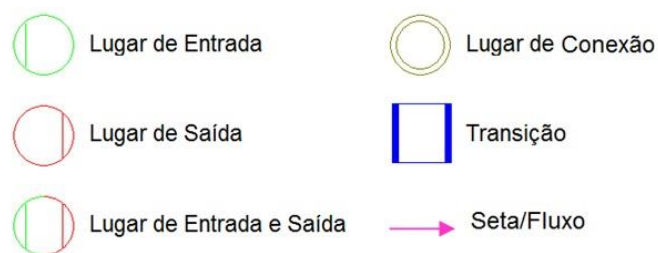


Figura 7 – Representação de componentes de rede do Umberto®
Fonte: Software Umberto®

Os lugares (*places*) são representados por um círculo, eles podem ser categorizados em lugares de entradas (*inputs*), lugares de saída (*outputs*), lugares de entrada e saída (*inputs/outputs*) e lugares de conexões (*connection*). Nos locais não ocorrem transformações de materiais, são apenas locais onde são alocados os

insumos e rejeitos do processo analisado. Nos lugares de conexões a quantidade de material que chega é igual à quantidade que sai, não podendo realizar nenhum tipo de armazenamento. Os processos de transformação ocorrem nas chamadas “transições” que são representadas por um quadrado. A definição de fluxos e a formação da rede se dão pelas setas que conectam os “lugares” e as “transições” (NUNES et al., 2010; MONDARDO e FRANK, 2000).

A proposta do *software* Umberto® é beneficiar os usuários, especialmente empresas, através de eficiência, economia e sucesso. A eficiência promove o sucesso, com o *software* é possível descobrir o potencial de retenção de gastos da empresa, otimizar as receitas, os recursos e o equilíbrio ecológico (*IFU HAMBURG GMBH*, 2012).

Segundo o *ifu Hamburg GmbH* (2012), os benefícios provindos da utilização do *software* tornam-se possíveis devido ao Umberto® permitir:

- a) A modelagem de fluxos de materiais, energias, trabalhos e processos produtivos;
- b) A Visualização de processos e a Avaliação do Ciclo de Vida através de diagramas ilustrativos;
- c) A Avaliação dos resultados através dos critérios econômicos, ambientais e sociais;
- d) A Otimização de custos, recursos e da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Complementando, Saraiva et al. (2007) afirmam que o Umberto® permite o desenvolvimento de diferentes tipos de sistemas devido sua grande flexibilidade. De acordo com o *ifu Hamburg GmbH* (2012), os dois principais objetivos que levam à utilização deste *software* para pesquisas e/ou empresas são: detectar pontos importantes para otimização dos processos no sistema de produção; e reduzir os recursos de materiais e energia; e minimizar as quantidades de emissões poluentes. Para auxiliar a tomada de decisão, o *software* possibilita a comparação de cenários e pode ilustrar resultados através de Gráficos e tabelas.

O Umberto® também possui interface com a base de dados da Ecoinvent. A missão do Centro Ecoinvent é fornecer os dados mais relevantes, confiáveis, transparentes e acessíveis para usuários de ICV de todo o mundo. Para isso, o Centro de Ecoinvent fornece a biblioteca Ecoinvent, na sua versão 2.2, com mais de

4000 conjuntos de dados industriais de inventários de ciclo de vida e métodos para avaliação de impactos a fim de auxiliar estudos de ACV, DfE (*Design para o Meio Ambiente*), Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) e desempenhos ambientais de produtos (ECOINVENT, 2010).

Segundo o Centro Ecoinvent (2012), uma nova biblioteca está sendo desenvolvida e será lançada em sua versão 3. Estudos que envolvem a metodologia ACV (GONZÁLEZ-GARCÍA et al., 2009a; LUO et al., 2009; WELZ, HISCHIER e HILTY, 2011) utilizaram-se das bibliotecas da Ecoinvent a fim de ampliar as fronteiras do sistema estudado, garantindo dados mais exatos e abrangentes.

Neste âmbito, o *software* Umberto®, apresenta-se como uma ferramenta versátil para estudos de ACV, visto seu caráter científico e integração com a base de dados Ecoinvent. A versatilidade do *software* permite seu uso nos mais variados processos industriais, entre eles, o setor de produção de painéis de madeira reconstituída do tipo MDF.

3 PAINÉIS DE MADEIRA RECONSTITUÍDA MDF

Em geral, os painéis de madeira são classificados em dois tipos: os que são produzidos de madeira reconstituída (fibras de madeira, partículas de madeira) e os que são feitos com madeira processada mecanicamente.

O painel de fibras de média densidade, o MDF (*Medium Density Fibreboard*), é caracterizado como um painel de madeira reconstituída e apresenta-se ilustrado na Figura 8.



Figura 8 - Painéis MDF sem revestimentos
Fonte: World Panel Industry (2012)

A diferenciação dos painéis de madeira reconstituída e de madeira maciça acontece em seus processos de fabricação. Durante o processo de produção dos painéis de madeira reconstituída ocorre o processamento químico da madeira, passando por diferentes processos de desagregação até que se transforme em fibras e/ou partículas de madeira. Em contrapartida, os painéis de madeira processada mecanicamente são fabricados a partir de camadas de lâminas de madeira maciça (BNDES, 2008).

Os painéis, em geral, substituem a madeira maciça em diversos usos, como na fabricação de móveis, utensílios, pisos e elementos decorativos e até mesmo para arquitetura de interiores. Entre os painéis de madeira reconstituída, os principais são: MDF, aglomerado/MDP, OSB, chapa de fibra (BNDES, 2008). Os principais painéis de madeira reconstituída foram apresentados e descritos no Quadro 3.

| Tipo de Painel de Madeira Reconstituída | Características |
|---|---|
| Aglomerado/ MDP | <p>O aglomerado é uma chapa fabricada com partículas de madeira (<i>particleboard</i>) aglutinadas por meio de resina, com ação de calor e pressão. No Brasil, a madeira de florestas plantadas – em especial, de eucalipto e de pinus – constitui a principal fonte de matéria-prima.</p> <p>A partir da metade da década de 1990, as empresas brasileiras investiram em modernização tecnológica, passando do processo de prensagem cíclica para prensagem contínua, o que conferiu ao produto melhores características de resistência, e implementaram a modificação da nomenclatura para MDP (<i>Medium Density Particleboard</i>), ou painel de partículas de média densidade.</p> |
| MDF | <p>O MDF (<i>Medium Density Fibreboard</i>) é uma chapa fabricada num processo similar ao do aglomerado/MDP, mas utilizando madeira com maior grau de desagregação, ou seja, reduzida a fibras, que são aglutinadas por meio de resinas, com ação de calor e pressão. Seus correlatos – HDF (<i>High Density fiberboard</i>) e SDF (<i>Super Density fiberboard</i>) – apresentam maior densidade e, portanto, menor espessura. A matéria-prima utilizada nesses painéis é a mesma empregada na fabricação do aglomerado/MDP. No Brasil, as florestas plantadas de eucalipto e de <i>pinus</i> também são a fonte principal de madeira para fabricação desse painel.</p> |
| OSB | <p>O painel de tiras orientadas – OSB (<i>Oriented Strand Board</i>) – é formado por tiras ou lascas de madeiras orientadas perpendicularmente em diversas camadas, unidas por resinas e sob a ação de alta pressão e temperatura.</p> |
| Chapa de Fibra | <p>Também conhecida como chapa dura (<i>Hardboard</i>), a chapa de fibra é uma chapa de espessura fina, que resulta da prensagem a quente de fibras de madeira por meio de um processo úmido, que reativa os aglutinantes naturais da própria madeira (sem a adição de resinas) e confere ao produto alta densidade. No Brasil, utiliza-se como matéria-prima a madeira de eucalipto de florestas plantadas.</p> |

Quadro 3 - Tipos e Características de Painéis de Madeira Reconstituída

Fonte: BNDES (2008)

De acordo com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES (2010), o MDF juntamente ao MDP, são os painéis mais representativos no atual cenário nacional, principalmente para o ramo de móveis e construção civil. Este estudo possui o painel MDF como foco do estudo.

O painel de fibras de média densidade – MDF, conforme a Associação Brasileira de Indústrias de Painel de Madeira – ABIPA (2012b), possui sua

fabricação caracterizada pela aglutinação e compactação das fibras de madeira com adição de resina sintética e ação conjunta de pressão e calor em prensa contínua de última geração.

O MDF é um painel industrial homogêneo, com excelente estabilidade dimensional, com superfícies uniformes, lisas e de altas densidades. “Com densidade adequada e homogeneidade proporcionada pelas fibras, o painel de MDF pode ser facilmente torneado, entalhado e usinado” (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAINÉIS DE MADEIRA – ABIPA, 2012b, p.1).

A Norma ABNT NBR 15316-1:2009 define o Painel de Média Densidade como uma chapa de fibras de madeira com umidade menor que 20% na linha de formação e densidade maior que 450 kg/m³. Essa norma é utilizada pelos fabricantes Brasileiros de Painel MDF e é baseada nas Normas Europeias (TORQUATO, 2008).

Para fins mercadológicos, a norma classifica a chapa em:

- a) HDF: chapa com densidade > 800 kg/m³;
- b) *Standard*: chapa com densidade > 650 kg/m³ e < 800 kg/m³;
- c) *Light*: chapa com densidade < 650 kg/m³;
- d) *Ultra light*: chapa com densidade < 550 kg/m³.

A seção a seguir aborda o cenário mercadológico mundial e nacional do painel MDF, relacionando seu crescimento e mercado com outros painéis.

3.1 CENÁRIO MERCADOLÓGICO DOS PAINÉIS MDF

Atualmente, apesar de o MDP ser o painel mais consumido no mundo, o MDF leva alguma vantagem, principalmente no ramo mobiliário, por causa de suas características mecânicas específicas que o aproximam da madeira maciça. As características de boa consistência, estabilidade dimensional e melhor capacidade de usinagem estão fazendo com que o painel MDF aos poucos venha ganhando maior parcela no mercado mundial de painéis (BNDES, 2010).

Esta maior participação do painel MDF no cenário mundial é notada na Figura 9, pela última publicação do BNDES (2010) sobre o panorama de mercado dos painéis de madeira.

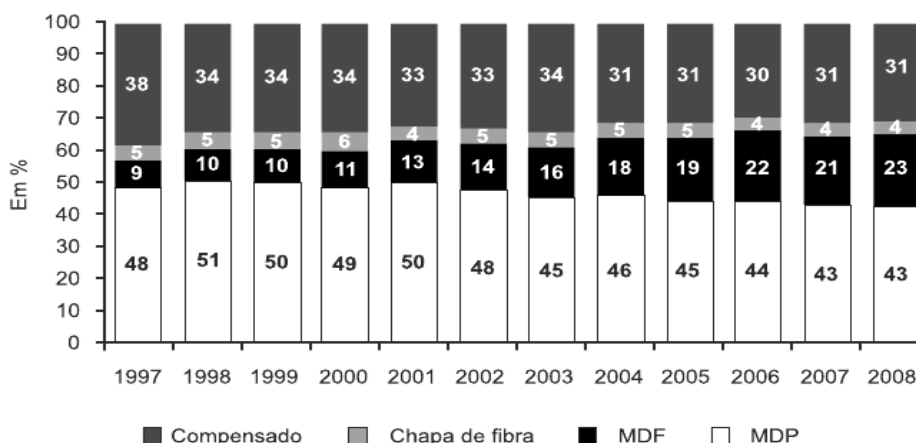


Figura 9- Evolução da participação de cada tipo de painel no consumo mundial
Fonte: BNDES (2010)

Nota-se que o consumo do MDF obteve expansão bastante acentuada no mercado mundial no período de 1997 a 2008. É o painel que apresentou maior crescimento no período (14%) ocupando parcelas do mercado de outros painéis.

O crescimento do consumo do MDF aumentou a taxa de penetração do produto ao redor do mundo. Ainda no ano de 2005, o Brasil possuía o terceiro maior índice de penetração de MDF (34,8%) do mundo, superando países como os EUA e a Alemanha. Ficando atrás somente da Coreia do Sul e da China que apresentaram índices de 34,8% e 37,1%, respectivamente. A Figura 10 ilustra a participação no consumo do MDF no mercado brasileiro do ano 2005 a 2011.

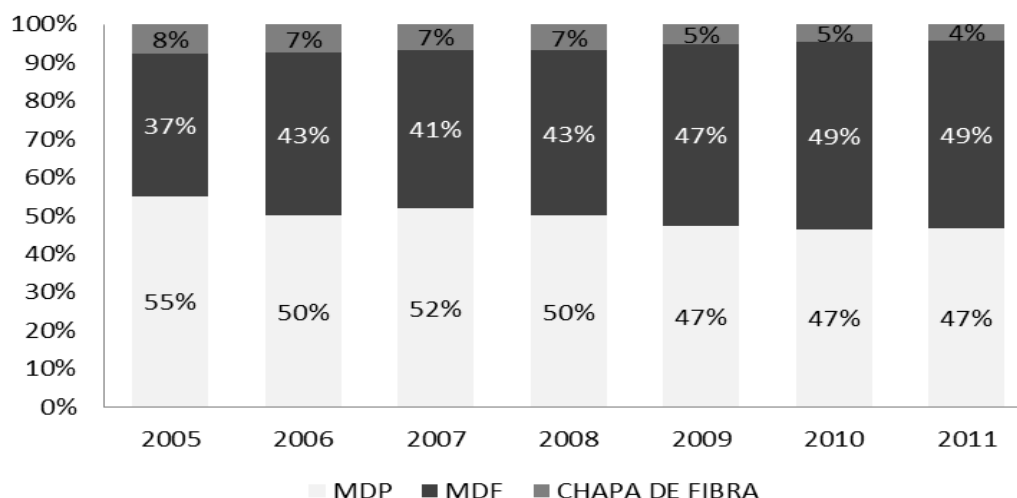


Figura 10 - Evolução da participação de painéis de madeira reconstituída no consumo brasileiro
Fonte: Associação Brasileira de Painéis de Madeira – ABIPA (2012a)

Esta representatividade significativa na penetração do painel MDF no Brasil, observado na Figura 10 (p.46), é graças a sua evolução participativa no mercado interno e a investimentos no setor industrial de fabricação do mesmo (BNDES, 2008).

Nota-se que a partir de 2009 o mercado do painel MDF superou o MDP, até então o líder de consumo no país. De acordo com o panorama brasileiro de painéis de madeira, publicado pelo BNDES (2010), o mercado brasileiro de painéis de madeira ainda encontra-se em processo de consolidação e apresenta grande dinamismo, sobretudo no segmento de MDF, cujo consumo cresceu bem acima da taxa média do setor nos últimos 12 anos. A Figura 11 ilustra a distribuição de fábricas de painéis de madeira no Brasil.



Figura 11 - Localização das fábricas de painéis de madeira reconstituída no Brasil em 2009
Fonte: Associação Brasileira de Painéis de Madeira – ABIPA (2012c)

Observa-se que o MDF e o MDP dominam o mercado brasileiro. A evolução do consumo de painéis de madeira reconstituída no Brasil está intimamente ligada à evolução do PIB nacional. Para cada 1% de incremento do PIB (Produto Interno Bruto) entre 1997 e 2008, o MDP cresceu em média 2,4%. No caso do MDF, essa

relação atingiu 11,8 (BNDES, 2010).

Segundo a Associação Brasileira de Indústrias de Painéis de Madeira (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAINEIS DE MADEIRA – ABIPA, 2012a), a previsão de capacidade produtiva instalada no Brasil de MDF ao final de 2012 é de 5 mil m³ ao ano, superando a mesma previsão do MDP, 4,8 mil m³ ao ano.

As perspectivas para o setor de painéis de madeira é que a demanda por painéis de madeira reconstituída cresça, em média, 14,1% ao ano até 2013, sendo 15,7% ao ano tanto para MDP quanto para o MDF (BNDES, 2010).

O BNDES (2010) complementa afirmando que no mercado de MDF, para o mesmo cenário, após a entrada de novas capacidades produtivas previstas para o final de 2012 (mais 680 mil toneladas/ano), provavelmente em 2013 existirá uma nova rodada de investimentos, tomando como referência o patamar de utilização de capacidade que estimula novos investimentos, ilustrado na Figura 12.

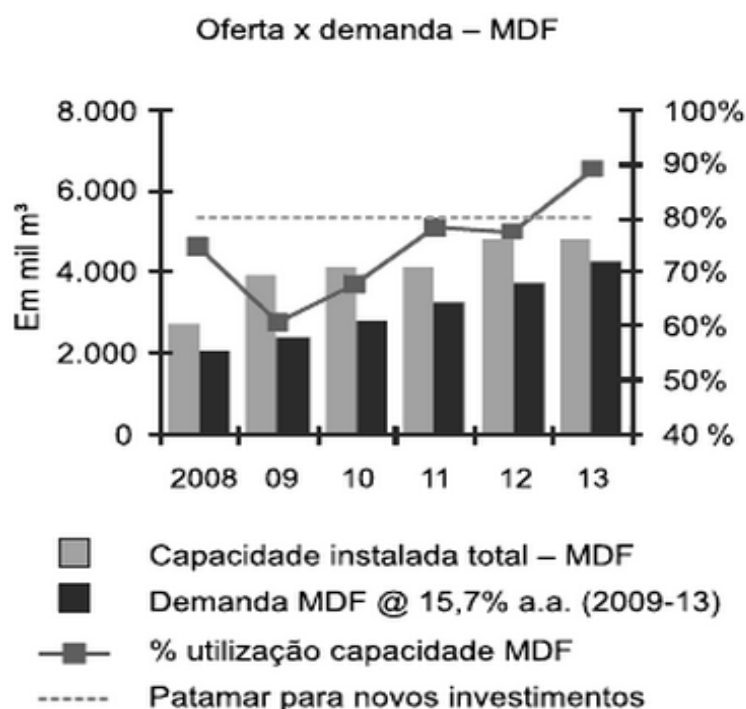


Figura 12 - Oferta x demanda de painéis de madeira
 Fonte: BNDES (2010)

Como resultado deste crescimento, surge a competitividade entre as empresas do ramo. A competitividade do setor de painéis de madeira no Brasil é caracterizada pelo fato do país estar entre os mais avançados do mundo na fabricação de painéis de madeira reconstituída. É também o país com o maior

número de fábricas de última geração (ABIPA, 2012b).

As atuais indústrias fabricantes de MDF possuem basicamente o mesmo sequenciamento de atividades e processos para a fabricação do painel. A próxima seção descreve sobre o processo produtivo do painel MDF.

3.2 ETAPAS DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE MDF

De acordo com o World Panel Industry (2012), as tecnologias e os processos de fabricação do painel MDF são bastante similares ao redor do mundo por se tratarem de uma tecnologia recente. Neste contexto, a Figura 13 ilustra o modelo padrão mundial do processo produtivo do painel MDF nas fronteiras “*gate-to-gate*” de seu ciclo de vida. Ou seja, as fronteiras limitam-se do portão ao portão da fábrica, onde se considera somente a etapa de fabricação do MDF.

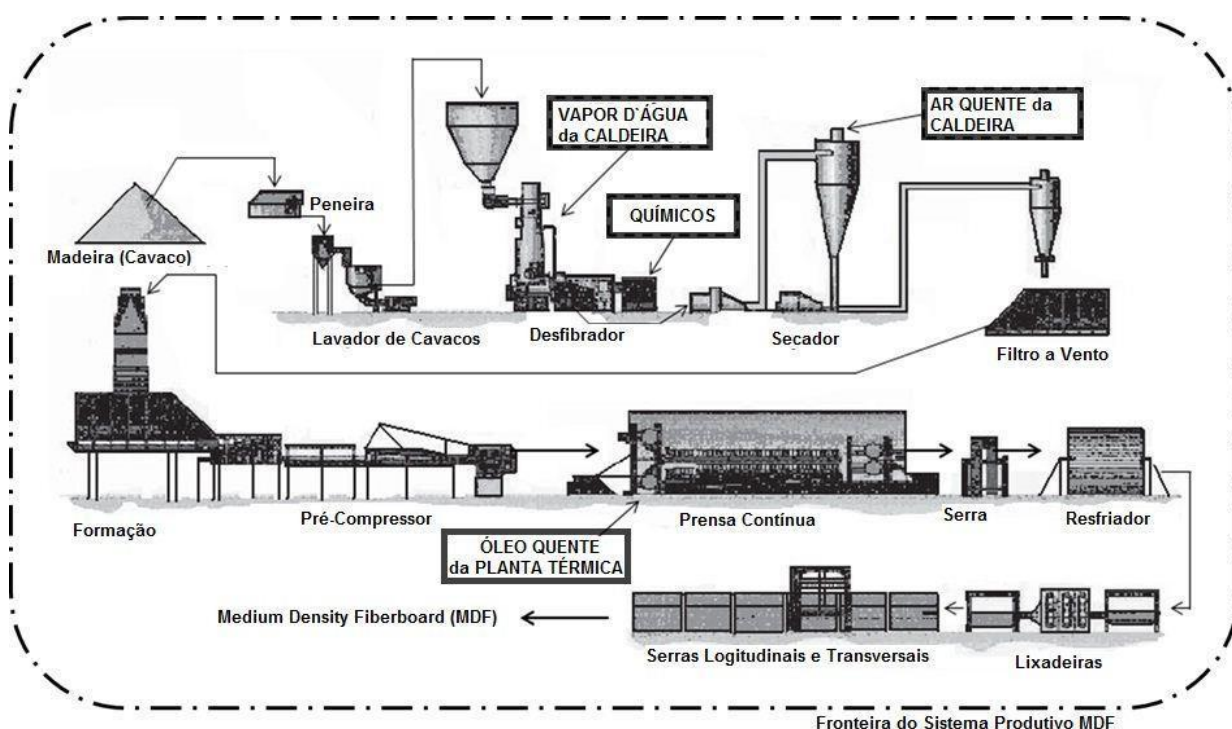


Figura 13 - Diagrama do sistema produtivo do MDF para ACV – Fronteira *gate-to-gate*
Fonte: Adaptado de Rivela, Moreira e Feijoo (2007)

O sistema produtivo consiste das seguintes etapas (BNDES, 2010; RIVELA, MOREIRA E FEIJOO, 2007; WILSON, 2010; WRAP, 2009):

- Pátio de Madeira (Alimentação de madeira): Os cavacos de madeira são entregues à fábrica, normalmente, a através do transporte rodoviário. Os

cavacos são provindos de pinus e eucalipto e são armazenados em um pátio de cavacos, expostos ao tempo. A umidade média dos cavacos pode variar entre 40 a 70%, em base seca;

- Peneira: Pequenas partículas (finos) e grandes partículas/cascas de madeira (*oversizes*) são removidas dos cavacos durante o processo de peneiramento. Os finos retornam a produção em outro processo, enquanto os *oversizes* são vendidos como biomassa para outra indústria. Apenas os cavacos com a granulometria desejada seguem no processo;

- Lavador de Cavacos: Os cavacos são lavados para remover as impurezas. Os resíduos e extrativos são tratados juntamente com efluentes em uma centrífuga na fábrica;

- Desfibrador: Os cavacos limpos são amolecidos em um digestor com vapor pressurizado e depois transportados para dentro de um desfibrador. Os cavacos de madeira aquecidos são então desfibrados – o processo consiste em reduzir mecanicamente a madeira através do cisalhamento até transformá-la em fibras. O cisalhamento da madeira acontece através de dois discos de metal rotativos, juntamente com a ação de alta temperatura e pressão, caracterizando um processo termomecânico;

- *Blowline* (Injeção de Químicos): Neste processo a resina, parafina e outros aditivos químicos são incorporados às fibras. A fricção e o contato entre as fibras ajudam a distribuir os químicos. A resina utilizada é à base de Ureia-Formaldeído (UF);

- Secador: A secagem das fibras acontece no tubo secador de ar quente, onde o ar quente é também responsável pelo transporte das fibras. O ar quente evapora a umidade e conduz a fibra até o filtro à vento. O ar quente é gerado em uma caldeira, que usualmente utiliza como combustível o pó de madeira gerado na fábrica e eventualmente utiliza o gás natural;

- Filtro à vento: Após a secagem, as fibras (com 7 a 9% de umidade) passam em um filtro à vento (*Sifter*). O *sifter* é utilizado para remover grumos de fibras compactados ou outros materiais que possam causar danos ao processo (borracha, metal) e ao produto final. As fibras secas são selecionadas e conduzidas à formação;

- Formação: As fibras secas e selecionadas seguem para um silo alimentador que faz uma distribuição uniforme de fibras em uma manta formadora

através da ação de um pendulo dosador de fibras. As fibras são uniformemente distribuídas e formam uma manta de fibras uniformes;

- Pré-Compressor: A manta de fibras passa por um desaerador (para remover o ar contido entre as fibras) e, finalmente, a manta é pré-comprimida. A manta de fibras é umedecida em sua superfície superior e inferior para entrar na prensa contínua;

- Prensa Contínua: A prensa opera em função de temperatura e pressão. A temperatura de operação acontece em torno de 170 a 230°C em tempo suficiente para curar a resina e com pressão específica para consolidar a manta em uma densidade desejada, controlando as propriedades físicas do painel. A prensa contínua é aquecida através do óleo térmico gerado pela planta térmica II;

- Serras: A serra diagonal corta o painel contínuo que sai da prensa, na direção transversal;

- Resfriador: O MDF vai primeiramente para um resfriador onde fica cerca de 40 minutos. Posteriormente, os painéis produzidos repousam por 48 horas para que suas propriedades físicas e mecânicas se estabilizem, antes de seguir para as lixadeiras;

- Lixadeiras: Os painéis são lixados em suas duas superfícies para alcançarem a espessura e suavidade requeridas. O pó gerado pelas lixadeiras retorna ao processo como combustível para caldeira;

- Serras Longitudinais e Transversais: Os painéis são cortados na sua largura e comprimento específico para ser comercializado. Os rejeitos gerados pela ação das serras retornam ao processo de produção, sendo reutilizados como combustível na Planta de Energia;

- Plantas de Energia Térmica: Com base no sistema de produção deste estudo, existem duas plantas térmicas. A primeira fornece vapor e ar quente para o processo produtivo. Seu principal combustível é a queima da biomassa (pó de madeira gerado na fábrica e comprado de outras indústrias) e ocasionalmente a queima do gás natural. A segunda planta térmica é responsável pelo aquecimento do óleo térmico utilizado na prensa contínua e seu combustível é o gás natural.

A similaridade entre as etapas do processo produtivo e a proximidade das tecnologias envolvidas na produção do MDF em indústrias em todo mundo (WORLD

PANEL INDUSTRY, 2012) alavancam a busca por alternativas que melhorem o desempenho e a competitividade das indústrias de MDF.

Através do processo produtivo definido, as fronteiras podem ser ampliadas englobando toda a cadeia produtiva. A Figura 14 (p.53) ilustra, de maneira sintetizada, o ciclo de vida da produção do painel MDF na abordagem *cradle-to-gate*, ou seja, do “berço ao portão” da empresa.

Nesta abordagem consideram-se todas as etapas anteriores à produção do painel na fronteira *gate-to-gate*, desde a extração das matérias-primas do MDF até o portão da fábrica. São quantificadas todas as entradas e saídas geradas para cada insumo utilizado na produção do painel, incluindo os serviços de transporte. Os dados que ampliam a fronteira para “*cradle-to-gate*” podem ser de origem secundária. Os dados secundários são obtidos através dos ICVs disponibilizados em base de dados. Os dados primários referem-se aos dados coletados diretamente no subsistema do estudo.

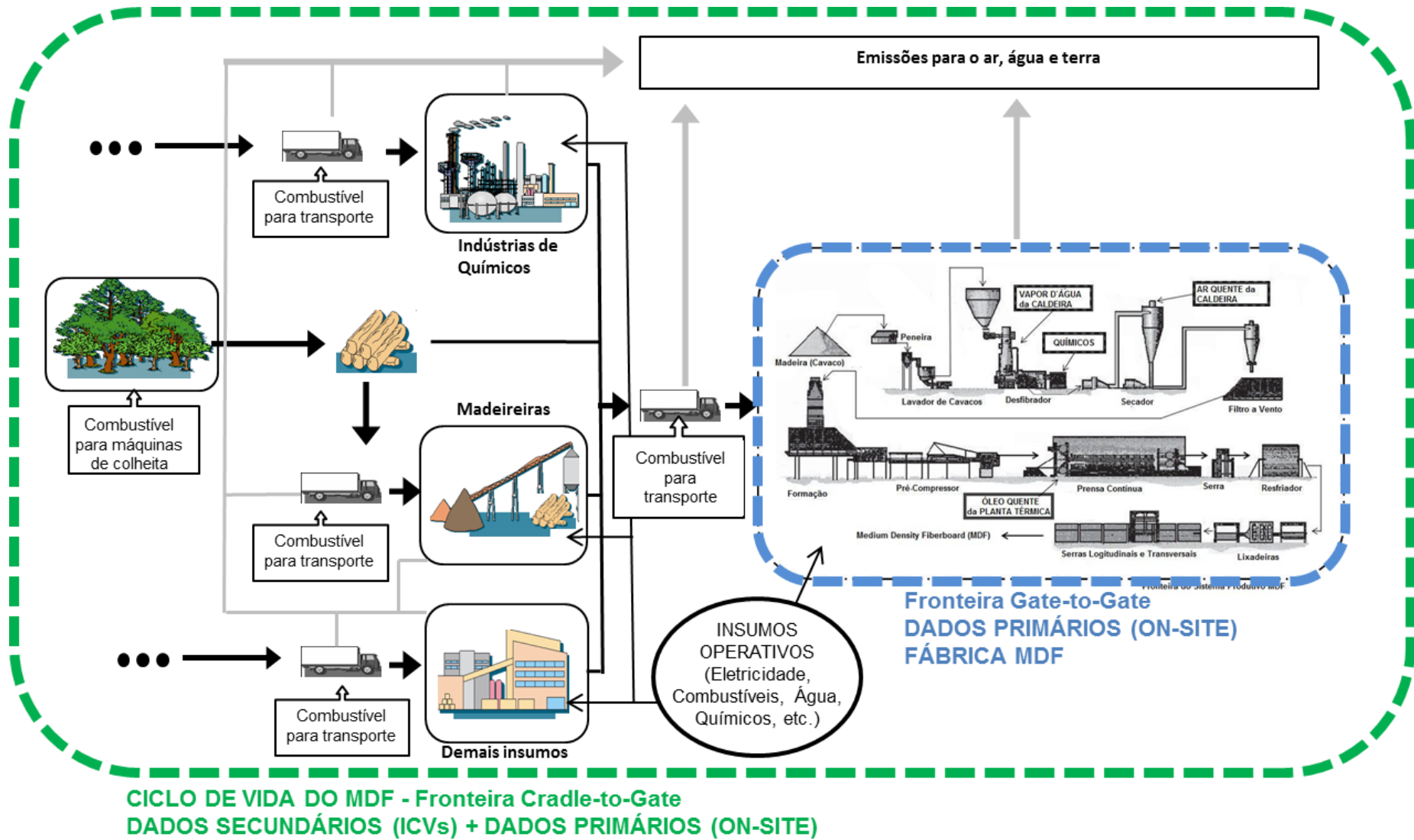


Figura 14 - Fronteira *cradle-to-gate* da produção do painel MDF
 Fonte: Adaptado de Rivela, Moreira e Feijoo (2007) e Wilson (2010)

4 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO MDF – ESTADO DA ARTE

Verifica-se entre as empresas atuantes na fabricação de MDF no país o comprometimento com o desenvolvimento sustentável. As empresas apresentam ações que estabelecem princípios que garantem a manutenção da integridade do ecossistema e seu compromisso com as comunidades onde atuam (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAINÉIS DE MADEIRA – ABIPA, 2012d). Entretanto, não há relatos na literatura sobre a Avaliação do Ciclo de Vida do painel MDF produzido pela indústria brasileira.

Devido à ausência de trabalhos de ACV dos painéis de MDF no Brasil, esta seção abrange publicações internacionais sobre a aplicação da metodologia ACV em painéis de madeira MDF. Foram levantados quatro estudos da ACV de painéis de madeira reconstituída do tipo MDF na literatura. Observa-se no Quadro 4 que as pesquisas foram desenvolvidas basicamente em países europeus e norte-americanos.

| Título do Estudo | Objetivo Geral | Abrangência/ Localização do Estudo | Software e base de dados utilizada | Referência |
|---|---|---|--|---|
| Inventário do Ciclo de Vida do MDF em termos de recursos, emissões, energia e carbono | Construir e disponibilizar um Inventário do Ciclo de Vida do MDF (<i>cradle-to-gate e on-site</i>) | Estudos de multicaseos: quatro indústrias de MDF norte-americanas | SimaPro, Ecoinvent v1.0. | Wilson (2010) |
| Inventário do Ciclo de Vida do MDF | Construir e disponibilizar um abrangente Inventário do Ciclo de Vida para um painel com papel chave na indústria, o MDF. | Estudos de multicaseos: três indústrias de MDF (duas indústrias espanholas e uma chilena) | SimaPro, IdeMat Database 2001 | Rivela, Moreira, Feijoo (2007) |
| Avaliação do Ciclo de Vida do MDF (<i>cradle-to-gate</i>) | Apresentar a ACV da indústria de MDF canadense a fim de fornecer o perfil ambiental do produto e apoiar políticas industriais e requisitos informacionais | Estudos de multicaseos: 4 indústrias de MDF canadenses | SimaPro, Ecoinvent v. 2.2 | Athena Sustainable materials Institute (2009) |

(Continua...)

(Continuação)

| Título do Estudo | Objetivo Geral | Abrangência/ Localização do Estudo | Software e base de dados utilizada | Referência |
|---|---|--|--|-------------|
| Avaliação do Ciclo de Vida do Ciclo Fechado de Reciclagem do MDF: <i>Microrelease Trial</i> | Avaliar o Impacto ambiental dos resíduos do MDF destinados a duas rotas finais diferentes (aterro e reciclagem) | Estudo de caso em uma indústria de MDF alemã com aplicação em uma indústria inglesa. | SimaPro, Ecoinvent | WRAP (2009) |

Quadro 4 - Levantamento de Estudos de ACV em painéis de madeira reconstituída tipo MDF
Fonte: Wilson (2010), Rivela, Moreira, Feijoo (2007), Athena Sustainable materials Institute (2009), WRAP (2009)

Os estudos utilizaram-se do *software* SimaPro, e as bases de dados da Ecoinvent (ECOINVENT, 2012) e da IdeMat (IDEMAT, 2012).

Nota-se que estudos de ACV de painéis de madeira são relativamente recentes, sendo que o primeiro envolvendo o MDF foi publicado em 2007 (RIVELA, MOREIRA, FEIJOO, 2007). Segundo os autores, desde que o uso da ACV tornou-se expressivo, durante os anos 90, houve esforços para desenvolver a ACV no setor madeireiro, especialmente em operações florestais. Entretanto não havia estudos de ACV ou ICV envolvendo os painéis de madeira.

O primeiro estudo de ACV envolvendo um painel de madeira, foi publicado por Rivela et al. (2006). Os autores construíram e disponibilizaram o ICV do MDP. O estudo foi justificado pelo fato que havia exemplos do uso de técnicas da ACV para avaliar cargas ambientais associadas a alguns produtos de madeira e sistemas de tecnologias florestais, entretanto, inventários do ciclo de vida de painéis de madeira ainda não tinham sido publicados na literatura.

Após a disponibilização do ICV do MDP, foram desenvolvidas pesquisas para publicar e fornecer o inventário de outro painel chave da economia mundial, o MDF. O estudo foi publicado por Rivela, Moreira e Feijoo (2007).

Após a fase inicial de desenvolvimento da ACV em painéis de madeira, foram identificados estudos que analisam o MDF no continente norte-americano. O estudo de Wilson (2010) fornece em base científica um Inventário do ciclo de vida do MDF produzido nos EUA em termos de recursos, emissões, energia e carbono.

Neste sentido, vale destacar as publicações de Rivela, Moreira e Feijoo (2007) e Wilson (2010) que estabeleceram os primeiros inventários do ciclo de vida

do painel MDF.

O Athena Sustainable Materials Institute (2009) avaliou o ciclo de vida de painéis MDF do Canadá. Tal estudo envolveu quatro indústrias do país e tinha como objetivos fornecer um perfil ambiental do ciclo de vida dos painéis MDF, permitir cada indústria comparar os resultados obtidos com as demais e apoiar na política ambiental industrial e em requisitos considerados adequados no âmbito ambiental para instituições do Canadá.

Também em 2009, o WRAP (*Waste & Resources Action Programme*) apresentou um relatório com resultados de um estudo da ACV de painéis MDF produzidos na Europa, no ano de 2008, para verificar resultados de desempenho ambiental de rotas alternativas para resíduos e para examinar os efeitos da reutilização de fibras de madeira no processo de produção de MDF.

O estudo englobou testes em uma indústria da Alemanha e apresentou resultados considerando a fabricação de MDF com parâmetros de processo e energia de uma empresa da Inglaterra (WRAP, 2009).

Estudos mais recentes (GONZÁLEZ-GARCIA et al., 2011; GONZÁLEZ-GARCIA et al., 2012) utilizam-se da literatura de ACV do MDF para analisar o perfil ambiental de produtos fabricados a partir do MDF utilizando dois métodos: um qualitativo e um quantitativo. Nestes estudos, a ACV é utilizada como a abordagem quantitativa, enquanto o método DfE (*Design for Environmental*) a qualitativa.

Apesar da inexistência de estudos de ACV do MDF produzido nas condições da cadeia produtiva de uma indústria brasileira, cabe ressaltar a importância de um estudo de ACV de outro painel de madeira desenvolvido por Silva (2012). O autor realizou, através de uma dissertação de mestrado, a primeira Avaliação do Ciclo de Vida de um painel de madeira no Brasil, o MDP.

Silva (2012) avaliou o ciclo de vida produtivo (*cradle-to-gate*) do painel MDP no Brasil. Destaca-se que o estudo apresenta dados de ICV e AICV que podem ser utilizados para estudar o ciclo de vida de outros painéis que no Brasil ainda não foram estudados, como é o caso do MDF. Os dados das cadeias produtivas da resina UF, por exemplo, também foram inventariados e podem ser assumidos em estudos futuros nacionais. Os métodos utilizados para a avaliação de impacto em seu estudo foram CML 2001, EDIP (1997) e USEtox (2008).

A fim de fornecer um embasamento teórico e fortalecer a justificativa na escolha de métodos de AICV deste estudo, foram analisados quais os principais

métodos utilizados em estudos de ACV de painéis de madeira reconstituída.

4.1 MÉTODOS DE AICV ADOTADOS EM ACV DE PAINÉIS DE MADEIRA

Foram levantados os principais estudos científicos que realizaram avaliação de impactos do ciclo de vida em painéis de madeira reconstituída. O Quadro 5 ilustra os estudos levantados, bem como o tipo do painel, o(s) método(s) empregado(s) e a abordagem do(s) método(s). Não foram listados estudos de ICV de painéis de madeira que não são empregados métodos de AICV, a citar Wilson (2010).

| Referências | Tipo de painel | Métodos de AICV empregado | Abordagem do método |
|---|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| Athena Sustainable Materials Institute (2009) | MDF | LUCAS e TRACI | <i>Midpoint</i> |
| Benetto, Becker, Welfring (2009) | OSB | Impact2002+/Eco-indicator | <i>Midpoint/Endpoint</i> |
| Garcia (2010) | Aglomerado (<i>Particleboard</i>) | CML | <i>Midpoint</i> |
| González-García et al. (2009b) | HDF | CML | <i>Midpoint</i> |
| Rivela, et al. (2006) | MDF | Eco-indicator | <i>Endpoint</i> |
| Rivela, Moreira e Feijoo (2007) | MDF | Eco-indicator | <i>Endpoint</i> |
| Santos (2010) | Aglomerado (<i>Particleboard</i>) | EDIP | <i>Midpoint</i> |
| Silva (2012) | MDP | CML/EDIP/USEtox | <i>Midpoint</i> |
| WRAP (2009) | MDF | CML | <i>Midpoint</i> |

Quadro 5 - Métodos de AICV utilizados em estudos de ACV de painéis de madeira reconstituída

Para os estudos do painel MDF houve equiparidade quanto às abordagens dos métodos empregados, houve dois estudos com abordagem *midpoint* e outros dois com *endpoints*. Entretanto, nota-se que, em geral, há certa predominância de métodos com abordagem *midpoint* nos estudos de ACV de painéis de madeira reconstituída, em especial do método CML.

Entre os estudos brasileiros listados no Quadro 5, (SANTOS, 2010; SILVA, 2012) ambos utilizaram-se do método EDIP. Silva (2012) também adotou os métodos CML e USEtox para a avaliação de impactos associados ao ciclo de vida do painel MDP (*Medium Density Particleboard*)

A adoção de múltiplos métodos é normalmente empregada pela inexistência de um método de avaliação de impactos do ciclo de vida específico para as condições brasileiras (PIEKARSKI et al., 2012). O levantamento do estado da arte de estudos de ACV já desenvolvidos sobre o produto em pesquisa, em características e locais similares, auxilia a seleção dos métodos a serem adotados.

A justificativa para a escolha de métodos para a ACV, bem como os demais procedimentos metodológicos para a aplicação da ACV e formulação de propostas de melhorias foram abordados no próximo capítulo.

5 METODOLOGIA

O objetivo deste capítulo é descrever os procedimentos metodológicos adotados para o alcance dos objetivos propostos neste estudo. O capítulo é subdividido nas seguintes seções: Classificação da pesquisa, Aplicação da pesquisa, Passos para desenvolvimento da pesquisa, Procedimentos para coleta e análise de dados, *Software* de ACV e base de dados utilizados, Seleção e pressupostos do estudo.

5.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

De acordo com as classificações da pesquisa existentes, o presente estudo pode ser classificado da seguinte maneira:

- Quanto à natureza: aplicada, pois forneceu propostas para melhoria do desempenho ambiental e avaliar o ciclo de vida do painel MDF. Os conhecimentos gerados podem ser aplicados em busca de melhores resultados ambientais.
- Quanto à forma de abordagem do problema: qualitativa e quantitativa, os dados associados ao ciclo de vida do painel MDF, bem como as avaliações de impactos são apresentados de forma quantitativa. Ao mesmo tempo, as propostas de melhorias formuladas a fim de otimizar o sistema produtivo caracterizam abordagens qualitativas.
- Quanto aos objetivos: descritiva, pois após a coleta de dados é realizada uma análise de relações entre os dados (ICV) para posterior determinação dos efeitos resultantes (AICV) para o sistema do produto;
- Quanto aos procedimentos técnicos: estudo de caso, pois envolve um estudo profundo e específico de um processo produtivo do MDF. Permite um conhecimento amplo e detalhado de cada etapa do sistema do produto.

5.2 APLICAÇÃO DA PESQUISA

O caso foi estudado em uma indústria produtora de MDF, localizada no território nacional. A capacidade produtiva da empresa é de aproximadamente 300.000 m³ de MDF ao ano e seu sistema de produção apresenta o estado da arte

da tecnologia brasileira e mundial para a fabricação de painéis MDF (BNDES, 2010; RIVELA, MOREIRA e FEIJOO, 2007). A indústria pesquisada pertence ao maior grupo empresarial fabricante de painéis de madeira reconstituída da América Latina, tal fato justifica a seleção da empresa para o estudo de caso.

5.3 PASSOS PARA DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A formulação das propostas de melhoria de desempenho ambiental do ciclo de vida da produção do MDF foi baseada nos resultados provenientes do desenvolvimento da ACV do mesmo.

Diante do exposto, o primeiro passo do desenvolvimento da pesquisa foi realizar a ACV da produção do painel MDF. O estudo do ciclo de vida do produto foi conduzido atendendo a metodologia proposta pelas normas ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a, ABNT 2009b). A realização da ACV se deu através da realização das seguintes atividades durante as quatro fases da ACV, descritas anteriormente no referencial teórico (Seção 2.1, p.23):

1ª Fase: Definição de Objetivo e Escopo

- Exposição dos objetivos da ACV;
- Definição do escopo do estudo;
- Definição do produto estudado;
- Definição das fronteiras do sistema de produto;
- Definição das funções do produto
- Definição da unidade funcional;
- Procedimentos de alocações, se utilizado;
- Definição das categorias de impacto selecionadas, metodologia para avaliação de impactos e interpretação subsequente;
- Requisitos de qualidade de dados;
- Definição de pressupostos;
- Definição de limitações do estudo;
- Descrição do sistema a ser estudado;
- Tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

2ª Fase: Análise de Inventário do Ciclo de Vida

- Coleta de dados;
- Validação dos dados;
- Correlação dos dados aos processos elementares;
- Correlação dos dados à unidade funcional;
- Agregação dos dados;

3ª Fase: Avaliação de Impactos

- Seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização;
- Correlação dos resultados do ICV (classificação);
- Cálculo de resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

4ª Fase: Interpretação

- Identificação de questões significativas;
- Construção da Matriz de Relacionamento dos Pontos Críticos Potenciais

As Conclusões, limitações e recomendações (elementos da última fase da ACV) estão apresentadas no Capítulo 8 - Conclusões - desta dissertação.

Com os resultados gerados pela ACV formularam-se as propostas de melhoria de desempenho ambiental. As propostas foram desenvolvidas com base em modificações/alterações nos pontos críticos potenciais (*hotspots*) com maiores contribuições nas categorias de impacto ambientais avaliadas ao longo do ciclo de vida do painel MDF.

As ações propostas de melhoria do desempenho ambiental estão apresentadas no Capítulo 7. Quando possível, realizaram-se análises sensitivas de cenários alternativos que possam subsidiar a incorporação das propostas de ações de melhoria. Os cenários alternativos foram avaliados através dos métodos USEtox 2008 (para categorias de impactos toxicológicos) e CML 2001 (para as demais categorias de impacto) a fim de verificar as relações entre causa e efeito das mudanças propostas e sua eficácia quanto aos impactos potenciais totais observados.

5.4 PROCEDIMENTOS PARA COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Como instrumento para coleta de dados, o estudo utilizou um questionário que foi aplicado junto aos gestores da indústria do caso estudado.

O questionário desenvolvido (Apêndice A) é uma adaptação dos modelos abaixo:

- a) Questionário elaborado pelo *Athena Sustainable Materials Institute* (2009) para a ACV do MDF canadense, o qual segue a metodologia proposta pela série de normas 14040;
- b) Exemplos de folhas de coleta de dados sugeridos pela última versão da ISO 14044 (ABNT, 2009b).

A coleta de dados foi referente ao ano operativo 2010, a qual reflete o Sistema Produtivo apresentado no próprio questionário na Seção B.1 – “Diagrama de Fluxos de Processos Elementares da Produção MDF” (Apêndice A).

O questionário foi subdividido em seis seções. A primeira seção (A.1) corresponde a informações básicas a serem respondidas pela empresa. Trata-se de informações gerais da fábrica para identificação e caracterização do ano operativo referente à coleta de dados.

A segunda seção (B.1) do questionário ilustra o diagrama de fluxos dos processos elementares da produção do MDF onde os gestores afirmam se as condições do processo produtivo foram retratadas de maneira fiel e se ainda existem outros processos elementares não incluídos no diagrama de fluxos apresentado. Caso existam alterações necessárias, o diagrama de fluxo, bem como as definições de fronteiras da ACV, precisam ser reconsideradas até que estejam condizentes ao real sistema de produção estudado.

Depois de finalizada a seção B.1, iniciou-se a coleta dos dados com o preenchimento das seções B.2 a B.5 do questionário. Estas tratam da coleta de dados dos processos elementares e dos transportes realizados. Os dados são coletados individualmente para cada um dos processos ilustrados no diagrama de fluxo. A Figura 14 apresenta as considerações e instruções para o preenchimento do questionário. As instruções foram apresentadas na cor azul.

| Seção B.2: Dados do Processo Elementar | | | | |
|---|---|---|--|---|
| Esta seção compreende as informações relativas a cada processo elementar citado na figura da seção B.1. Preencha uma tabela de dados para cada processo elementar de maneira mais completa possível e específica possível, garantindo a confiabilidade e qualidade do estudo. | | | | |
| Tabela de Dados de Processo Elementar | | | | |
| Preenchido por: (NOME DO GESTOR) | | Data do preenchimento: (DIA/MÊS/ANO) | | |
| Identificação do processo elementar: (NOME DO PROCESSO, EXEMPLOS: SECADOR, PRENSA, ETC.) | | Local de Origem dos Dados: (LOCAL EM QUE OS DADOS FORAM COLETADOS, EXEMPLOS: SISTEMA SUPERVISÓRIO, ERP, RELATÓRIO DE EMISSÕES, ETC.) | | |
| Período de Tempo (ano): (ANO EM QUE OS DADOS SE REFEREM) | | Mês de Início: (MÊS DE INÍCIO EM QUE OS DADOS SE REFEREM) | Mês de Término: (MÊS DE TÉRMINO EM QUE OS DADOS SE REFEREM) | |
| Descrição do Processo Elementar: (pode-se anexar folhas adicionais, se necessário) (DESCRIÇÃO DO QUE ACONTECE NO PROCESSO ELEMENTAR, QUAIS AS TECNOLOGIAS UTILIZADAS, QUAL A SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES EXECUTADAS E DEMAIS CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DO PROCESSO ELEMENTAR) | | | | |
| Entrada de material | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem | Origem |
| (NOME DO MATERIAL, EXEMPLO: CAVACO DE MADEIRA DE PINUS, RESINA UF, ETC.) | (UNIDADE DE MEDIDA DO MATERIAL, EXEMPLO: KG, TONELADA, M ³ , ETC.) | (TOTAL DE ENTRADA DE MATERIAL NO PERÍODO ANALISADO) | (INFORMAR QUAIS OS CRITÉRIOS DE CÁLCULOS (LINEARES OU ESTATÍSTICOS) UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR A ENTRADA DE MATERIAL, BEM COMO INFORMAR AS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO MATERIAL (DENSIDADE, VOLUME, ETC.) | (ORIGEM DOS DADOS COLETADOS, EXEMPLO: ERP, REGISTROS, ETC.) |
| Consumo de Água ^a | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem | Origem |
| (INFORMAR A ORIGEM DA ÁGUA, EXEMPLO: REDE MUNICIPAL, ARTESIANA, ESTAÇÃO DE TRATAMENTO INTERNA, ETC.) | (UNIDADE DE MEDIDA DA ÁGUA, EXEMPLO: M ³) | (TOTAL DE ENTRADA DE ÁGUA NO PERÍODO ANALISADO) | (INFORMAR QUAIS OS CRITÉRIOS DE CÁLCULOS (LINEARES OU ESTATÍSTICOS) UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR A ENTRADA DE ÁGUAS, BEM COMO INFORMAR AS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA MESMA | (ORIGEM DOS DADOS COLETADOS, EXEMPLO: ERP, REGISTROS, ETC.) |
| Entradas de Energia ^b | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem | Origem |
| (TIPO DE ENERGIA CONSUMIDA, EXEMPLO: ELETRICIDADE, TÉRMICA, ETC.) | (UNIDADE DE MEDIDA DA ENERGIA, EXEMPLO: M J, KWH, ETC.) | (TOTAL DE ENTRADA DE ENERGIA NO PERÍODO ANALISADO) | (INFORMAR QUAIS OS CRITÉRIOS DE CÁLCULOS (LINEARES OU ESTATÍSTICOS) UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR A ENTRADA DE ENERGIA, BEM COMO INFORMAR AS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA MESMA | (ORIGEM DOS DADOS COLETADOS, EXEMPLO: ERP, REGISTROS, ETC.) |
| Saída de material (incluindo produtos) | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem | Origem |
| (NOME DO(S) MATERIAL(IS) GERADOS, EXEMPLO: CAVACOS SELECIONADOS, PAINEL MDF, ETC.) | (UNIDADE DE MEDIDA DO MATERIAL, EXEMPLO: KG, TONELADA, M ³ , ETC.) | (TOTAL DE SAÍDA DE MATERIAL NO PERÍODO ANALISADO) | (INFORMAR QUAIS OS CRITÉRIOS DE CÁLCULOS (LINEARES OU ESTATÍSTICOS) UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR A SAÍDA DE MATERIAL, BEM COMO INFORMAR AS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO MATERIAL (DENSIDADE, VOLUME, ETC.) | (ORIGEM DOS DADOS COLETADOS, EXEMPLO: ERP, REGISTROS, ETC.) |
| NOTA Os dados nesta folha de coleta de dados referem-se a todas as entradas e saídas coletadas durante o período de tempo especificado, antes de possíveis alocações. | | | | |
| ^a Por exemplo água superficial, água potável. | | | | |
| ^b Por exemplo, óleo combustível pesado, óleo combustível médio, óleo combustível leve, querosene, gasolina, gás natural, propano, carvão, biomassa, eletricidade da rede. | | | | |
| Seção B.3: Dados para Análise de Inventário de Ciclo de Vida | | | | |
| O questionário abaixo permite a análise de Inventário do Ciclo de Vida. É necessário informar os dados para todos os processos elementares existentes no diagrama da seção B.1. | | | | |
| Identificação de Processo Elementar: | | | Local de Origem dos Dados: | |
| Emissões atmosféricas ^a | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem (anexar folhas, se necessário) | |
| (NOME DO COMPONENTE EMITIDO PARA ATMOSFERA) | (UNIDADE DE MEDIDA DA EMISSÃO, EXEMPLO: KG, GRAMAS, ETC.) | (TOTAL DE SAÍDA DE EMISSÃO NO PERÍODO ANALISADO) | (INFORMAR QUAIS OS CRITÉRIOS DE CÁLCULOS (LINEARES OU ESTATÍSTICOS) UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR A SAÍDA DE MATERIAL, BEM COMO INFORMAR AS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA EMISSÃO (CONCENTRAÇÃO, VAZÃO, ETC.) | |
| Liberações para Água ^b | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem (anexar folhas, se necessário) | |
| (NOME DO COMPONENTE EMITIDO PARA ÁGUA) | (UNIDADE DE MEDIDA DA EMISSÃO, EXEMPLO: KG, GRAMAS, ETC.) | (TOTAL DE SAÍDA DE EMISSÃO NO PERÍODO ANALISADO) | (INFORMAR QUAIS OS CRITÉRIOS DE CÁLCULOS (LINEARES OU ESTATÍSTICOS) UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR A SAÍDA DE MATERIAL, BEM COMO INFORMAR AS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA EMISSÃO (CONCENTRAÇÃO, VAZÃO, ETC.) | |
| Liberações para o solo ^c | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem (anexar folhas, se necessário) | |
| (NOME DO COMPONENTE EMITIDO PARA SOLO) | (UNIDADE DE MEDIDA DA EMISSÃO, EXEMPLO: KG, GRAMAS, ETC.) | (TOTAL DE SAÍDA DE EMISSÃO NO PERÍODO ANALISADO) | (INFORMAR QUAIS OS CRITÉRIOS DE CÁLCULOS (LINEARES OU ESTATÍSTICOS) UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR A SAÍDA DE MATERIAL, BEM COMO INFORMAR AS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA EMISSÃO (CONCENTRAÇÃO, VAZÃO, ETC.) | |
| Outras Liberações ^d | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem (anexar folhas, se necessário) | |
| (NOME DO COMPONENTE EMITIDO EM OUTROS LUGARES) | (UNIDADE DE MEDIDA DA EMISSÃO, EXEMPLO: KG, GRAMAS, ETC.) | (TOTAL DE SAÍDA DE EMISSÃO NO PERÍODO ANALISADO) | (INFORMAR QUAIS OS CRITÉRIOS DE CÁLCULOS (LINEARES OU ESTATÍSTICOS) UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR A SAÍDA DE MATERIAL, BEM COMO INFORMAR AS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA EMISSÃO (CONCENTRAÇÃO, VAZÃO, ETC.) | |
| Descrever quaisquer cálculos específicos, coleta de dados, amostragem ou variação da descrição das funções do processo elementar (anexar folhas, se necessário). | | | | |
| ^a Por exemplo, inorgânicos: Cl ₂ , CO, CO ₂ , poeira/particulado, F ₂ , H ₂ S, H ₂ SO ₄ , HCl, HF, N ₂ O, NH ₃ , NOx, SOx; orgânicos: hidrocarbonetos, PCB, dioxinas, fenóis; metais: Hg, Pb, Cr, Fe, Zn, Ni. | | | | |
| ^b Por exemplo: DBO, DQO, ácidos, Cl ₂ , CN ₂ -, detergentes/óleos, compostos orgânicos dissolvidos, F ⁻ , íons de Fe, íons de Hg, hidrocarbonetos, Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , organoclorados, outros metais, outros compostos de nitrogênio, fenóis, fosfatos, SO ₄ ²⁻ , sólidos em suspensão. | | | | |
| ^c Por exemplo: resíduos minerais, resíduo industrial misto, resíduos sólidos urbanos, resíduos tóxicos (por favor listar os compostos incluídos nesta categoria de dados). | | | | |
| ^d Por exemplo: ruído, radiação, vibração, odor, calor perdido. | | | | |
| Seção B.4: Dados para transporte a montante do Processo | | | | |
| Este questionário permite analisar os dados referentes a transporte de produtos. O questionário abaixo refere-se ao transporte rodoviário. Caso exista o modal ferroviário ou aquático o padrão segue o mesmo. | | | | |
| Nome do produto intermediário | | Transporte rodoviário | | |
| | Distância Km | Capacidade do Caminhão | Carga Real (toneladas) | Retorno Vazio (Sim/Não) |
| (NOME DO INSUMO, EXEMPLO: CAVACO DE MADEIRA, RESINA UF, PARAFINA, ETC.) | (DISTÂNCIA MÉDIA DO(S) FORNECEDOR(ES) E INDÚSTRIA) | (CAPACIDADE DE CARGA DO CAMINHÃO) | (CAPACIDADE REAL DE CARGA FEITA PELO CAMINHÃO) | (INFORMAR SE O CAMINHÃO RETORNA COM/SEM CARGA A SUA ORIGEM) |
| Seção B.5: Dados para transporte interno | | | | |
| Nesta seção é inventariado o transporte interno em uma instalação para cada processo elementar descrito na seção B.1. Os valores são coletados durante um período específico de tempo e mostram as quantidades reais de combustível utilizadas. | | | | |
| Combustível | Quantidade total de entrada transportada | | Consumo total de combustível | |
| | Óleo Diesel | | TOTAL DE COMBUSTÍVEL UTILIZADO PARA TAL TRANSPORTE (INFORMAR A UNIDADE DE MEDIDA, EXEMPLO: LITROS, M ³ , ETC.) | |
| | Gasolina | | | |
| | GLP | | | |
| | | (TOTAL DE TRANSPORTE DE UM MATERIAL ESPECÍFICO NO PERÍODO DETERMINADO PARA O QUESTIONÁRIO, EXEMPLO: TRANSPORTE INTERNO DE CAVACOS DE MADEIRA) | | |

Figura 15 - Instruções para preenchimento do questionário
Fonte: Autoria Própria.

A coleta de dados também envolveu em alguns casos, a presença de supervisores e analistas de diferentes áreas para o alcance das informações necessárias. O pesquisador conduziu e acompanhou presencialmente a coleta de dados e o preenchimento do questionário a fim de garantir a qualidade dos dados primários fornecidos e validá-los. A coleta dos dados foi realizada durante um período de sete meses.

Para a tabulação e análise de dados, de modo a correlacioná-los aos processos elementares e à unidade funcional, foram seguidos os requisitos normativos expostos pelas ISO 14040 e 14044, detalhados na Seção 2.1 deste trabalho. A correlação dos dados com os processos elementares e com a unidade funcional foi desenvolvida através do *software* de ACV.

5.5 SOFTWARE DE ACV E BASE DE DADOS UTILIZADOS

O *software* utilizado neste estudo é o Umberto® v. 5.6 *Academic*, apresentado e discutido na Seção 2.3 (p.39). O mesmo possui interatividade com a Base de Dados de Inventários do Ciclo de Vida Ecoinvent v.2.2.

Os dados coletados foram alimentados e modelados no *software*. O Apêndice B apresenta as modelagens realizadas no *software* Umberto® do sistema e dos subsistemas da produção do painel de madeira MDF (fronteira *cradle-to-gate*).

Com a modelagem, e alimentação e correlação dos dados primários e secundários com os processos elementares e a unidade funcional, tornou-se possível avançar a terceira fase da ACV - Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida – através do uso dos métodos de AICV.

5.6 SELEÇÃO E CONSIDERAÇÕES DOS MÉTODOS DE AICV

O levantamento do estado da arte de métodos de AICV utilizados em ACVs com objetivos próximos e produtos similares (apresentados no Capítulo 4, p.57), subsidiou o processo de seleção de método de uma avaliação do ciclo de vida.

De acordo com o levantamento realizado, pôde-se analisar o estado da arte dos estudos de ACV de painéis de madeira. Entre diversas características abordadas, foram investigados os principais métodos adotados na avaliação de

impactos do ciclo de vida. Os resultados mostram que há predominância de métodos com abordagem do tipo *midpoint* nos estudos científicos mundiais, com destaque ao CML 2001. Nos estudos nacionais, pesquisas que aplicaram ACV em painéis de madeira utilizaram os métodos EDIP 1997 e o USEtox 2008, além do próprio CML 2001.

Nesta premissa, este estudo adotou estes três métodos (CML 2001, EDIP 1997 e USEtox 2008) para avaliação de impactos do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. Partiu-se dos pressupostos obtidos no levantamento do estado da arte, incluindo a credibilidade da utilização destes métodos em pesquisas a nível global de ACV e suas adoções em outros estudos de painéis de madeira a nível nacional.

Complementarmente, os métodos CML 2001, EDIP 1997 e USEtox 2008 são condizentes com os objetivos propostos para este estudo, visto que possuem categorias de impactos condizentes com os principais impactos ambientais associados ao ciclo de vida de produção de painéis de madeira no Brasil, abordados por Silva (2012) e Chipanski (2006): acidificação, aquecimento global, formação fotoquímica de ozônio, eutrofização, ecotoxicidade e toxicidade humana.

Durante o levantamento teórico deste trabalho, especificamente na Seção 2.2 (p.34), discutiu-se a grande maioria dos métodos de AICV existentes, tratando dos métodos CML 2001, EDIP 1997 e USEtox 2008 de maneira mais aprofundada e específica.

As categorias de impactos definidas para este estudo foram descritas no item “Categorias de impacto selecionadas, metodologia para avaliação de impactos e interpretação subsequente”, disposto na Seção 6.1.2 – “Definição do Escopo da ACV”. Cada categoria de impacto foi avaliada nas fronteiras *cradle-to-gate* e *gate-to-gate*, na seção de AICV (6.3).

6 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DO PAINEL DE MADEIRA MDF

Este capítulo apresenta o início dos resultados obtidos nesta dissertação. O capítulo 6 objetiva relatar a ACV realizada da produção do painel de madeira MDF. Neste capítulo apresentam-se os resultados subdivididos nas quatro fases da ACV: Definição de Objetivo e Escopo, Análise de Inventário do Ciclo de Vida, Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida e Interpretação.

6.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

6.1.1 Objetivos da ACV

Os objetivos almejados em um estudo de ACV devem compreender e declarar de forma clara e concisa três aspectos anteriormente mencionados (p. 25). São eles: a aplicação pretendida, as razões de se conduzir o estudo e o público alvo.

Quanto à aplicação pretendida, este trabalho objetivou propor oportunidades de melhoria do perfil ambiental ao longo do ciclo de vida do produto e do processo de produção do painel de madeira MDF. Para tanto, se conduziu a ACV da produção do painel fabricado em uma indústria brasileira, analisando diferentes cenários produtivos.

Entre as principais razões para a execução deste estudo, estão inclusas: geração de conhecimento científico para direcionamento de ações e pesquisas para a redução de aspectos e impactos ambientais associados ao ciclo de vida do MDF, e subsídio em estudos futuros devido à disponibilidade de dados condizentes de um caso nacional da produção de painéis MDF.

O público alvo deste trabalho concentra-se no meio acadêmico, em pesquisadores e praticantes de ACV, e nas indústrias fabricantes de painéis de madeira. Os resultados, conclusões e recomendações desta dissertação podem ser utilizados para o direcionamento de pesquisas científicas, bem como no auxílio à tomada de decisão sustentável nas indústrias produtoras de painéis de madeira MDF.

6.1.2 Escopo da ACV

O escopo da ACV resume-se a formulação de premissas que estabelecem as dimensões deste estudo. Ou seja, são definidos elementos que delimitam onde o estudo começa e se finda, quais os subsistemas que serão envolvidos e qual o nível de detalhamento da ACV (tendo em vista o objetivo e seu público-alvo).

Nesta afirmativa, a definição do escopo da ACV envolve o detalhamento dos seguintes tópicos requeridos pelas normas NBR ISO 14040 (2009) e NBR ISO 14044 (2009):

- O sistema de produto estudado:

O sistema de produto para o ciclo de vida de produção industrial do painel de madeira tipo MDF na fronteira *cradle-to-gate* é ilustrado na página seguinte (Figura 16, p.68). O sistema de produto compreende as etapas de produção industrial *on-site (gate-to-gate)* do painel MDF descritas e ilustradas anteriormente junto a Figura 13 (p.49).

Na figura 16 (Sistema de Produto e Fronteiras definidas para a produção do painel MDF) nota-se que existem doze unidades de processo na fronteira do sistema do produto, iniciando na etapa “1. Pátio de Cavacos” e finalizando na etapa “12. Planta Térmica II”. Estas unidades de processos, obviamente, necessitam de insumos para a produção do painel. Neste sentido, as cadeias produtivas das matérias-primas, insumos e transportes necessários no sistema do produto estudado apresentam-se na cor azul. Ao todo são dez subsistemas que fornecem recursos para o sistema do produto do painel MDF, são eles: produção de resina UF (Ureia-Formaldeído), produção de parafina, produção de ureia, produção de cavaco de madeira de pinus, produção de cavacos de madeira de eucalipto, produção de sulfato de amônio, produção de energia elétrica, produção de gás natural, produção de óleo diesel, e transportes.

Ainda em referência à Figura 16, foram demarcadas outras três fronteiras além da fronteira do sistema do produto: tecnosfera, biosfera e a fronteira do sistema *cradle-to-gate*. A tecnosfera é condizente com as fases do ciclo de vida que são necessárias para a obtenção do painel MDF, incluindo os subsistemas excluídos na fronteira do sistema do produto. Ou seja, envolvem todos os elos da cadeia produtiva industrial do painel MDF até a extração dos recursos naturais necessários

para a fabricação dos insumos e matérias-primas requeridos no ciclo de vida do produto. Por sua vez, a biosfera é a fonte que fornece os recursos naturais para a produção dos produtos e também é a receptora dos fluxos elementares, tais como as emissões para ar, água e solo (ILCD, 2010).

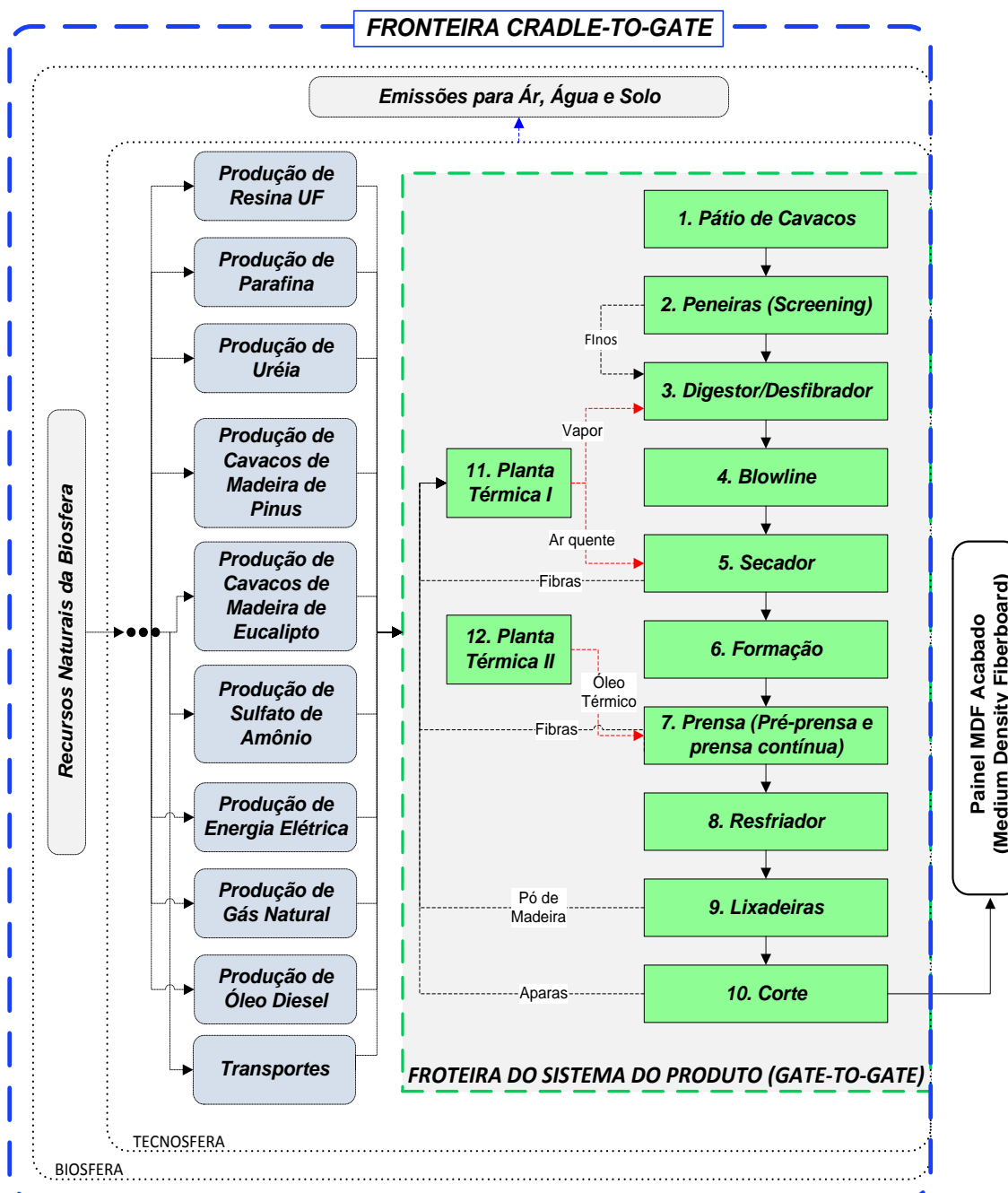


Figura 16 - Sistema de produto e fronteiras definidas para a produção do painel MDF
Fonte: Autoria Própria.

Neste panorama, a Figura 16 apresenta a fronteira do sistema do produto e

sua interação com subsistemas antecessores, com a tecnosfera e a biosfera para a abrangência delimitada no estudo do tipo *cradle-to-gate*, conforme detalhado a seguir, nas fronteiras do sistema de produto.

- Fronteiras do sistema de Produto:

As fronteiras do sistema do produto delimitam as dimensões do estudo de ACV. A definição destas fronteiras permite definir a abrangência do estudo em relação ao sistema natural, a fronteira geográfica, a fronteira temporal e a fronteira tecnológica.

Em termos práticos, a delimitação do sistema do produto indica quais subsistemas fazem parte e quais não foram considerados no estudo ACV de acordo com os objetivos traçados pelo mesmo. Em relação ao sistema natural, esta ACV apresenta uma abordagem *cradle-to-gate* para o sistema produtivo analisado (Figura 16, p. 68). Ou seja, as fronteiras do sistema do MDF compreendem as etapas do ciclo de vida de extração e beneficiamento de recursos naturais, incluindo os elos produtivos industriais para a transformação das matérias-primas e insumos demandados para a produção do painel de madeira MDF.

A fase de uso e destinação final do painel MDF não abrangem as fronteiras definidas para este estudo. Diferentes autores (ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2009; WRAP, 2009; WILSON, 2009) justificam a exclusão das etapas posteriores à produção pela dificuldade de rastrear o uso e o destino final do MDF, devido seu longo ciclo de uso, sua ampla variedade de aplicações no setor de móveis e arquitetura de interiores, e as diferentes destinações finais realizadas para os painéis.

Na delimitação da fronteira do sistema do produto utilizou-se um critério de corte baseado em balanço de massa. Os materiais que apresentaram consumo menor que 1,0% em relação à massa total diretamente utilizada foram excluídos do estudo. Nesta regra, os consumos de óleos lubrificantes e a geração de cinzas de caldeira foram desconsiderados.

O Quadro 6 apresenta os subsistemas que estão inclusos e os sistemas que foram excluídos das fronteiras do estudo. Neste quadro foram também apresentadas as referências dos dados secundários adotados para os subsistemas definidos nas fronteiras do estudo.

| | Origem dos dados | Referências dos Dados e Comentários |
|--|-------------------------|---|
| Subsistemas Incluídos | | |
| Produção de resina UF | Dados Secundários | Silva (2012) |
| Produção de parafina | Dados Secundários | Ecoinvent (2010f) |
| Produção de ureia | Dados Secundários | Ribeiro (2009) |
| Produção de cavaco de madeira de pinus | Dados Secundários | Ecoinvent (2010i) |
| Produção de cavacos de madeira de eucalipto | Dados Secundários | Silva (2012) e Ecoinvent (2010h) |
| Produção de Sulfato de Amônio | Dados Secundários | Ecoinvent (2010a) |
| Produção de energia elétrica | Dados Secundários | Ecoinvent (2010d) |
| Produção de gás natural | Dados Secundários | Ecoinvent (2010e) |
| Produção de óleo diesel | Dados Secundários | Ecoinvent (2010b) |
| Transportes | Dados Secundários | Ecoinvent (2010g) |
| Sistemas Não Considerados | | |
| Materiais com massa menor de 1,0% em relação à massa total | - | Em virtude desta regra não foram contabilizados o uso de lubrificantes e a emissão de cinzas. |
| Infraestrutura | - | Esta ACV não englobou dados relativos a bens de capital, tais como unidades fabris, edifícios, maquinários, equipamentos e estradas. |
| Bens de capital pessoais | - | Itens como materiais de escritório, transporte e alimentação de funcionário não abrangem o escopo do estudo. |
| Insumos periódicos e/ou auxiliares | - | Não foram considerados insumos como embalagens de produtos, capas, cabos, filtros, mangueiras, solventes para limpeza, tintas, lixas, sapatas, fitas, componentes químicos utilizados no tratamento de água e esgoto da fábrica, etc. |
| Fase de uso e destinação final do produto | - | Devido ao objetivo traçado por esta ACV e pela dificuldade de rastrear o uso e o destino final do MDF, as fases posteriores à produção foram desconsideradas. |

Quadro 6 - Considerações à cerca sistemas incluídos e excluídos da ACV do painel MDF

Em consulta a outros estudos de ACV de painéis de madeira encontrados na literatura (ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2009; WRAP, 2009; WILSON, 2009; SILVA, 2012) pode se constatar que é admissível a exclusão de

sistemas que não apresentem contribuições significativas ou relevantes para o objetivo delineado no estudo ACV, entre eles: produção e manutenção de bens de capital, produção e manutenção de bens pessoais, produção de insumos como entradas auxiliares, materiais com baixa representatividade relativa aos balanços de massa, energia, e significância ambiental.

Neste sentido, como o objetivo deste trabalho foi identificar e direcionar ações para a melhora do desempenho ambiental do produto e do processo de produção industrial do painel MDF em uma indústria, as exclusões de sistemas listados no Quadro 6 (p.70) foram consideradas plausíveis.

Quanto às fronteiras geográficas, cabe salientar que, apesar dos dados serem relativos a uma indústria fabricante de painéis MDF no Brasil, as conclusões obtidas neste estudo podem ser utilizadas por outras indústrias e em pesquisas científicas a nível nacional, já que os processos tecnológicos para a produção do painel MDF no Brasil possuem similaridade (ver Capítulo 3). Trata-se de uma tecnologia de fabricação recente, altamente automatizada e que teve seu *startup* no país nos anos 2000.

As fronteiras tecnológicas desta pesquisa remetem similaridade com o estado da arte tecnológico mundial para a fabricação de painéis de madeira do tipo MDF. As características observadas na empresa pesquisada, tais como tecnologia, equipamentos e sequenciamento de produção possuem reciprocidade com as evidenciadas em literatura (WORLD PANEL INDUSTRY, 2012; BNDES SETORIAL, 2008; BNDES SETORIAL, 2010; ABNT, 2006) e com a realidade tecnológica observada nas demais indústrias nacionais citada pela Associação Brasileira de Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA, 2012b).

A fim de estreitar a distância tecnológica referente aos dados secundários (ICVs) utilizados neste estudo (derivados de base de dados de ACV), os quais não são provenientes de estudos brasileiros, assumiram-se pressupostos (descritos na p.77) e utilizaram-se dados de inventários nacionais (apresentados na p.76), para máxima aproximação possível ao contexto no qual este trabalho está inserido.

Por fim, quanto às fronteiras temporais, os dados coletados nesta pesquisa são relativos à produção do painel MDF durante o ano de 2010. Presume-se, de acordo com opiniões de especialistas e gestores internos da empresa pesquisada, que a atual tecnologia e os insumos utilizados para a fabricação dos painéis perdurem em torno de, aproximadamente, seis anos. Até este período, é possível

que algumas expectativas e desafios tecnológicos sejam alcançados, e transformem o cenário de produção de painéis de madeira. Entre eles, cita-se a substituição da resina com base em ureia-formaldeído por uma resina “verde”, de fonte renovável, que seja acessível e permita manter a competitividade da empresa no setor.

- As funções do produto:

O painel de madeira reconstituída do tipo MDF possui uma ampla aplicabilidade no contexto de móveis de madeira e arquitetura de interiores. A função do painel MDF (ou seja, a utilidade e/ou aplicação que o produto está disposto a cumprir) depende exclusivamente do tipo de móvel ou da arquitetura de interiores planejada. Desta forma, esta dissertação não define uma função específica para o produto.

O painel de madeira MDF se trata de produto intermediário que pode possuir diversas utilidades e aplicações. Dependendo de sua função, o painel pode possuir até mesmo outras etapas de produção posteriores para acabamento superficial, tais como revestimento melamínico, fórmico, adesivo ou pinturas. Desta forma, o painel MDF, enquanto um produto intermediário, possui sua função dependente do produto final a qual é atribuído.

- Unidade funcional:

A unidade volumétrica é a adotada como referência para mensurar dados associados a prévios estudos associados ao ciclo de vida de painéis de madeira (RIVELA, et al., 2007; WILSON, 2010; ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2009; WRAP, 2009; SILVA, 2012).

Neste sentido, o fluxo de referência, bem como os fluxos de materiais, energias e emissões desta dissertação foram expressos em função da unidade funcional adotada: 1,0 m³ de MDF com espessura média de 16 mm, densidade média de 683 kg/m³ (em base seca, sem umidade), sem revestimentos de superfície e atendendo os requisitos normativos previstos nos padrões técnicos que regem a produção de painéis de madeira MDF na norma brasileira ABNT NBR 15316-1:2009 (Chapas de fibras de média densidade).

- Procedimentos de alocação:

O sistema de produto definido não apresentou multifuncionalidade e não

gerou coprodutos para que haja necessidade de procedimento de alocação.

- Categorias de impacto selecionadas, metodologia para avaliação de impactos e interpretação subsequente:

Para a avaliação de impactos associados ao ciclo de vida do painel de madeira MDF foram optados por três métodos de AICV: CML 2001, EDIP 1997 e USEtox 2008. A justificativa, considerações gerais e características de cada método foram apresentadas na metodologia do trabalho, seção 5.6 (Seleção e considerações dos métodos de AICV, p. 66) e na seção 4.1 (Métodos de AICV adotados em ACV de painéis de madeira, p. 59) da fundamentação teórica.

De acordo com a base de dados Ecoinvent v.2.2 do *software* Umberto® utilizado neste trabalho, os métodos CML 2001, EDIP 1997 e USEtox 2008 tiveram suas últimas alterações e revisões no ano de 2010.

A definição das categorias de impactos que envolvem este trabalho, bem como os métodos de AICV que as contemplam, podem ser visualizadas no Quadro 7.

| Categorias de Impactos Utilizadas | Definição | CML 2001 | EDIP 1997 | USEtox 2008 |
|-----------------------------------|--|----------|-----------|-------------|
| Acidificação | É a medida da capacidade que certas substâncias possuem em receber e liberar íons de H ⁺ que resultam em redução de pH, contribuindo para a acidez do solo e da água. O principal efeito é a chuva ácida que impacta sobre fauna e flora. A unidade de medida é expressa em dióxido de enxofre equivalente (kg SO ₂ -eq. / kg de emissão). | x | x | |
| Aquecimento Global | É a quantidade de gases de efeito estufa – GEE (ex.: CO ₂ , CH ₄) que contribuem para o aumento da temperatura terrestre na baixa atmosfera e geram o aquecimento global e mudanças climáticas regionais repentinas que afetam o ecossistema e o bem-estar humano. A unidade de medida é expressa em dióxido de carbono equivalente (kg CO ₂ -eq./kg de emissão). | x | x | |
| Eutrofização | É a medida dos impactos causados no meio ambiente devido ao nível excessivo de macros nutrientes causados pela emissão de nutrientes ao ar, água e solo. Este enriquecimento abrupto e excessivo de nutrientes é causado especialmente por substâncias à base de fósforo ou nitrogênio. Pode resultar na diminuição de oxigênio dissolvido na água, alterando a biodiversidade de ecossistemas. A unidade de medida é expressa em fosfato equivalente (PO ₄ -eq/kg de emissão). | x | x | |

(Continua...)

(Continuação)

| Categorias de Impactos Utilizadas | Definição | CML 2001 | EDIP 1997 | USEtox 2008 |
|---|--|----------|-----------|-------------|
| Ecotoxicidade | É a medida de como substâncias tóxicas afetam o ambiente e os organismos que nele vivem. Podem-se afetar organismos vivos, a função e a estrutura do ecossistema. No CML é expressa para ecotoxicidade terrestre e aquática em diclorobenzeno (DCB) equivalente (kg DCB-eq./kg de emissão). No EDIP é expressa volume de compartimento (ar, água, solo) afetado/kg de emissão. Por fim, no USEtox é expressa por CTU (Unidade Comparativa de Tóxicos), para formular o CTU, a ecotoxicidade é normalizada em fração potencialmente afetada de espécies (PAF – <i>potentially affected fraction of species</i>) integrada ao longo do tempo (dia) e do volume (m ³) do compartimento afetado (PAF.m ³ .dia/kg de emissão). | x | x | x |
| Formação fotoquímica de ozônio troposférico | É a medida da formação de substância reativas (principalmente o ozônio) que ocorrem sob a influência dos raios ultravioletas, onde os NOx e VOCs reagem, produzindo oxidantes que causam o nevoeiro fotoquímico (<i>smog</i>). Pode causar danos para saúde humana e ecossistemas, e também em cultivos agrícolas. Seu fator de caracterização, em geral, é expresso em kg de etileno (C ₂ H ₄) equivalente (C ₂ H ₄ -eq./kg de emissão). | x | x | |
| Toxicidade humana | É a medida dos efeitos das emissões do ciclo de vida do produto na saúde humana seja por inalação ou ingestão. Não são considerados os efeitos tóxicos de exposições no ambiente de trabalho, mas sim, os medidos na antroposfera. Os efeitos incluídos são toxicológicos crônicos, efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos, e impactos associados a uma determinada massa de um elemento químico emitido ao ambiente, entre outros. No CML é expressa apenas a toxicidade humana terrestre e aquática, sendo a unidade de diclorobenzeno equivalente (kg de DCB-eq./kg de emissão). No EDIP são expressos em m ³ do compartimento (ar, água, solo) afetado / kg de emissão. Enquanto que no USEtox não existe distinção entre o compartimento afetado, possuindo a unidade de medida em CTU (Unidade Comparativa de Tóxicos) baseada no aumento do número de casos de morbidade da população humana por kg de emissão (cases/kg de emissão). | x | x | x |
| Depleção de recursos abióticos | É a extração de recursos não vivos da natureza, o que traduz-se nos recursos não renováveis, tais como solo, gás natural, óleo cru (base para petróleo), carvão mineral, metais, etc. O fator de caracterização é expresso por kg de antimônio (Sb) equivalente por kg de extração (kg Sb-eq./kg de extração). | x | | |
| Depleção da camada de ozônio | É a medida da liberação de químicos que reduzem a camada de ozônio (O ₃) na estratosfera. Esta redução é causada por emissões de substâncias como clorofluorcarbonos (CFCs), que interferem nas reações químicas normais de oxigênio. Pode ocasionar maior incidência de radiação ultravioleta sobre a superfície terrestre causando doenças humanas, desequilíbrios nos ecossistemas, etc. A unidade de medida é expressa em Kg de clorofluorcarbonos por emissão (Kg CFC-eq. / kg de emissão) | x | x | |

Quadro 7 - Categorias de impactos contempladas nos métodos de AICV do estudo

Fonte: Chehebe (1998); Goedkoop et al. (2009); Silva (2012); Wenzel et al. (1997); WRAP (2009)

Ao todo foram analisadas oito categorias de impactos com abordagem *midpoint*. A avaliação de impactos tomou como método base o CML 2001, contemplando suas principais categorias de impactos. O método EDIP 1998 foi utilizado como método comparativo a fim de verificar as consistências das avaliações. Por sua vez, o método USEtox 2008 foi adotado como referência para avaliações de categorias de impactos de toxicidade.

O CML 2001 possui, ao todo, onze categorias de impactos (p.38), entretanto, este estudo irá abordar as oito categorias listadas no Quadro 7, por serem categorias mais recorrentes nos trabalhos relacionados à ACV da produção de painéis de madeira que utilizam o método CML, conforme pode ser verificado em González-García et al. (2009b), Silva (2012) e WRAP (2009).

Os resultados gerados nas avaliações de impactos foram interpretados com a identificação dos *hotspots* ambientais identificados nas categorias de impactos. Ou seja, foram identificados os materiais e processos que apresentaram maiores contribuições às categorias de impactos específicas do(s) método(s) utilizado(s).

Com a identificação destes *hotspots*, trabalhou-se com propostas de cenários alternativos de produção do painel de madeira MDF que melhorem o desempenho ambiental do produto e/ou processo produtivo.

- Requisitos de qualidade de dados:

A qualidade dos dados utilizados em um estudo ACV é imprescindível para retratar resultados confiáveis. Com intuito de garantir esta condição, os dados que envolvem a fronteira *gate-to-gate* do sistema de produção do painel de madeira MDF (os doze subsistemas ilustrados anteriormente na Figura 16, p.68) foram coletados de fontes primárias, na indústria produtora de painéis configurada neste estudo.

A indústria selecionada para este estudo pertence ao grupo corporativo de maior representatividade no mercado de painéis de madeira reconstituída da América Latina. A unidade produtiva pesquisada obteve 354 dias de operação consolidada durante 2010, possuindo uma produção anual de pouco mais de 300 mil m³ de painel MDF com espessura média de 16 mm. A espessura mínima do painel produzido foi de 5,5 mm, enquanto a máxima foi de 30 mm.

Os dados primários contemplados foram obtidos através de entrevistas e pesquisa em registros históricos da empresa, amostras diretas em processos,

consulta a especificações técnicas e cálculos mediante conversão de dados. Os pressupostos assumidos foram descritos no tópico “Pressupostos” (p.77).

Os dados coletados foram analisados qualitativamente através da análise de valores anômalos e da realização de balanço de massas e energias através do *software* Umberto®. Para qualquer valor coletado atípico, foi contatado e resolvido junto ao gestor responsável apropriado pelos dados.

No balanço de massa, considerando todas as entradas do processo do produto e todas as saídas de produtos, obteve-se uma diferença de 0,41%. O valor está condizente e adequado ao máximo permitido de 5% exigido pelo protocolo CORRIM apud Wilson (2008). O ICV do MDF norte americano, relatado no estudo de Wilson (2009), obteve um diferencial de 0,3% no balanço de massa.

Considerando eventuais variações de umidade, calibração de instrumentos de medição, intervalo de confiança de amostras, falha em equipamentos de medição e controle, entre outros fatores, considera-se o percentual de balanço de massa obtido como plausível.

Para dados referentes aos subsistemas da fronteira *cradle-to-gate*, que fornecem recursos e matérias-primas para o sistema do produto do painel MDF, foram utilizados dados de fontes secundárias (ICVs). Buscou-se adotar o máximo de inventários do ciclo de vida condizentes à realidade brasileira. O Quadro 8 ilustra a fonte dos dados secundários dos subsistemas considerados nesta ACV.

| Subsistemas inclusos | Referência |
|---|----------------------------------|
| Produção de resina UF | Silva (2012) |
| Produção de parafina | Ecoinvent (2010f) |
| Produção de ureia | Ribeiro (2009) |
| Produção de cavaco de madeira de pinus | Ecoinvent (2010i) |
| Produção de cavacos de madeira de eucalipto | Silva (2012) e Ecoinvent (2010h) |
| Produção de sulfato de amônio | Ecoinvent (2010a) |
| Produção de energia elétrica | Ecoinvent (2010d) |
| Produção de gás natural | Ecoinvent (2010e) |
| Produção de óleo diesel | Ecoinvent (2010b) |
| Transportes | Ecoinvent (2010g) |

Quadro 8 - Origem de dados secundários utilizados no estudo

De acordo com o Quadro 8, pode-se observar que foram utilizados inventários nacionais para os subsistemas de produção de resina UF, produção de ureia, produção de cavacos de madeira de eucalipto e produção de energia elétrica. Nos demais subsistemas, devido a ACV ser uma prática incipiente no Brasil, houve a necessidade de recorrer a inventários estrangeiros. Nestes, por sua vez, sempre que possível foram realizadas adaptações par aproximar a realidade brasileira. As adaptações foram descritas no tópico seguinte – “Pressupostos”.

▪ Pressupostos:

Este item trata das suposições e considerações tomadas para o estudo de ACV e suas justificativas. São pressupostos tomados com base nas limitações do estudo, na ausência de base de dados, no estabelecimento de cenários, nas especificações técnicas realizadas em todos os níveis e nos procedimentos de cálculos necessários.

Os pressupostos adotados para o estudo são descritos a seguir:

a) Quanto à energia elétrica: a matriz elétrica disponibilizada pela base de dados Ecoinvent v.2.2, reflete a matriz relativa ao ano de 2005. Para este estudo, foram realizadas adaptações na composição de fontes para geração de eletricidade no Brasil. O Quadro 9 apresenta as respectivas composições da matriz elétrica nacional, para o ano 2005 e 2010.

| Ano base | 2005 | 2010 |
|-------------------------------------|--|-------------------|
| Origem da Geração de Energia | Contribuição percentual com importações (%) | |
| Biomassa | 3,2% | 6,3% |
| Carvão e Derivados | 2,9% | 1,5% |
| Derivados de Petróleo | 3,1% | 2,9% |
| Eólica | 0,01% | 0,3% |
| Gás Natural | 5,0% | 6,6% |
| Hidráulica | 83,4% | 79,6% |
| Nuclear | 2,4% | 2,6% |
| Total | 100,00% | 100% |
| Referências | Ecoinvent (2010d) | EPE (2011) |

Quadro 9 - Atualização da matriz elétrica brasileira de 2005 para 2010

Fonte: Ecoinvent (2010d) e EPE (2011)

A matriz elétrica nacional foi atualizada de acordo com a composição do ano 2010, disponibilizada no Balanço Energético Nacional (EPE, 2011). Os valores de

consumo de energia elétrica foram mensurados em relação ao total consumido nos doze processos elementares. A indústria pesquisada não possuía o consumo específico para cada processo elementar, impossibilitando a análise por processos na fronteira *gate-to-gate*.

b) Quanto ao consumo de óleo diesel para transporte interno (Pátio de Madeira): Até julho de 2010 não havia um controle específico para o consumo de óleo diesel das máquinas terceirizadas para o transporte de cavaco no interior da indústria. Portanto, o consumo de óleo diesel durante todo o ano de 2010 foi presumido de acordo com a média ponderada de consumo de óleo diesel e volume de produção, relativo aos registros de consumo dos últimos cinco meses de 2010.

c) Quanto às mensurações de materiais em massa seca e 100% sólidos: Os materiais de madeira envolvidos no processo de fabricação do MDF foram considerados em massa seca e os químicos com massa de 100% de sólidos. Os processos de produção de painéis de madeira MDF possuem muita variação de temperatura e, conseqüentemente, a umidade dos materiais varia significativamente entre os processos. Em decorrência deste fato, Wilson (2010) aconselha que se trabalhe com massa em base seca para materiais de madeira e com massa de 100% sólidos nos químicos utilizados (resina UF, ureia, sulfato de amônio e parafina) durante o processo de produção do painel.

d) Quanto à estimativa de geração de pó de madeira gerado no interior da indústria: Para os cálculos de estimativa de quantificação do pó de madeira gerado no interior da organização, realizou-se um procedimento de cálculo baseado em variáveis como média de sobre espessura dos painéis, o *mix* de produção de 2010, as dimensões dos painéis lixados, umidade média dos painéis e a produção anual.

e) Quanto ao ciclo de águas para produção do MDF: O sistema hídrico da fábrica é em ciclo fechado, sem emissões de resíduos para rios ou córregos. A água utilizada é proveniente da Estação de Tratamento de Água (ETA) da indústria e de poços artesianos.

f) Quanto à quantificação de emissões atmosféricas nas fronteiras *gate-to-gate*: As emissões atmosféricas foram estimadas através dos resultados de relatórios de amostragem de empresas especializadas que coletaram os valores de emissões no processo, em duas ocasiões, julho de 2010 e dezembro de 2010. Os valores de taxa de emissão foram considerados através da concentração e vazão nas condições normais base seca por hora (Nm^3/h).

As quantificações das emissões foram disponibilizadas em relatórios de emissões da planta industrial, realizados por empresas terceiras. O relatório foi realizado através dos seguintes procedimentos:

- i. O teor de VOC's (Compostos Orgânicos Voláteis) foi por técnica de cromatografia gasosa com Detector FID (Detector por Ionização de Chama);
- ii. O teor de óxidos de enxofre foi obtido através de titulação visual das soluções de coleta com o titulante de perclorato de bário;
- iii. O teor de material particulado foi obtido através da quantificação do material particulado amostrado no filtro e lavagens de sonda e cordão por técnica gravimétrica;
- iv. O teor de óxidos de nitrogênio foi obtido através de técnica colorimétrica pelo método do ácido fenoldissulfônico;
- v. O teor de monóxido de carbono foi obtido através de equipamentos de leitura contínua e princípio de medição por célula de infravermelho.

As amostragens foram realizadas baseando-se nas normas da CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) e USEPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos). O valor de taxa de emissão (kg/h) foi obtido através da média ponderada entre volume de produção e volumes de emissões contidos nos relatórios de amostragem de emissões da indústria pesquisada nos períodos de junho e dezembro de 2010.

▪ Limitações:

As limitações e restrições deste estudo devem ser consideradas durante uma consulta, reprodução ou comparação com outros estudos científicos. Tais limitações podem ainda ser consideradas como oportunidades para desenvolvimento de estudos futuros.

O primeiro aspecto a ser considerado refere-se à abrangência do estudo. Apesar do alto grau de detalhamento do estudo, dos pressupostos tomados, e do fato de similaridade entre os processos produtivos do painel MDF brasileiro, deve-se levar em conta que os dados coletados nesta pesquisa referem-se a uma indústria produtora de painéis MDF. Apesar da possibilidade de generalização das

conclusões desta pesquisa para o setor de produção de MDF no Brasil, podem existir algumas particularidades entre os processos produtivos das indústrias nacionais.

O fato de esta pesquisa caracterizar um estudo de caso pode apresentar variações entre demais indústrias do ramo, principalmente no que se refere à geração de energia térmica no interior da planta industrial. A utilização de diferentes combustíveis para a geração de vapor e de ar quente pode resultar em diferentes impactos observados.

Outra limitação observada é quanto ao ciclo de vida considerado no estudo. A abordagem *cradle-to-gate* exclui etapas posteriores à produção industrial. Entretanto, como citado por Silva (2012) no estudo de ACV do painel MDP, as etapas posteriores do ciclo de vida não estão relacionadas ao painel, mas sim, aos produtos que utilizam este produto intermediário como matéria-prima, tal como o setor moveleiro.

Devido a grande variedade de revestimentos decorativos superficiais do painel de madeira MDF, tais como aplicação de papel melamínico com prensas de baixa pressão, aplicação de fórmicas e pinturas, este estudo considerou o painel *in natura*, ou seja, sem revestimentos superficiais. Esta limitação exclui possíveis etapas produtivas da produção do painel relacionadas ao revestimento de superfície do painel.

A utilização de métodos de avaliação de impactos estrangeiros pode ser classificada como outra limitação. Pelo fato de não existir um método de AICV para as especificidades brasileiras, este estudo adotou múltiplos métodos a fim de reduzir incertezas e aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

- Tipo e Formato do relatório requerido para o estudo

O presente estudo de ACV foi desenvolvido com intuito de atender os preceitos acadêmicos e os das Normas NBR ISO que regem estudos de ACV. Neste sentido, esta dissertação substitui o relatório requerido pelo estudo visto que a mesma atende os requisitos de fidelidade, clareza, completeza, precisão e exatidão exigidas pela NBR ISO 14040.

A próxima seção discorre sobre a segunda fase da ACV, a Análise de Inventário do Ciclo de Vida.

6.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

A segunda fase da ACV consiste na construção e na análise de inventários para a avaliação dos aspectos e impactos ambientais da produção do painel de madeira MDF. Os inventários foram elaborados com base no balanço de massa e energia, como recomendado pelas normas NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b).

Os processos são identificados e descritos, apresentando as entradas e saídas de materiais e energias, as emissões geradas e os detalhes sobre a fonte de obtenção dos dados.

Os inventários foram expostos de modo individual, primeiramente, pelos processos que compõe a produção industrial do MDF. As Tabelas 1 a 12 disponibilizam os inventários específicos dos doze processos delimitados na fronteira do sistema do produto (pátio de cavacos, peneiras, digestor/desfibrador, *blowline*, secador, formação, prensa, resfriador, lixadeira, corte, planta térmica I e planta térmica II). Estes primeiros inventários foram apresentados quantificando os dados brutos coletados, ou seja, em relação ao período anual pesquisado por processos. Não foram inventariados os valores de consumo de energia elétrica por processos devido à indisponibilidade deste rateio no sistema do produto pesquisado.

Em um segundo momento, disponibilizou-se o inventário principal deste estudo: o ICV da produção do painel MDF em função da unidade funcional definida, juntamente com seus aspectos ambientais (materiais, energias e emissões) (Tabela 13). Este inventário foi apresentado com base na fronteira *gate-to-gate*, portanto não envolve dados de inventários das cadeias produtivas de suas matérias-primas e insumos.

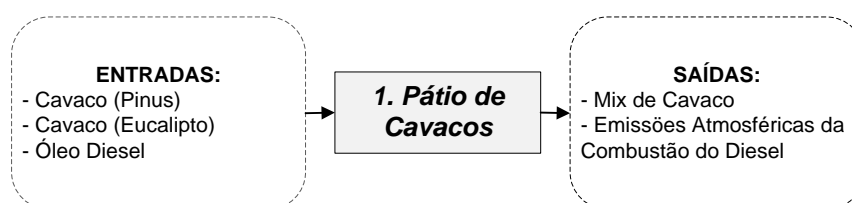
Os dados quantificados dos subsistemas de produção das matérias-primas e insumos podem ser consultados e obtidos nas referências originárias destes ICV. Tais inventários podem ainda receber as adaptações e os pressupostos para as condições estabelecidas na Definição de Objetivo e Escopo deste trabalho.

A seguir foram expostos os inventários levantados nesta pesquisa, acompanhados de respectivas observações.

| | |
|-----------------------------------|------------------|
| Identificação do Processo: | Pátio de Cavacos |
|-----------------------------------|------------------|

Descrição do Processo:

Cavacos de madeira são entregues à fábrica por caminhões, os cavacos são de madeira de Pinus e Eucalipto. Os mesmos possuem teor de umidade variável, em torno de 40-70% de umidade. Os cavacos são armazenados no pátio de madeira, local sem cobertura. A movimentação de materiais (cavaco) do pátio de madeira para as grelhas alimentadoras do processo ocorre através do transporte interno de máquinas pá carregadeiras (Volvo L70 F-841T- ano 2009 e Caterpillar 938 GII-938T - ano 2005), ocorrendo um *mix* na dosagem de cavacos (Mistura de cavacos de Pinus e Eucalipto). As grelhas alimentadoras possuem parrichas hidráulicas que puxam o cavaco para o processo, onde o mesmo passa por uma rosca de medição, para homogeneizar a quantidade de material que segue no processo. Após a rosca de medição o cavaco vai para um transportador de correia até a peneira de cavacos (próximo processo).

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|---------------------------|-------|----------|-------|--------------------|-------|----------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Cavaco (pinus) | t | 1,91E+05 | (1) | Mix de Cavaco | t | 2,16E+05 | (1) |
| Cavaco (eucalipto) | t | 2,49E+04 | (1) | | | | |
| Óleo Combustível (Diesel) | L | 1,27E+05 | (1) | | | | |

EMISSÕES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|---|------------------------------------|---------|--------|-------|
| | | | | |
| Período de tempo da coleta de dados: | 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010) | | | |

Observações:

- Os cavacos foram quantificados em massa seca, sem umidade, e foram mensurados através de balanças.
- As emissões geradas são provenientes da combustão do Óleo Diesel.
- Quanto ao transporte dos cavacos de madeira dos fornecedores à indústria, obteve-se uma distância média de 150 km com uma capacidade de carga de 29 toneladas. A distância média foi obtida através de média ponderada entre número de viagens de cada fornecedor, suas respectivas distâncias e cargas transportadas (via rodovias).

Legenda:

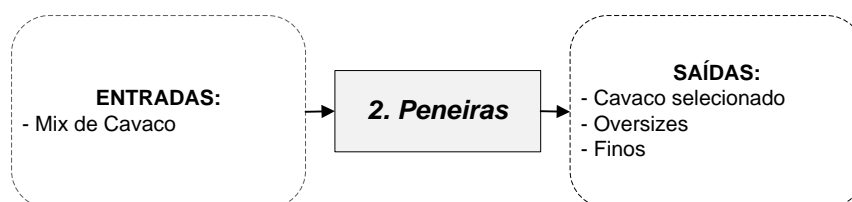
- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 1 - Resultado da análise de inventário do processo 1 - Pátio de cavacos

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Identificação do Processo: | Peneiras |
|-----------------------------------|----------|

Descrição do Processo:

Partículas pequenas de madeira (Finos) e partículas Grandes/Cascas (*oversize*) são retiradas do mix de cavaco durante o processo de peneiramento. Os finos, que vem junto ao mix de cavaco, são desviados do fluxo principal do processo, seguindo para um silo de compartimento a parte, sendo reintroduzido posteriormente no processo elementar do digestor/desfibrador. O cavaco que está em um tamanho acima do desejado, é repicado e retorna a peneira. Já o *oversize*, que não pode ser reprocessado, é retirado do processo e é vendido como biomassa para outra empresa. Somente o cavaco com tamanho ideal (granulometria apropriada) é alimentado ao processo, seguindo para o silo de medição de onde são encaminhados a outra esteira e levados para a lavagem.

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|--------------------|-------|----------|-------|--------------------|-------|----------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Mix de Cavaco | t | 2,16E+05 | (1) | Cavaco selecionado | t | 2,00E+05 | (1) |
| | | | | Oversizes | t | 1,08E+03 | (1) |
| | | | | Finos | t | 1,41E+04 | (1) |

EMISSÕES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|---|------------------------------------|---------|--------|-------|
| | | | | |
| Período de tempo da coleta de dados: | 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010) | | | |

Observações:

- Todos os materiais foram apresentados em massa seca (sem umidade).
- Os cavacos, finos e oversizes foram mensurados através de balanças específicas existentes no processo. Os dados foram coletados no *software* de gerenciamento do processo produtivo, através de comunicação com o Controlador Lógico Programável (PLC).

Legenda:

- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 2 - Resultado da análise de inventário do processo 2 - Peneiras

| | |
|-----------------------------------|----------------------|
| Identificação do Processo: | Digestor/Desfibrador |
|-----------------------------------|----------------------|

Descrição do Processo:

Os cavacos selecionados no processo anterior são levados à lavagem. Resíduos e alguns extrativos da madeira são retirados nessa fase, os mesmos são tratados e extraídos do efluente líquido através de uma centrífuga. O cavaco limpo vai para um tanque de onde é bombeado até uma rosca de drenagem. Após a lavagem, os finos (saídas do processo de peneiramento) retornam ao processo misturando-se ao cavaco, em um transportador misturador, e levados juntos ao silo elevado onde ocorre a pré-vaporização. Após a pré-vaporização do cavaco, são retirados os extrativos e excesso de água do cavaco, através de uma rosca. O cavaco segue então para o pré-aquecedor, um tubo vertical, que coze a matéria-prima por vapor saturado de 1 a 9 bar de pressão. Uma rosca de saída de velocidade variável, situada no fundo do pré-aquecedor, alimenta o desfibrador. É nesta rosca que é feita a adição de parafina no processo. Da rosca de descarga do pré-aquecedor, o material é transportado por uma rosca de alimentação para o desfibrador, onde o cavaco é desintegrado e transformado em fibra. Na caixa de moagem do desfibrador, há dois discos de moagem (um disco fixo e outro giratório). A alimentação é feita através do centro do disco fixo e são forçados por meio da força centrífuga, através do estreito vão dos discos. A pressão do vapor na caixa de discos de moagem sopra a fibra através de uma válvula de sopro ajustável, afixada à saída da caixa do desfibrador, encaminhando a fibra para o processo seguinte: *Blowline*

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|--------------------|-------|----------|-------|--------------------|-------|----------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Cavaco Selecionado | t | 2,00E+05 | (1) | Fibra de madeira | t | 2,16E+05 | (1) |
| Finos | t | 1,41E+04 | (1) | | | | |
| Parafina | t | 1,05E+03 | (1) | | | | |
| Vapor-d'água | MJ | 2,71E+08 | (1) | | | | |

EMISSÕES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|---|------------------------------------|---------|----------|-------|
| Resíduos/Extrativos de Madeira (vendido) | Solo | t | 1,11E+03 | (1) |
| Período de tempo da coleta de dados: | 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010) | | | |

Observações:

- Todos os materiais de origem de madeira foram apresentados em massa seca (sem umidade).
- A parafina é mensurada em 100% sólida (sem umidade) e foi medida através de fluxômetros.
- Os resíduos/extrativos de madeira referem-se a resíduos retirados após lavagem de cavaco, em centrífuga. Os mesmos são enviados a compostagem.
- A distância do transporte de parafina do fornecedor à indústria é de 2400 km (via rodovias)

Legenda:

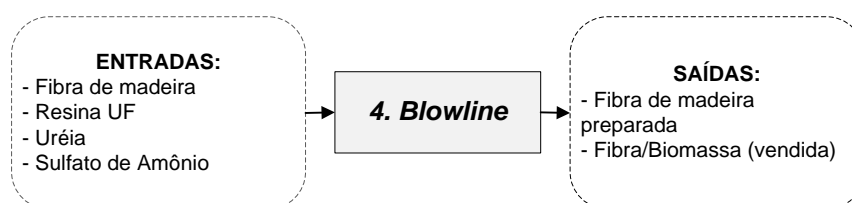
- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 3 - Resultado da análise de inventário do processo 3 – Desfibrador

| | |
|-----------------------------------|-----------------|
| Identificação do Processo: | <i>Blowline</i> |
|-----------------------------------|-----------------|

Descrição do Processo:

É a linha responsável por conduzir a fibra do desfibrador ao secador. A fibra recém-fornecida pelo desfibrador entra na chamada *Blowline* (Linha de Sopro), onde acontece a preparação das fibras com químicos. Os químicos dosados são a resina, ureia e em alguns casos e produtos específicos acontece a dosagem de sulfato de amônio. A fibra preparada com os químicos segue então para o secador, onde acontece o processo de secagem da fibra para entrar no processo de formação. Existe ainda um ciclone de partida (antes do processo de secagem) onde é possível descartar a fibra em inícios de produção, não enviando-a para o secador. Essa fibra encontra-se muito úmida devido à condensação de vapor no aquecimento no interior do desfibrador. A fibra descartada (média de 0,5% do total desfibrado no ano) é vendida como biomassa para geração de energia em outra fábrica.

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|--------------------|-------|----------|-------|----------------------------|-------|----------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Fibra de madeira | t | 2,16E+05 | (1) | Fibra de madeira preparada | t | 2,36E+05 | (1) |
| Resina UF | t | 2,17E+04 | (1) | Fibra/Biomassa (vendida) | t | 1,19E+06 | (1) |
| Ureia | t | 2,61E+02 | (1) | | | | |
| Sulfato de Amônio | t | 2,35E+01 | (1) | | | | |

EMISSÕES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|---|------------------------------------|---------|--------|-------|
| | | | | |
| Período de tempo da coleta de dados: | 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010) | | | |

Observações:

- Todos os materiais de origem madeira foram apresentados em massa seca (sem umidade).
- Os químicos (resina, ureia, sequestrante e sulfato de amônio) apresentam-se mensurados em 100% sólidos.
- O Sulfato de Amônio e a Fibra/Biomassa (vendida) apresentam percentual relativo de massa menor que 1,0%. Portanto, não estão incluídos nas fronteiras do produto.
- A distância do transporte de resina UF do fornecedor à indústria é de 130 km (via rodovias).
- A distância do transporte de ureia e sulfato de amônio do fornecedor à indústria é de 120 km (via rodovias).

Legenda:

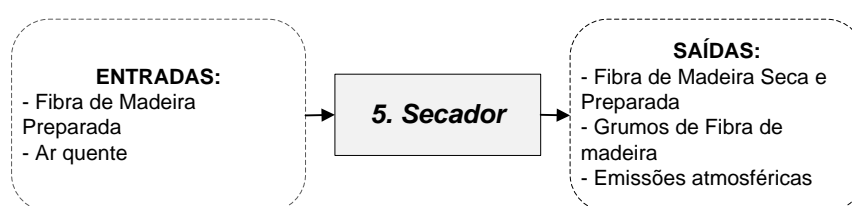
- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 4 - Resultado da análise de inventário do processo 4 – Blowline

| | |
|-----------------------------------|---------|
| Identificação do Processo: | Secador |
|-----------------------------------|---------|

Descrição do Processo:

A secagem da fibra acontece em um tubo secador de ar quente, onde o ar quente é responsável pela secagem da fibra e pelo transporte da mesma. A corrente de ar quente evapora a umidade e conduz a fibra. O ar quente do secador é gerado pela planta térmica I, normalmente pela combustão do pó gerado pela fábrica, e eventualmente pelo gás natural. Portanto, as emissões geradas neste processo são resultantes da operação da Planta Térmica I. No fim do duto aquecedor, a corrente de fibra e gás é dividida e entra em partes iguais nos ciclones A e B. Nos ciclones ocorre a separação do vapor-d água, voláteis e partículas das fibras secas. Após secas, as fibras (7 a 9% de umidade) seguem para um filtro a vento. Este filtro serve para retirar grumos de fibras ou outros materiais pesados que possam causar algum problema para o processo e para o produto final. A fibra seca e selecionada é conduzida ao processo de formação.

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|----------------------------|-------|----------|-------|-----------------------------------|-------|----------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Fibra de Madeira Preparada | t | 1,91E+05 | (1) | Fibra de Madeira Seca e Preparada | t | 2,36E+05 | (1) |
| Ar Quente | MJ | 5,37E+08 | (1) | Fibra/Biomassa (vendida) | t | 1,66E+01 | (1) |

EMISSÕES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|--|------------------------------------|---------|----------|-------|
| Dióxido de Enxofre | Ar | Kg | 1,26E+04 | (1) |
| Dióxido de Carbono | Ar | Kg | 2,38E+06 | (1) |
| Material Particulado | Ar | Kg | 1,55E+05 | (1) |
| Monóxido de Carbono | Ar | Kg | 1,39E+06 | (1) |
| Névoa Sulfúrica (como H ₂ SO ₄) | Ar | Kg | 3,74E+04 | (1) |
| Óxidos de Enxofre | Ar | Kg | 3,70E+04 | (1) |
| Óxidos de Nitrogênio | Ar | Kg | 3,81E+05 | (1) |
| VOC's Totais | Ar | Kg | 3,36E+05 | (1) |
| Período de tempo da coleta de dados: | 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010) | | | |

Observações:

- Todos os materiais de origem madeira foram apresentados em massa seca (sem umidade).
- Os valores de taxa de emissão foram considerados através da concentração e vazão nas condições normais base seca (Nm³/h), conforme definido nos pressupostos/considerações deste estudo na seção de Definição de Objetivo e Escopo.

Legenda:

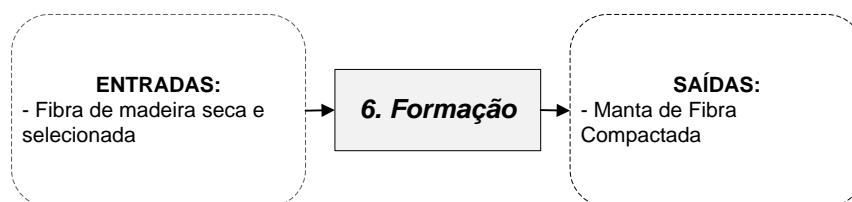
- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 5 - Resultado da análise de inventário do processo 5 - Secador

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Identificação do Processo: | Formação |
|-----------------------------------|----------|

Descrição do Processo:

As fibras secas e selecionadas passam por um ciclone de formação, o qual encaminha as fibras ao silo dosador. As fibras adentram ao silo dosador com uma distribuição uniforme através da ação de pêndulo de distribuição de fibras. Após o silo dosador, as fibras uniformemente distribuídas passam pela formadora e tornam-se uma manta de fibras. A manta de fibras passa por um desaerador (o qual tem função de retirar o ar existente entre as fibras) e, por fim, a manta é comprimida pelo pré-compressor. Ocorre a retirada de aparas laterais da manta de fibras, através da ação de serras, porém as fibras retornam ao mesmo processo. A manta de fibras compactadas é umidificada em sua superfície superior e inferior durante o processo de formação para adentrar a prensagem.

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|-------------------------------------|-------|----------|-------|---------------------------|-------|----------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Fibra de Madeira Seca e Selecionada | t | 2,36E+05 | (1) | Manta de fibra compactada | t | 2,34E+05 | (1) |

EMISSÕES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|---|---------|---------|--------|-------|
| Período de tempo da coleta de dados: 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010) | | | | |

Observações:

- As fibras secas e selecionadas são apresentadas em massa seca e não possuem percas em massa, entre o processo elementar anterior e no atual processo.

Legenda:

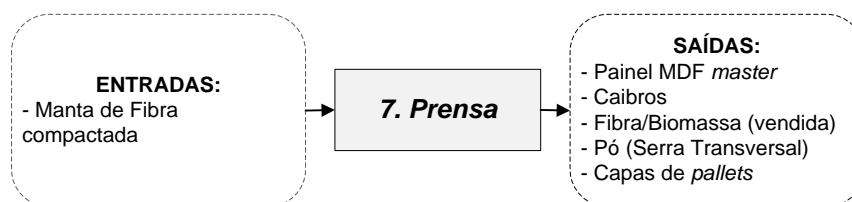
- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 6 - Resultado da análise de inventário do processo 6 - Formação

| | |
|-----------------------------------|--------|
| Identificação do Processo: | Prensa |
|-----------------------------------|--------|

Descrição do Processo:

A manta de fibra compactada adentra a uma prensa contínua. A prensa opera em função de temperatura e pressão. As temperaturas operam em torno de 170 a 230 °C e com tempo suficiente para que haja a cura da resina. As pressões ajustadas nos marcos da prensa consolidam a densidade média do painel e controlam as propriedades físicas do painel. Como consequência da elevação de temperatura existe a emissão de materiais particulados e a liberação de formaldeído (H₂CO), através de três chaminés na prensa e um ventilador para exaustão. A prensa é aquecida através de óleo térmico provindo da planta térmica II. Na saída da prensa existe uma serra transversal que corta o painel contínuo (originando pó de madeira) que sai da prensa em painéis denominados "master". Ainda na saída da prensa existem duas mesas descartadoras de painéis não conformes. A primeira mesa descarta painéis que se transformam em seus 80% em biomassa (vendida) e 20% em caibros (material utilizado para estocagem e embalagem), já a segunda mesa descarta painéis que viram capas (embalagem) de pallets de MDF.

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|---------------------------|-------|----------|-------|--------------------------|-------|----------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Manta de fibra compactada | t | 2,34E+05 | (1) | Painel MDF Master | t | 2,33E+05 | (1) |
| Óleo Térmico Aquecido | MJ | 2,11E+08 | (1) | Caibros (embalagens) | t | 3,11E+01 | (1) |
| | | | | Fibra/Biomassa (vendida) | t | 1,24E+02 | (1) |
| | | | | Pó de madeira | t | 2,34E+02 | (1) |
| | | | | Capas de <i>pallets</i> | t | 4,47E+02 | (1) |

EMISSÕES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|---|------------------------------------|---------|----------|-------|
| Formaldeído | Ar | Kg | 3,7E+04 | (1) |
| Material Particulado | Ar | Kg | 3,49E+03 | (1) |
| Período de tempo da coleta de dados: | 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010) | | | |

Observações:

- A manta de fibra compactada foi considerada em massa seca (sem umidade).
- Devido à variação de umidade no interior da prensa, o painel MDF *master* também foi considerado em massa seca.
- A geração de caibros e capas de pallets destinados à embalagem (provenientes de painéis não conformes) não foram consideradas na fronteira do sistema do produto desta ACV (ver definições em Fronteiras do Sistema – p. 69)

Legenda:

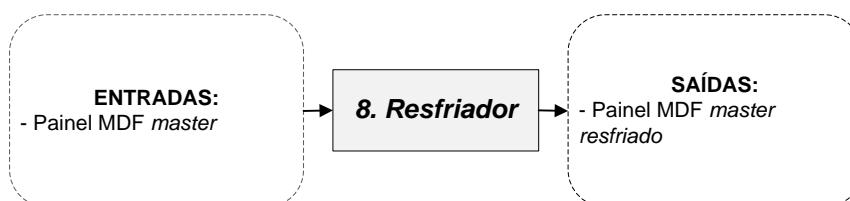
- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 7 - Resultado da análise de inventário do processo 7 – Prensa

| | |
|-----------------------------------|------------|
| Identificação do Processo: | Resfriador |
|-----------------------------------|------------|

Descrição do Processo:

O painel *master* após a saída da prensa segue para um resfriador, onde permanece por 40 minutos. Após este resfriado prévio, o painel é enviado à bodega de repouso. Nesta bodega, os painéis produzidos permanecem por 48 horas para que suas propriedades físico-mecânicas se estabilizem. Após as 48 horas, os painéis MDF *master* seguem para a linha de lixamento.

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|--------------------------|-------|----------|-------|------------------------------------|-------|----------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Painel MDF <i>Master</i> | t | 2,33E+05 | (1) | Painel MDF <i>Master</i> Resfriado | t | 2,33E+05 | (1) |

EMISSÕES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|---|---------|---------|--------|-------|
| Período de tempo da coleta de dados: 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010) | | | | |

Observações:

- Os painéis foram considerados em massa seca (sem umidade) e não possuem percas durante a climatização.

Legenda:

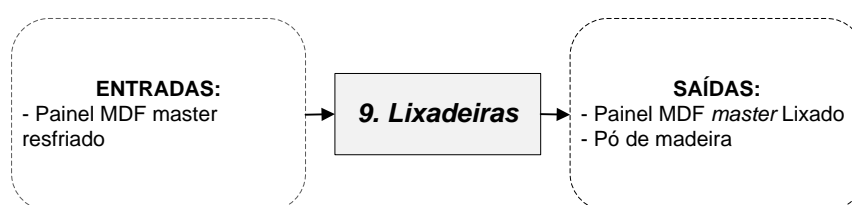
- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 8 - Resultado da análise de inventário do processo 8 - Resfriador

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| Identificação do Processo: | Lixadeira |
|-----------------------------------|-----------|

Descrição do Processo:

Os painéis MDF *master*, já resfriados, passam pela ação de duas lixadeiras. A primeira lixadeira consiste em dois conjuntos de lixas (normalmente, de granulometria de grão de 60 e 80) que são responsáveis pela retirada da sobre espessura do painel *master* vindo da prensa para que possa ser comercializado. Já a segunda lixadeira consiste em dois jogos de lixas responsáveis pelo acabamento do painel MDF (normalmente, de granulometria de grão de 120 e 150). Todo o pó gerado pela ação das lixadeiras é aspirado e enviado a Planta Térmica I, como biomassa.

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|------------------------------------|-------|----------|-------|---------------------------------|-------|----------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Painel MDF <i>Master Resfriado</i> | t | 2,33E+05 | (1) | Painel MDF <i>Master Lixado</i> | t | 2,16E+05 | (1) |
| | | | | Pó de madeira | t | 1,72E+04 | (1) |

EMISSÕES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|---|------------------------------------|---------|--------|-------|
| | | | | |
| Período de tempo da coleta de dados: | 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010) | | | |

Observações:

- Os painéis *master* e o pó de madeira gerado pela ação das lixas foram considerados em massa seca (sem umidade).

Legenda:

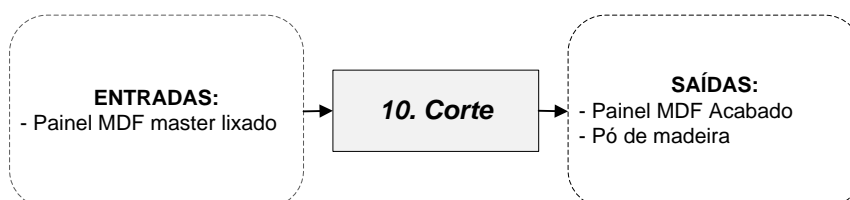
- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 9 - Resultado da análise de inventário do processo 9 - Lixadeira

| | |
|-----------------------------------|-------|
| Identificação do Processo: | Corte |
|-----------------------------------|-------|

Descrição do Processo:

O processo do corte dos painéis já lixados acontece em duas etapas. Na primeira, o painel é cortado em sua longitudinal, a serra de corte possui um triturador de aparas, encaminhando o pó gerado para a planta de energia, como biomassa. Na segunda etapa acontecem os cortes transversais, onde o painel MDF *master* é transformado no Painel Acabado. Um painel *master* origina três painéis acabados. Portanto, são realizados 4 cortes transversais, contando as duas bordas do painel *master*. As duas bordas geram uma vareta de MDF, a qual é triturada e encaminhada à planta de energia como biomassa. Todo o pó gerado pelo corte é aspirado até a Planta de Energia I. O painel MDF acabado, pronto para ser comercializado, apresenta uma umidade média de 6,74%.

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|---------------------------------|-------|----------|-------|----------------------------------|-------|----------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Painel MDF <i>Master</i> Lixado | t | 2,16E+05 | (1) | Painel MDF <i>Master</i> Acabado | t | 2,10E+05 | (1) |
| | | | | Pó de madeira | t | 5,80E+03 | (1) |

EMISSÕES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|---|------------------------------------|---------|--------|-------|
| | | | | |
| Período de tempo da coleta de dados: | 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010) | | | |

Observações:

-Os materiais deste processo foram considerados em massa seca (sem umidade).

Legenda:

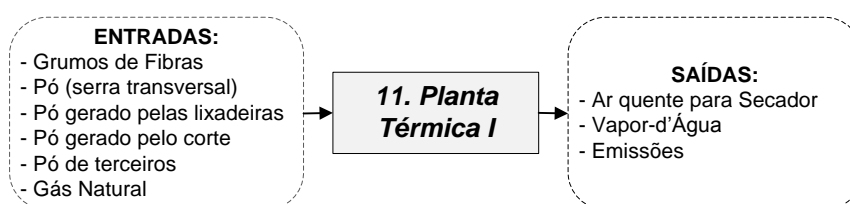
- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 10 - Resultado da análise de inventário do processo 10 – Corte

| | |
|-----------------------------------|------------------|
| Identificação do Processo: | Planta Térmica I |
|-----------------------------------|------------------|

Descrição do Processo:

A Planta Térmica I é uma caldeira geradora de vapor e ar quente para o processo produtivo. A demanda de vapor, em sua maior parte, é para o processo de desfibragem da madeira, enquanto a demanda de ar quente é para o processo de secagem da fibra. O principal combustível desta planta térmica é a biomassa (pó de madeira proveniente de outras etapas do processo e adquirido de terceiros), ocasionalmente esta planta térmica realiza a queima com gás natural. O pó de madeira destinado como biomassa combustível para a planta térmica passa antes por um beneficiamento na chamada Fábrica de Pó para melhor eficiência no queimador da caldeira. A fábrica de pó possui quatro conjuntos de filtros para controle de material particulado na atmosfera (chamados filtros manga).

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|----------------------------|----------------|----------|-------|------------------------|-------|----------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Grumos de Fibras | t | 1,66E+01 | (1) | Ar quente para Secador | MJ | 5,37E+08 | (1) |
| Pó (Serra transversal) | t | 2,34E+02 | (1) | Vapor-d'água | MJ | 2,71E+08 | (1) |
| Pó gerado pelas lixadeiras | t | 1,72E+04 | (1) | | | | |
| Pó gerado pelo corte | t | 5,80E+03 | (1) | | | | |
| Pó de terceiros | t | 2,54E+04 | (1) | | | | |
| Gás Natural | m ³ | 4,14E+06 | (1) | | | | |

EMISSIONES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|---|------------------------------------|---------|----------|-------|
| Material Particulado | ar | Kg | 2,42E+04 | (1) |
| Período de tempo da coleta de dados: | 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010) | | | |

Observações:

- As emissões provenientes da operação da planta térmica (combustão da biomassa/madeira e gás natural) foram quantificadas e inventariadas junto à etapa de secagem da produção do painel MDF (local onde as emissões são expostas a atmosfera).
- A emissão quantificada nesta tabela (material particulado), refere-se às emissões nos filtros manga durante o beneficiamento do pó de madeira neste processo.
- Os materiais de madeira deste processo foram considerados em massa seca (sem umidade).
- Os valores de taxa de emissão foram considerados através da concentração e vazão nas condições normais base seca (Nm³/h), conforme definido nos pressupostos/considerações deste estudo na seção de Definição de Objetivo e Escopo.

Legenda:

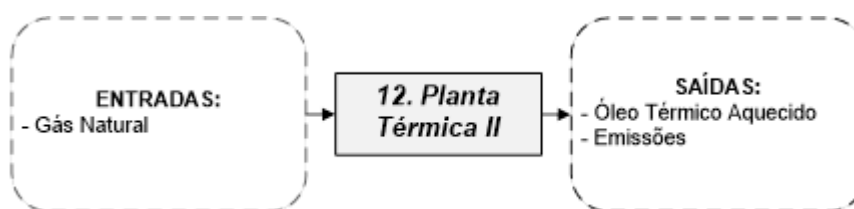
- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 11 - Resultado da análise de inventário do processo 11 – Planta Térmica I

| | |
|-----------------------------------|-------------------|
| Identificação do Processo: | Planta Térmica II |
|-----------------------------------|-------------------|

Descrição do Processo:

A Planta Térmica II é responsável pelo aquecimento do óleo térmico utilizado pela prensa. As temperaturas do óleo operam em torno de 170 a 230°C (temperatura média do óleo em consonância a fatores de pressão e tempo de prensagem para que exista a cura da resina). O combustível responsável pelo aquecimento do óleo térmico é o gás natural.

Fluxograma do Processo:

| ENTRADAS | | | | SAÍDAS | | | |
|--------------------|-------|----------|-------|-----------------------|-------|---------|-------|
| Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados | Materiais/Energias | Unid. | Quant. | Dados |
| Gás Natural | m³ | 4,14E+06 | (1) | Óleo Térmico Aquecido | MJ | 2,1E+08 | (1) |

EMISSÕES GERADAS

| Componentes | Destino | Unidade | Quant. | Dados |
|-------------------------|---------|---------|----------|-------|
| Material Particulado | Ar | Kg | 1,52E+03 | (1) |
| Óxidos de Nitrogênio | Ar | kg | 7,77E+03 | (1) |
| Dióxido de Carbono | Ar | kg | 7,98E+06 | (1) |
| Dióxido de Enxofre | Ar | kg | 4,68E+02 | (1) |
| Oxido de Enxofre | Ar | kg | 7,74E+02 | (1) |
| VOC's Totais | Ar | kg | 8,35E+03 | (1) |
| Nevoa Sulfúrica (H2SO4) | Ar | kg | 4,68E+02 | (1) |

Período de tempo da coleta de dados: 1 Ano (Janeiro a Dezembro de 2010)

Observações:

- Os valores de taxa de emissão foram considerados através da concentração e vazão nas condições normais base seca (Nm³/h), conforme definido nos pressupostos/considerações deste estudo na seção de Definição de Objetivo e Escopo.
- O óleo térmico não foi considerado como entrada neste processo conforme justificado nos Pressupostos assumidos para esta ACV na Definição de Objetivos e Escopo.

Legenda:

- (1) – Dados de Origem Primária
- (2) – Dados de Origem Secundária (acompanhado de sua respectiva referência)

Tabela 12 - Resultado da análise de inventário do processo 12 – Planta Térmica II

Após a correlação dos dados aos doze processos elementares definidos nas

fronteiras do sistema do produto desta ACV, a Tabela 13 resume e ilustra a correlação dos dados a unidade funcional, ou seja, é apresentado o inventário do ciclo de vida (ICV) para a produção de 1,0 m³ de painel MDF, nas fronteiras *gate-to-gate*.

| Dados da Produção | Unidade | Unid./m ³ |
|---|----------------|----------------------|
| Entradas | | |
| Madeira ^a | | |
| Cavacos (Eucalipto) | Kg | 80,7 |
| Cavacos (Pinus) | Kg | 617,0 |
| Químicos ^b | | |
| Parafina | Kg | 3,4 |
| Resina Ureia Formaldeído | Kg | 70,3 |
| Sulfato de Amônio | Kg | 0,1 |
| Ureia | Kg | 0,8 |
| Energia elétrica | | |
| Eletricidade | KWh | 280,5 |
| Combustível | | |
| Gás Natural | m ³ | 17,4 |
| Diesel | L | 0,4 |
| Pó de Madeira (comprado) | Kg | 87,4 |
| Pó de Madeira (gerado na indústria) | Kg | 80,2 |
| Consumo de Água | | |
| Água (Sistema de tratamento interno) | L | 110,4 |
| Água Artesiana | L | 22,1 |
| Saídas^a | | |
| Painel de fibras de média densidade (MDF) | Kg | 683,2 |
| Casca de madeira (vendido) | Kg | 3,5 |
| Resíduos de Madeira/Biomassa (vendido) | Kg | 4,3 |

^aMadeiras e cascas foram consideradas em massa seca.

^bQuímicos foram relatados em 100% sólidos de massa.

Tabela 13 - Inventário para produção de 1 m³ de MDF (*gate-to-gate*)

A Tabela 13 fornece uma listagem de todas as entradas e saídas para a produção do MDF na fronteira *gate-to-gate*. As entradas produziram 1,0 m³ de painel MDF a partir de 697,72 kg (em massa seca) de cavacos de madeira de pinus e eucalipto de manejos florestais controlados e/ou certificados. Em números, 88,2% do cavaco utilizado foi pinus e os 11,8% restantes foram cavacos de eucalipto.

As entradas do sistema renderam 1,0 m³ (683,2 kg) de MDF em massa

seca, sem revestimentos decorativos, composto de madeira, resina, parafina, ureia e sulfato de amônio. Entre os químicos, a resina UF (Ureia-Formaldeído) é o mais utilizado e dominante para a produção do MDF. É a cura da resina UF que garante boas propriedades físico-mecânicas do painel.

A agregação dos dados para análises do ICV permitem também analisar as demandas energéticas para a produção do painel MDF. Foram necessários 1009,7 MJ de Energia Elétrica para a produção de 1,0 m³ do painel. No que se refere ao consumo de combustíveis para geração de energia térmica, a Figura 17 ilustra os fluxos de entradas e saídas das Plantas Térmicas I e II, bem como sua demanda de combustíveis.

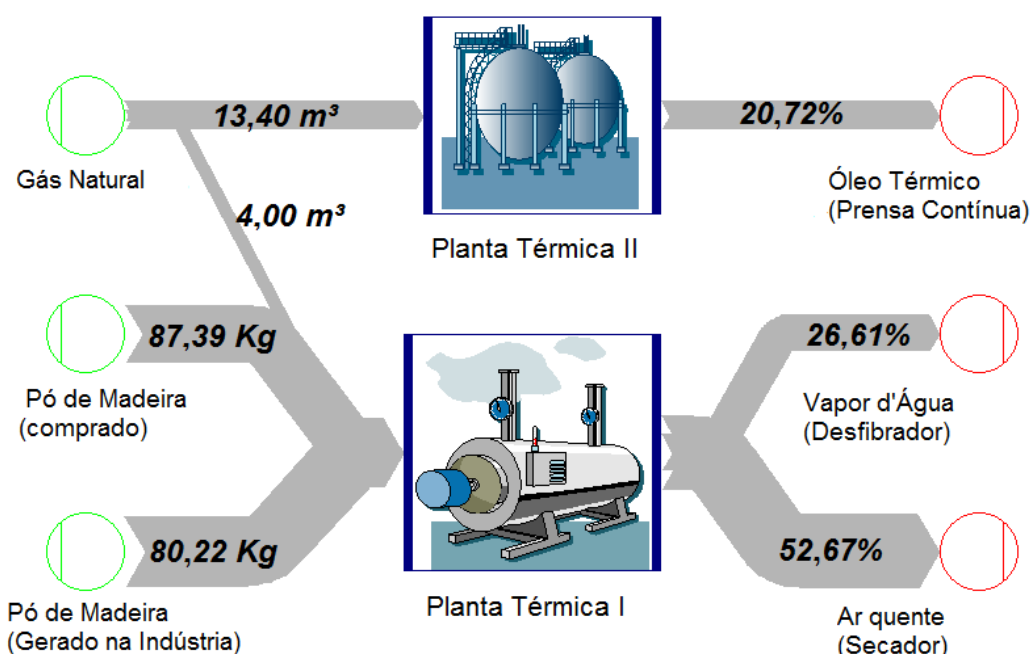


Figura 17 - Balanço de energia térmica para produção de 1,0 m³ do MDF estudado

Para geração da energia térmica demandada na produção do MDF, foram necessários 17,4 m³ de gás natural (23% para planta térmica I e 77% para planta térmica II), aproximadamente 87,4 Kg de pó de madeira comprado de empresas terceiras e 80,2 Kg de pó de madeira gerado na própria indústria. A Planta Térmica I produz, desta forma, cerca de 80% da energia térmica demandada, sendo 52,67% para a secagem das fibras e 26,61% para geração de vapor-d'água utilizado no processo de desfibragem. Por sua vez, a Planta Térmica II produz 20,72% da energia térmica através do aquecimento do óleo térmico utilizado na prensagem do

painel.

A Figura 18 exibe a dependência de fontes renováveis na produção do painel de madeira MDF, bem como as principais fontes de energia necessárias e os principais combustíveis utilizados.

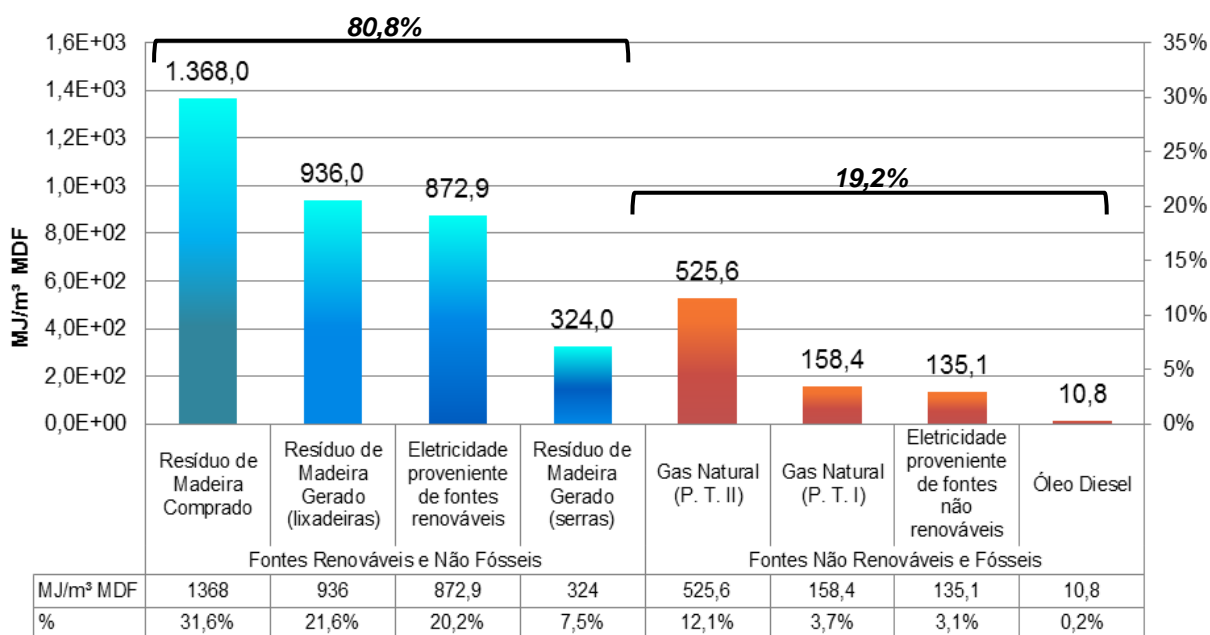


Figura 18 - Dependência de fontes renováveis e não renováveis na produção do MDF

Observando a Figura 18, nota-se que no processo industrial de produção do painel de madeira MDF, cerca de 80% da energia demandada é proveniente de fonte de energia renovável e não fóssil. Nos 19,2% referente ao uso de energia proveniente de origem não renovável e fóssil, destaca-se o consumo de gás natural utilizado na Planta Térmica II, que representa 63% do total de energia utilizada proveniente de fontes não renováveis.

O sistema hídrico da fábrica possui um ciclo fechado, sem emissões de resíduos para rios ou córregos. Para 1,0 m³ de MDF, foram registrados consumos de 110,37 litros de água tratada pela Estação de Tratamento de Água (ETA) da indústria e 22,13 litros de água de poços artesianos.

Pequenas quantidades de cascas e lascas de madeira (oversizes) (3,5 Kg/m³) e de outros resíduos de madeira não especificados (4,3 Kg/m³) foram produzidas no processo e vendidas fora do sistema como biomassa.

As emissões inventariadas na produção do painel MDF (fronteira *gate-to-gate*) foram listadas separadamente e podem ser observadas na Tabela 14.

| Dados de Emissões | Unidade | Unid/m ³ | % |
|---|---------|---------------------|-------|
| Saídas | | | |
| Painel de fibras de média densidade (MDF) | Kg | 683,2 | - |
| Emissões para o ar | | | |
| Dióxido de Carbono, CO ₂ (fóssil) | Kg | 33,5 | 81,2% |
| Monóxido de Carbono, CO (fóssil) | Kg | 4,5 | 10,9% |
| Óxidos de Nitrogênio, NO _x | Kg | 1,26 | 3,1% |
| VOCs Totais (sem CH ₄) | Kg | 1,11 | 2,7% |
| Particulados (não especificados) | Kg | 0,6 | 1,5% |
| Formaldeído, H ₂ CO | Kg | 0,12 | 0,3% |
| Ácido Sulfúrico, H ₂ SO ₄ | Kg | 0,12 | 0,3% |
| Dióxido Sulfúrico, SO ₂ | Kg | 0,04 | 0,1% |

Tabela 14 - Inventário de emissões atmosféricas na produção de 1,0 m³ de MDF (*gate-to-gate*)

Ao todo são 41,3 kg de emissões atmosféricas geradas para a produção de 1,0 m³ de MDF, nas fronteiras *gate-to-gate*. Observa-se que a grande parte das emissões geradas para a fabricação do MDF é ocasionada pelo dióxido de carbono (CO₂), representando 81,2% do total das emissões atmosféricas geradas.

O CO₂ (fóssil) é emitido de três processos dentro dos limites do sistema do produto deste estudo. São eles: Pátio de Madeira com CO₂ derivado da combustão do óleo diesel para movimentação de cavacos de madeira; Secador/Planta Térmica I com CO₂ derivado da combustão do gás natural da Planta Térmica I (o CO₂ gerado é conduzido pelo ar quente utilizado no secador); e Planta Térmica II com CO₂ derivado da combustão do gás natural utilizado para o aquecimento do óleo térmico.

O monóxido de carbono (CO) representa a segunda maior contribuição nas emissões (10,9%). O mesmo é proveniente da combustão da biomassa de madeira na planta térmica de geração de vapor (Planta Térmica I). Em contrapartida, os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os VOCs totais são responsáveis por 3,1% e 2,7%, respectivamente, das emissões totais geradas. Ambas as emissões são emitidas nos processos de secador e planta térmica. Juntas, as demais emissões totalizam 2,2% das emissões geradas para a produção do painel MDF.

Em geral, o inventário do ciclo de vida foi analisado em termos de matérias-primas, energias e emissões atmosféricas. A matéria-prima mais consumida na produção do painel é o cavaco de madeira (88,2% proveniente de madeira de pinus e 11,8% de madeira de eucalipto). Quanto aos químicos utilizados, a resina UF é o mais consumido. Na análise de demanda de energia, constatou-se que 80,8% são provenientes de fontes renováveis e não fósseis. Por fim, o destaque observado nas

emissões atmosféricas foi o dióxido de carbono (fóssil) representado 81,2% da composição das emissões geradas na fronteira *gate-to-gate* deste estudo.

A análise de inventário, apesar de contribuir com fornecimento de dados que permitem uma análise dos aspectos ambientais da produção do produto, não permite a identificação dos potenciais impactos ambientais do produto. Todavia, para a identificação dos *hotspots* da produção do painel MDF e formulação de ações que melhorem o desempenho ambiental da produção do MDF, a próxima seção realiza a avaliação dos impactos do ciclo de vida.

6.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CICLO DE VIDA DO PAINEL MDF

Nesta seção foram avaliados os impactos potenciais associados ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. Os dados do inventário do ciclo de vida foram correlacionados com as categorias de impactos selecionadas para este estudo: acidificação, aquecimento global, eutrofização, ecotoxicidade, formação fotoquímica de ozônio troposférico, toxicidade humana, depleção de recursos abióticos, depleção da camada de ozônio (Quadro 7, p.72-73).

Os métodos de AICV utilizados foram: CML 2001, EDIP 1997 e USEtox 2008. Cada componente inventariado na segunda fase do estudo possui um fator de equivalência em cada método de avaliação (caracterização).

Foram quantificados os potenciais impactos ambientais para cada categoria nas Tabelas 15 a 22. A agregação dos dados para análises do ICV permitem também analisar as demandas energéticas para a produção do painel MDF. Com o intuito de compreender os principais subsistemas contribuidores de impactos, cada categoria de impacto foi estratificada em termos de subsistemas da produção do painel na fronteira *cradle-to-gate* (Figura 19 a 26), identificando assim os “*hotspots*”.

Com a identificação dos principais contribuidores, foram sugeridas ações de melhoria de desempenho ambiental associados ao ciclo de vida da produção do painel MDF, na próxima seção (6.4. Interpretação, p.112).

6.3.1 Potencial de Acidificação (PA)

Para o potencial de acidificação (PA) foram utilizados os métodos CML 2001

e EDIP 1997. A Tabela 15 exibe os resultados globais para esta categoria.

| Fronteira do Sistema | Potencial de Acidificação (Kg SO ₂ -Eq.) | |
|--|---|-----------|
| | CML 2001 | EDIP 1997 |
| Sistema de Produção do painel MDF (<i>Cradle-to-gate</i>) | 1,59 | 1,59 |
| Processo Industrial de Produção do MDF “ <i>on-site</i> ” (<i>Gate-to-gate</i>) | 1,01 | 1,01 |

Tabela 15 - Potencial de acidificação por m³ de painel MDF produzido

Observa-se que o potencial de acidificação apresentou resultados equivalentes para os dois métodos de AICV utilizados. Durante todo o ciclo de vida da produção do painel MDF (*cradle-to-gate*), cerca de 63% (1,01 Kg CO₂-Eq.) do potencial de acidificação é gerado nas fronteiras industriais (*gate-to-gate*).

A Figura 19 apresenta a estratificação do potencial de acidificação em todos os outros subsistemas do ciclo de vida da produção do produto.

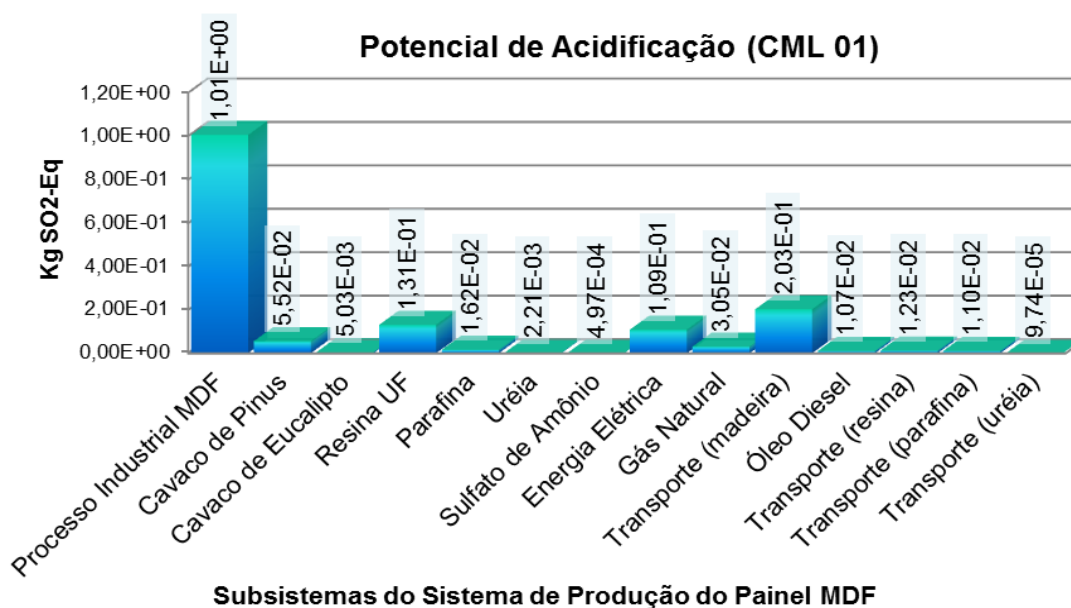


Figura 19 - Potencial de acidificação estratificado, *cradle-to-gate* (CML 2001)

Após a maior contribuição para o potencial de acidificação observada pelo processo industrial de fabricação do painel (63,5%), destacam-se o processo de transporte de matéria-prima (madeira) (12,7%), produção da resina UF (8,2%), e a produção de energia elétrica (6,8%).

Os principais contribuidores para o potencial de acidificação na fronteira

gate-to-gate são as Plantas Térmicas I e II. A primeira apresenta contribuição de 97,75% do total de impacto de potencial de acidificação.

Esta representativa contribuição é devido ao volume de emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) durante a combustão do pó de madeira. Os NOx representam 85,6% do total de impacto da Planta Térmica I, e 54,3% no total de impactos de acidificação durante todo o ciclo de vida do MDF.

As emissões de NOx são provenientes do principal combustível desta planta térmica, os resíduos de madeira (pó de serras, lixadeiras e comprados de terceiro). Ao todo, 94% dos combustíveis utilizados para geração de ar quente e vapor são provenientes de resíduos de madeira. E apenas 6% são representados pela combustão do gás natural.

Os combustíveis de madeira utilizados são resultantes de destinação de processos industriais da fabricação de painéis de madeira. Os resíduos gerados no próprio processo de produção do painel já haviam recebido tratamento químico, possuindo em si uma parcela de resinas e de componentes de origem fóssil. Este fato pode acarretar emissões de NOx diferenciadas na combustão do pó de madeira.

Vale ressaltar, ainda, que as condições de queima (quantidade de oxigênio na combustão e umidade do pó de madeira) que alteram a eficiência da combustão em plantas térmicas podem alterar a razão de emissões atmosféricas e a composição de emissão de gases.

6.3.2 Potencial de Aquecimento Global (PAG)

A Tabela 16 mostra o potencial de aquecimento global (PAG) (para 100 anos) obtidos pelos métodos CML 2001 e EDIP 1997, nos limites *cradle-to-gate* e *gate-to-gate*.

| Fronteira do Sistema | Potencial de Aquecimento Global (Kg CO ₂ -Eq.) – 100a | |
|---|--|-----------|
| | CML 2001 | EDIP 1997 |
| Sistema de Produção do painel MDF (<i>Cradle-to-gate</i>) | 199 | 255 |
| Processo Industrial de Produção do MDF “ <i>on-site</i> ” (<i>Gate-to-gate</i>) | 40,6 | 47,4 |

Tabela 16 Potencial de Aquecimento Global por m³ de painel MDF produzido

Observando a Tabela 16, afirma-se que os resultados contatados pelos dois métodos utilizados são convergentes para as mesmas conclusões no potencial de aquecimento global. Analisando todo o ciclo de vida da produção do painel, houve uma diferença percentual na ordem de 2,0% entre os resultados obtidos pelo método CML 2001 e EDIP 1997.

O processo industrial de produção do painel contribui com aproximadamente 16% para o potencial de aquecimento global. As contribuições dos demais subsistemas deste estudo foram ilustradas na Figura 20.

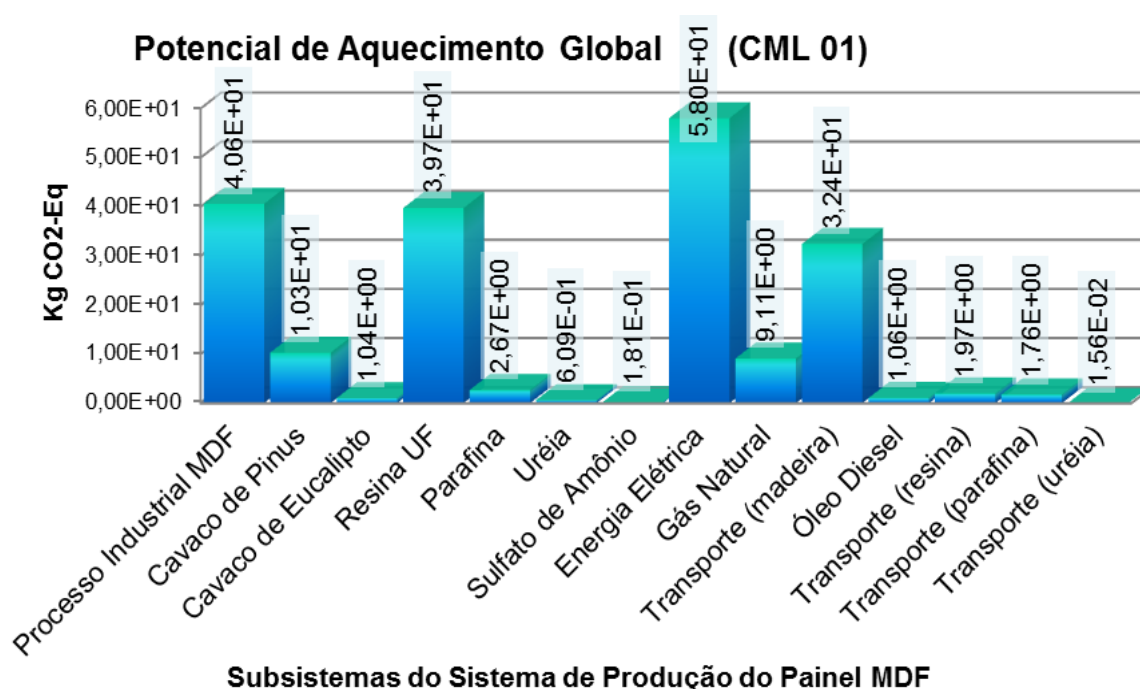


Figura 20 - Potencial de aquecimento global estratificado, *cradle-to-gate* (CML 2001)

O PAG é intimamente influenciado por emissões de hidrocarbonetos, CO, CO₂ (fóssil), CH₄ e outros gases que promovem o efeito estufa. Na abordagem *cradle-to-gate*, o maior influenciador desta categoria de impacto é o subsistema da produção de energia elétrica, representando 29,1% do total (Figura 20).

De acordo com a composição da matriz elétrica nacional, a eletricidade proveniente de carvão mineral, derivados de petróleo e gás natural representam juntas 93,3% do total do potencial de aquecimento global da energia elétrica.

Em segundo lugar está o processo industrial do painel MDF, com representatividade de 20,4% para o PAG. As emissões derivadas da queima do gás

natural e do diesel utilizado no transporte interno são os principais responsáveis por este índice de contribuição.

Com 19,9% dos impactos para o PAG está o subsistema de produção da Resina UF. As cadeias produtivas do metanol e da ureia contribuem com mais de 85% dos impactos da resina UF para esta categoria.

Outros subsistemas associados ao ciclo de vida da produção do painel MDF também possuem representatividade considerável para o PAG, devido à emissão de hidrocarbonetos, e óxidos de carbono de origem fóssil. Destacam-se os transportes de matérias-primas que, juntos, contabilizam 18% dos impactos do PAG, os subsistemas de extração e beneficiamento da madeira de pinus e de eucalipto que representam juntos mais 5,5% e o subsistema de beneficiamento e distribuição do gás natural, com contribuição de 4,6% ao total de impactos relacionados ao PAG no ciclo de vida da produção do painel MDF.

6.3.3 Potencial de Eutrofização (PE)

O impacto da categoria de Potencial de eutrofização é ilustrado na Tabela 17. Este impacto é causado por enriquecimento abrupto e excessivo de nutrientes causados especialmente por substâncias a base de fósforo ou nitrogênio.

| Fronteira do Sistema | Potencial de Eutrofização | |
|--|------------------------------------|-------------------------------------|
| | CML 2001 (Kg PO ₄ .Eq.) | EDIP 1997 (Kg NO ₃ .Eq.) |
| Sistema de Produção do painel MDF (<i>Cradle-to-gate</i>) | 0,287 | 2,92 |
| Processo Industrial de Produção do MDF “ <i>on-site</i> ” (<i>Gate-to-gate</i>) | 0,164 | 1,7 |

Tabela 17 - Potencial de eutrofização por m³ de painel MDF produzido

Apesar dos métodos CML 2001 e EDIP 1997 avaliarem o potencial de eutrofização, não é possível compará-los devido as diferentes unidades de medidas utilizadas. Entretanto, constatou-se similaridade nas razões entre os impactos obtidos na abordagem *cradle-to-gate* e *gate-to-gate*.

A Figura 21 ilustra a estratificação do Potencial de Eutrofização para os subsistemas deste estudo.

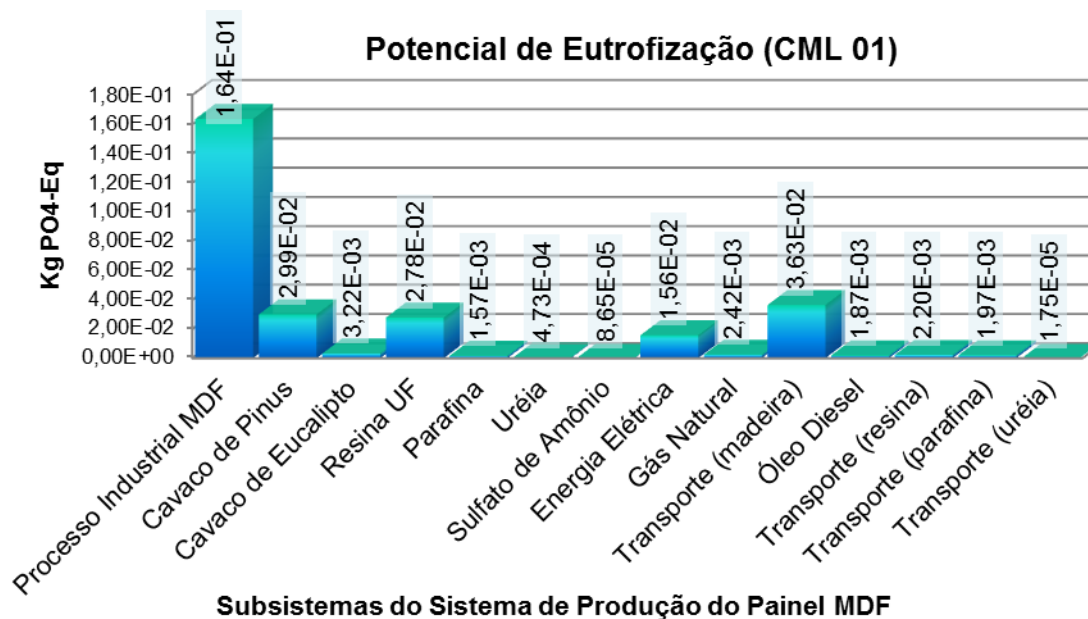


Figura 21 - Potencial de eutrofização estratificado, *cradle-to-gate* (CML 2001)

O processo industrial é o maior contribuidor desta categoria de impacto (aproximadamente 57%). Este potencial é resultante de emissões de NO_x proveniente do gás natural, do óleo diesel e, principalmente, dos resíduos de madeira (pó de madeira). Assim como na categoria de impacto de potencial de acidificação, a ineficiência da combustão do pó de madeira pode resultar em maiores índices de emissões.

Os subsistemas de transporte de madeira e o beneficiamento de cavaco de pinus possuem contribuições de 12,6% e 10,4%, respectivamente. As contribuições destas categorias são provenientes de atividades de manutenção de floresta, preparo do solo, e utilização de óleo diesel em máquinas, tratores e caminhões destes subsistemas, que emitem compostos a base de nitrogênio e fósforo.

A produção da resina UF novamente possui impacto considerável. As cadeias do metanol e da ureia (matérias-primas da resina UF), possuem contribuição de 29,6% e 48,9%, respectivamente, do total de impacto potencial de eutrofização para a resina UF.

6.3.4 Potencial de Ecotoxicidade (PEcotox)

Esta categoria de impacto foi avaliada através do método USEtox 2008. Apesar dos métodos CML 2001 e EDIP 1997 apresentarem categorias de impactos

para avaliar potencial de ecotoxicidade, o método USEtox é o mais completo e recente em termos de requisitos toxicológicos (HAUSCHILD et al., 2008b; ROSENBAUM et al., 2008).

A Tabela 18 ilustra os impactos potenciais para ecotoxicidade, o qual mede como as substâncias tóxicas afetam o ambiente e os organismos que nele vivem. O método USEtox expressa esta categoria de impacto em CTU (Unidade Comparativa de Tóxicos). Para formular o CTU, a ecotoxicidade é normatizada em fração potencialmente afetada de espécies (PAF – *potentially affected fraction of species*) integrada ao longo do tempo (dia) e do volume (m³) do compartimento afetado (PAF.m³.dia/kg de emissão).

| Fronteira do Sistema | Potencial de Ecotoxicidade USEtox |
|--|-----------------------------------|
| | Ecotoxicidade total (CTU) |
| Sistema de Produção do painel MDF (<i>Cradle-to-gate</i>) | 32,3 |
| Processo Industrial de Produção do MDF “ <i>on-site</i> ” (<i>Gate-to-gate</i>) | 3,22 |

Tabela 18 - Potencial de Ecotoxicidade por m³ de painel MDF produzido – Método USEtox 2008

A Figura 22 exibe a contribuição relativa de cada subsistema associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF para a categoria de impacto de ecotoxicidade.

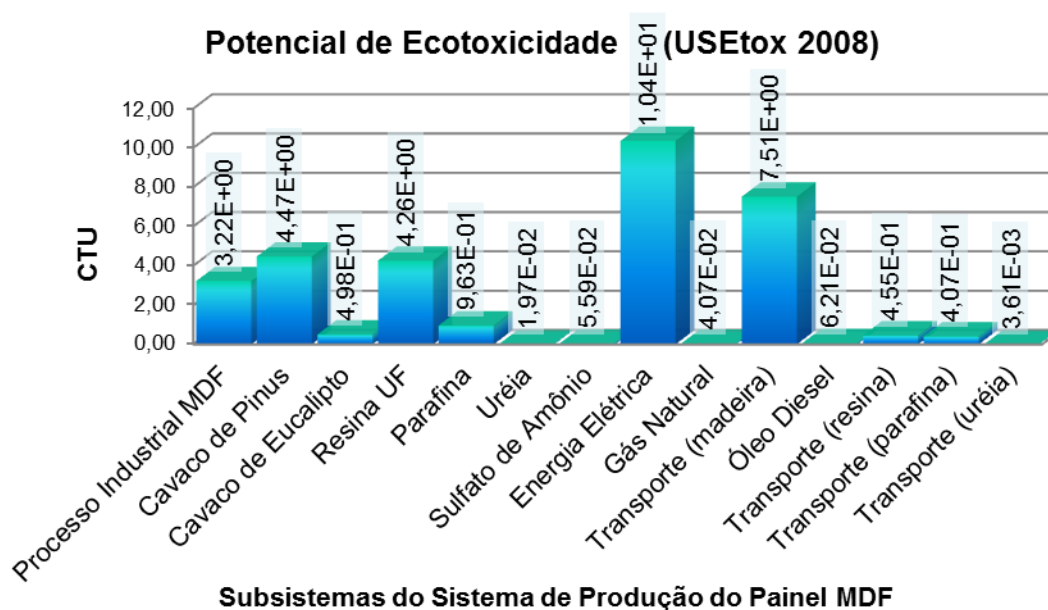


Figura 22 - Potencial de ecotoxicidade estratificado, *cradle-to-gate* (USEtox)

Observando a Figura 22 constata-se que os principais subsistemas contribuidores para a categoria de impacto Potencial de Ecotoxicidade, em ordem de significância, são: Produção de Energia Elétrica (32%), Transporte da Madeira de Pinus (23,2%), Produção do Cavaco de madeira de Pinus (13,8%) e a Produção da Resina UF (13,2%) e o Processo Industrial de Produção do painel de madeira MDF (10%).

Na matriz elétrica brasileira, os principais contribuidores para a ecotoxicidade são as gerações de eletricidade por derivados de petróleo (impacto relativo de 46,2%) e por biomassa (37,8%). A contribuição do transporte de cavaco de madeira para esta categoria é resultante de emissões de substâncias tóxicas decorrentes da combustão do óleo diesel.

O subsistema de produção de cavaco de pinus possui sua representatividade associada ao uso de substâncias químicas durante o cultivo e a manutenção de floresta. Silva (2012) afirma que um dos principais contribuidores à categoria de ecotoxicidade em sistemas de produção florestal é decorrente do uso de herbicidas.

No processo industrial da produção do painel MDF, bem como na produção da resina UF, o potencial de ecotoxicidade é decorrente de emissões de compostos químicos tóxicos, com destaque à emissão de formaldeído livre.

No processo industrial, a totalidade do potencial de ecotoxicidade (3,22 CTU) é proveniente da emissão de formaldeído livre na indústria. A alta toxicidade deste elemento químico, aliado a uma taxa de emissão de 0,12g H₂CO/m³ de painel MDF produzido, corresponde a 10% do Potencial Total de Ecotoxicidade observado no estudo.

6.3.5 Potencial de Formação Fotoquímica de Ozônio Troposférico (PFFOT)

A Tabela 19 exhibe os resultados para o potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico perante os métodos CML 2001 e EDIP 1997. Ambas as avaliações foram consideradas para localidade com baixa concentração de NO_x (característica opcional a ser selecionada no *software* Umberto antes do cálculo de AICV).

| Fronteira do Sistema | Potencial de Formação fotoquímica de ozônio troposférico (Kg etileno) | |
|---|---|-----------|
| | CML 2001 | EDIP 1997 |
| Sistema de Produção do painel MDF (<i>Cradle-to-gate</i>) | 0,237 | 0,749 |
| Processo Industrial de Produção do MDF " <i>on-site</i> " (<i>Gate-to-gate</i>) | 0,216 | 0,662 |

Tabela 19 - Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico por m³ de painel MDF produzido

Os resultados apresentaram variações nos dois métodos utilizados. Os resultados do método EDIP apresentaram-se cerca de três vezes superior (em Kg C₂H₄-Eq.) aos resultados do método CML 2001. Apesar de ambos os métodos possuírem a mesma unidade de medida para esta categoria de impacto, as alterações obtidas justificam-se pela diferença na abordagem de cada método durante a quantificação dos impactos, e pelas diferenças nas bases de dados de cada método no se refere à disponibilidade de dados inventariados (SILVA, 2012).

Todavia, os resultados de ambos os métodos convergem para as mesmas conclusões no tocante a estratificação do potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico. A Figura 23 ilustra a distribuição dos potenciais impactos de acordo com o método CML 2001.

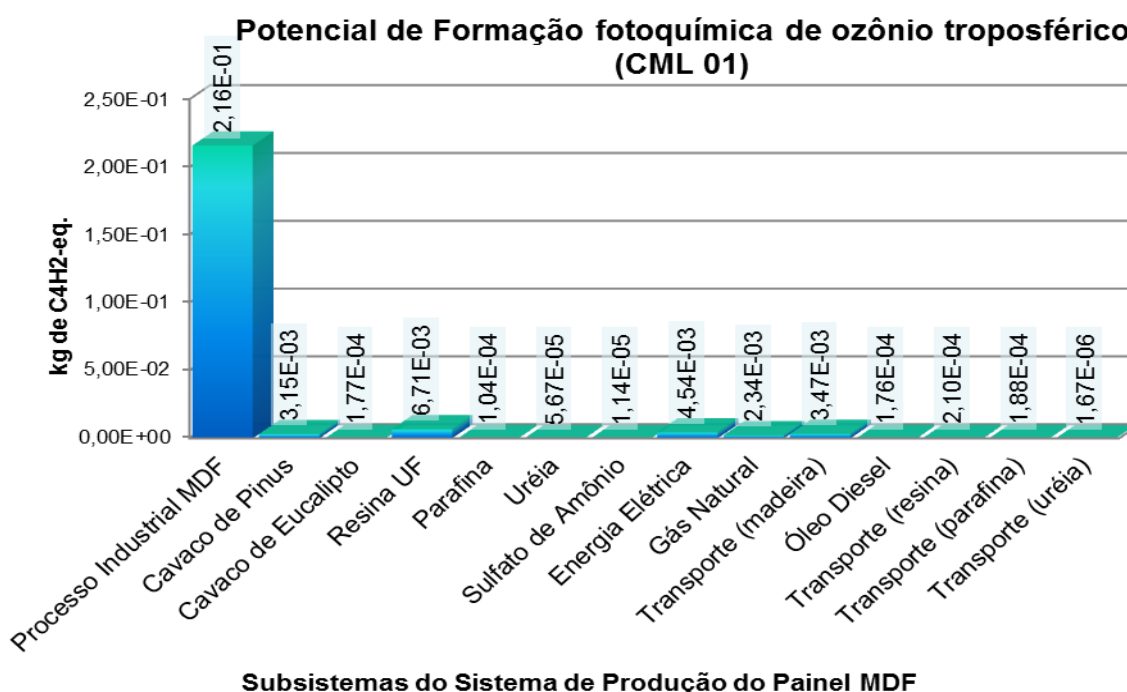


Figura 23 - Potencial de formação fotoquímica de ozônio troposférico estratificado, *cradle-to-gate* (CML 2001)

A análise da Figura 23 permite observar que os resultados obtidos para este impacto concentram-se, em 91,1%, no subsistema de produção industrial do painel de madeira MDF.

Os principais contribuidores na indústria são as emissões de VOCs, NO_x e materiais particulados emitidos na saída do secador (83,33%) e nas chaminés da prensa contínua (16,67%). A formação fotoquímica de ozônio troposférico é causada pela reação de NO_x e VOCs, sobre influência de raios ultravioletas e outras substâncias reativas (em especial o ozônio), o que acarretam na produção de oxidantes que causam o nevoeiro fotoquímico.

6.3.6 Potencial de Toxicidade Humana (PTH)

Os resultados para a categoria de impactos potenciais em toxicidade humana foram dispostos na Tabela 20. Assim como na categoria de impactos de ecotoxicidade, o USEtox 2008 foi adotado para a avaliação pois é considerado o método mais adequado, completo e recente para avaliação de requisitos toxicológicos (HAUSCHILD et al., 2008b; ROSENBAUM et al., 2008).

| Fronteira do Sistema | Potencial de Toxicidade Humana - USEtox 2008 (CTU) | | |
|---|--|--------------------|---------|
| | Carcinogênico | Não- Carcinogênico | Total |
| Sistema de Produção do painel MDF (<i>Cradle-to-gate</i>) | 2,67E-6 | 3,98E-6 | 6,66E-6 |
| Processo Industrial de Produção do MDF " <i>on-site</i> " (<i>Gate-to-gate</i>) | 1,61E-6 | 2,05E-8 | 1,63E-6 |

Tabela 20 - Potencial de Toxicidade humana por m³ de painel MDF produzido

Esta categoria mede os efeitos das emissões ao longo do ciclo de vida do produto na saúde humana, em termos de inalação ou ingestão, que possuem probabilidade de efeitos químicos adversos (ou riscos potenciais) em humanos. No *software* utilizado neste estudo (Umberto® v.5.6 Acad.) a avaliação de impactos potenciais em toxicidade humana é subdividida em duas categorias (carcinogênico e não-carcinogênicos, baseado em dados resultantes de estudos de toxicidade laboratoriais) e a unidade de medida utilizada é a CTU (Unidade Comparativa de Tóxicos) (ROSENBAUM et al., 2008).

A Figura 24 apresenta a estratificação do potencial de toxicidade humana

deste estudo.

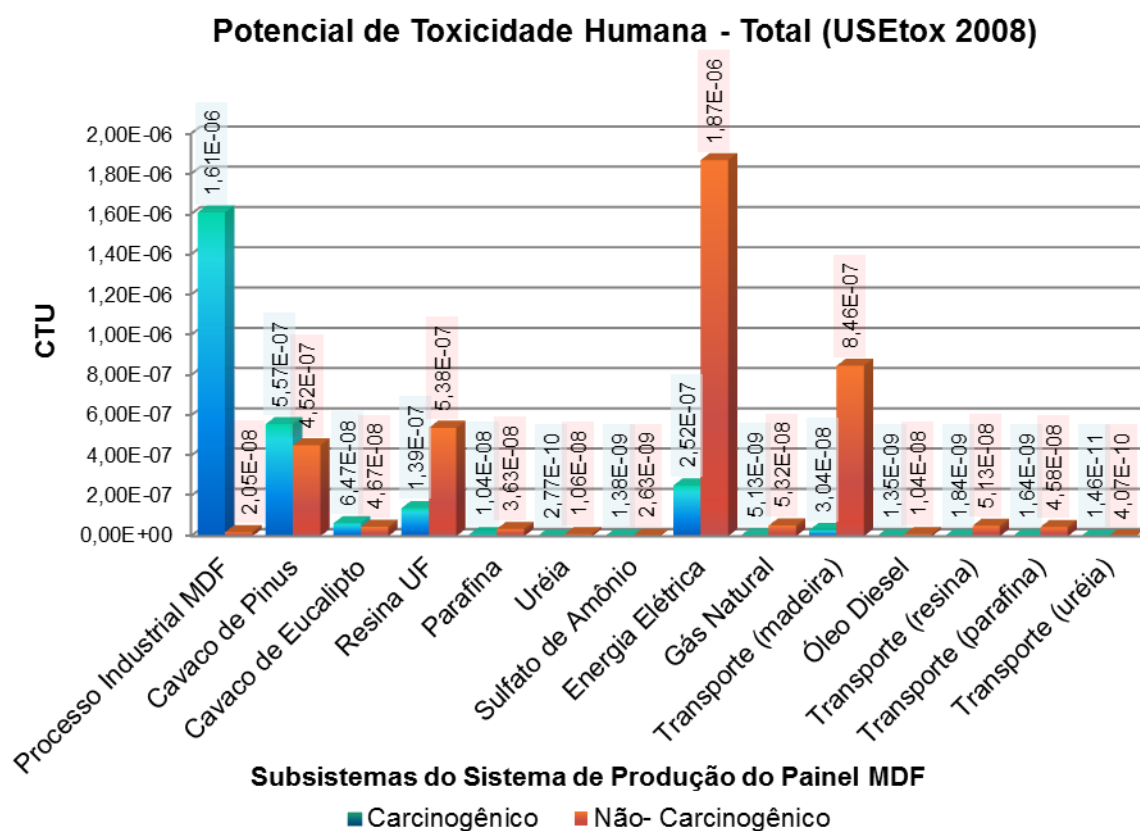


Figura 24 - Potencial de toxicidade humana estratificado, *cradle-to-gate* (USEtox 2008)

Quanto aos impactos toxicológicos carcinogênicos à saúde humana, o grande contribuidor é o processo de produção industrial, que é fortemente influenciado pela emissão de formaldeído livre.

A emissão de formaldeído gerado no interior da indústria corresponde a 60% do total dos impactos toxicológicos carcinogênicos do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. Representa ainda 24,5% do total de impactos potenciais de toxicidade humana.

A produção de cavacos de madeira (pinus e eucalipto) possui uma contribuição de 16,8% ao total de impactos potenciais toxicológicos (carcinogênicos e não carcinogênicos). Já a geração de energia elétrica é influenciada por uma contribuição de 66% na geração de eletricidade através de biomassa. Entre as principais razões destas contribuições está o uso de substâncias químicas toxicológicas durante o cultivo e manutenção agrícola e florestal.

A contribuição nos impactos de toxicidade humana não carcinogênicos derivados do transporte de madeiras é proveniente de emissões da combustão do óleo diesel. Esta categoria de impactos mede os efeitos tóxicos medidos na antroposfera.

Por fim, o ciclo de vida de produção da resina UF possui uma contribuição de 10% no total de impactos de toxicidade humana (20% para efeitos carcinogênicos e 80% para não carcinogênicos). Os principais contribuidores na produção da resina UF são as cadeias produtivas de suas duas principais matérias-primas, a ureia com 46,2% e o metanol com 41,5% de representatividade de impactos de toxicidade humana no ciclo de vida da produção da Resina UF.

6.3.7 Potencial de Depleção de Recursos Abióticos (PDRA)

A Tabela 21 fornece os resultados obtidos para a categoria de impactos de depleção de recursos abióticos, os seja, a extração de recursos não vivos da natureza.

| Fronteira do Sistema | Potencial de Depleção de recursos abióticos |
|--|---|
| | CML 2001 (Kg de SB-Eq.) |
| Sistema de Produção do painel MDF (<i>Cradle-to-gate</i>) | 1,51 |
| Processo Industrial de Produção do MDF " <i>on-site</i> " (<i>Gate-to-gate</i>) | 0,00 |

Tabela 21 - Potencial de Depleção de recursos abióticos por m³ de painel MDF produzido

Como esta categoria de impactos se traduz na extração de recursos não renováveis (ou não vivos), tais como solo, gás natural, óleo cru (base para petróleo), carvão mineral, metais, minerais, entre outros, pode-se observar na Tabela 21 que não foram identificados impactos para esta categoria durante o processo industrial do painel MDF.

A composição dos impactos observados para a categoria de depleção de recursos abióticos ao longo dos subsistemas fornecedores de matérias-primas ao processo de produção industrial do MDF pode ser observada na Figura 25.

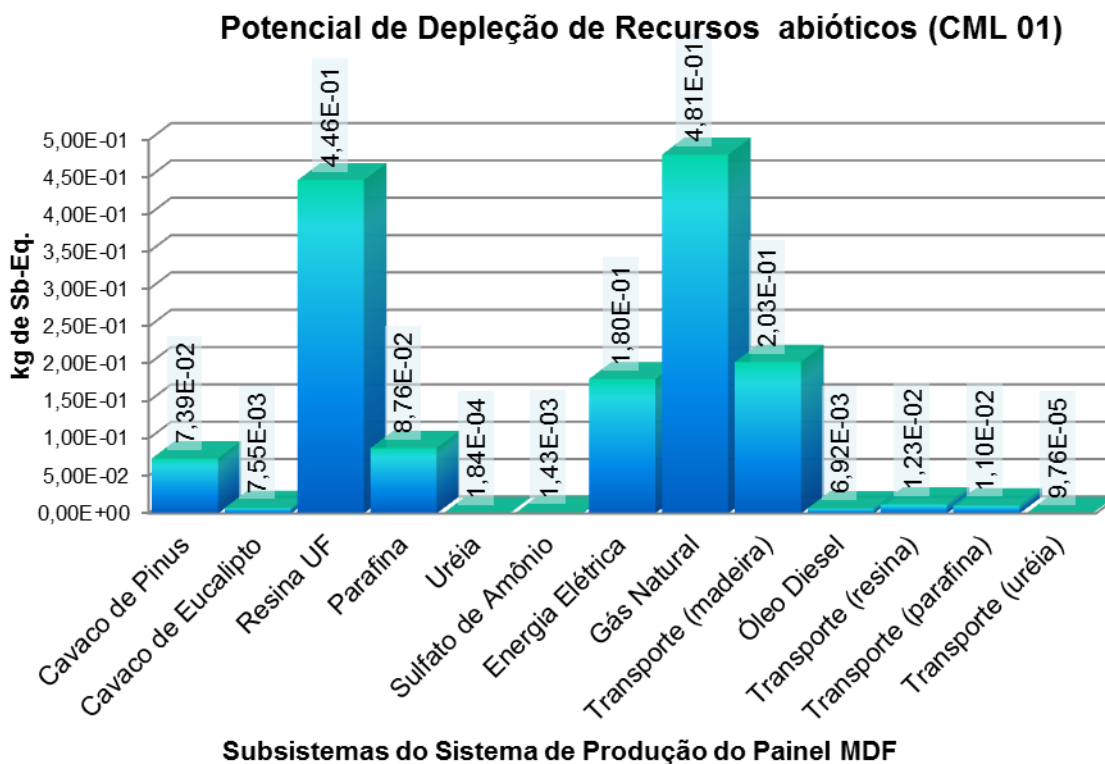


Figura 25 - Potencial de depleção de recursos abióticos estratificado, *cradle-to-gate* (CML 2001)

O subsistema com maior contribuição a depleção de recursos abióticos é da extração e beneficiamento do gás natural (representando 31,8% desta categoria). O gás natural é consumido nas plantas térmicas, com destaque a Planta Térmica II que consome 13,4 m³ de gás natural por m³ de painel MDF produzido, possuindo assim uma representatividade de 77% no impacto potencial de depleção de recursos abióticos, e 24,5% no total de impactos ao longo do ciclo de vida do produto.

A cadeia produtiva da resina possui 91% de seu impacto desta categoria proveniente do consumo de metanol. Ou seja, o consumo de metanol representa cerca de 26,8% do total de impactos relacionados a depleção de recursos abióticos no ciclo de vida da produção do painel MDF.

O impacto proveniente do transporte de madeira (contribuição de 13,4%) é influenciado pelo consumo de óleo diesel. O subsistema de geração de energia elétrica também possui sua representatividade de 11,9% devido ao uso de recursos não renováveis em sua composição. Os destaques para a matriz elétrica provêm da eletricidade gerada a partir do gás natural (com 55,6% de representatividade), seguido dos derivados de petróleo, com 24% de contribuição à depleção de recursos abióticos na geração de energia elétrica no Brasil.

6.3.8 Potencial de Depleção da Camada de Ozônio (PDCO)

A Tabela 22 fornece os resultados alcançados para a avaliação de impactos em termos de potencial de depleção de camada de ozônio.

| Fronteira do Sistema | Potencial de Depleção da camada de ozônio | |
|--|---|--------------------|
| | CML 2001 (Kg CFC) | EDIP 1997 (Kg CFC) |
| Sistema de Produção do painel MDF (<i>Cradle-to-gate</i>) | 2,24E-5 | 2,24E-5 |
| Processo Industrial de Produção do MDF “ <i>on-site</i> ” (<i>Gate-to-gate</i>) | 0 | 0 |

Tabela 22 - Potencial de Depleção da camada de ozônio por m³ de painel MDF produzido

Observa-se que os impactos causados por esta categoria condensam-se ao longo do ciclo de vida do produto, e não na etapa produtiva industrial em si. Não há resultados para esta categoria de impacto no limite *gate-to-gate*. Nota-se também, que os resultados obtidos pelos métodos CML 2001 e EDIP 1997 convergiram para o mesmo resultado (2,24E-5 Kg CFC Eq.). A Figura 26 ilustra os subsistemas que mais contribuem para o potencial de depleção da camada de ozônio.

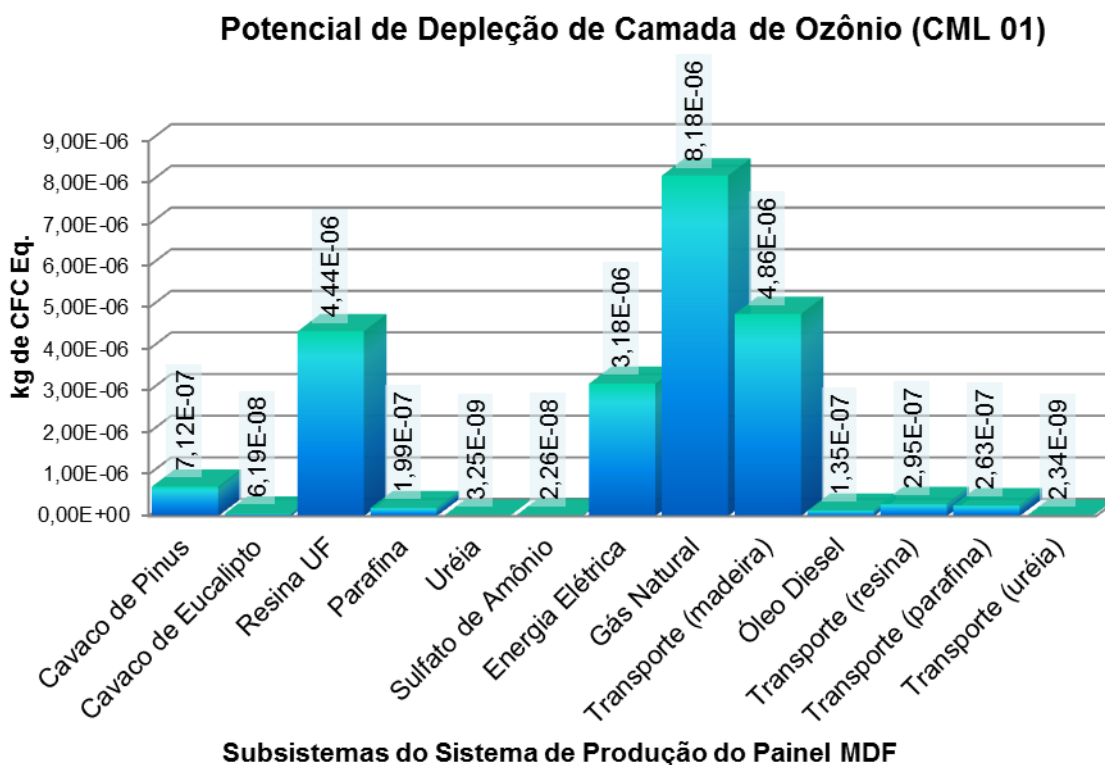


Figura 26 - Potencial de depleção de camada de ozônio estratificado, *cradle-to-gate* (CML 2001)

Esta categoria de impacto mede a liberação de químicos que reduzem a camada de ozônio (O₃) na estratosfera. A redução é causada por emissões de substâncias como clorofluorcarbonos (CFCs), que interferem nas reações químicas normais de oxigênio.

O maior subsistema contribuidor para esta categoria de impactos é referente ao gás natural, com 36,6% dos impactos ao longo do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. Entre as emissões do ciclo de vida da produção do gás natural, destaca-se a emissão do óxido nitroso, principal contribuidor para a depleção da camada de ozônio.

Observa-se também que os outros fundamentais contribuidores para esta categoria de impacto estão associados ao uso de combustíveis de origem fóssil. No transporte de madeiras, o consumo de óleo diesel é o principal contribuidor, representando aproximadamente 14% do total de impacto observado.

O potencial de impacto observado com a matriz elétrica é decorrente da utilização de combustíveis de origem fóssil para a produção de energia elétrica, entre eles, os derivados de petróleo e o gás natural. Na produção de resina UF, a depleção da camada de ozônio acontece em decorrência de duas matérias-primas principais utilizadas: metanol (82,4%) e o óleo diesel (14,4%).

Em geral, os potenciais de impacto desta categoria acontecem em razão da combustão de recursos fósseis que emitem compostos que causam depleção na camada de ozônio, com destaque ao óxido nitroso e aos clorofluorcarbonos (CFCs).

Cada processo e matéria-prima possui uma contribuição diferente às categorias de impacto. Uma análise e uma interpretação conjunta dos dados obtidos nesta categoria de impacto, bem como nas categorias analisadas anteriormente, remetem a identificação dos *hotspots* e solidificam a base conceitual para a proposta de ações de melhoria do perfil ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. Em face ao exposto, a seção seguinte apresenta a quarta fase da ACV, a interpretação.

6.4 INTERPRETAÇÃO

A interpretação é a fase da ACV na qual as constatações obtidas durante a análise de inventário e avaliação de impactos do ciclo de vida são consideradas em

conjunto, inclusive com o objetivo e escopo definido para o estudo.

Com base nos resultados apresentados na AICV, a fase interpretação identificou os pontos críticos potenciais associados aos impactos observados ao longo do ciclo de vida da produção do painel.

A partir deles formulou-se a proposta de ações de melhorias que refletissem positivamente no desempenho ambiental da produção do painel de madeira MDF. Para tanto, criaram-se cenários alternativos baseados nas ações e foram realizadas análises sensitivas para observar, interpretar e verificar a eficiência de resultados que podem ser alcançados, de acordo com as ações formuladas no próximo capítulo desta dissertação (Capítulo 7 - Proposta de ações de melhoria do desempenho ambiental, p. 116).

Para a formulação das ações de melhoria propostas neste estudo, primeiramente foram necessários identificar os principais *hotspots*, ou seja, os pontos críticos potenciais de impacto ambiental ao longo do ciclo de vida do produto. Os principais destaques observados na fase de ICV e AICV foram apresentados mediante a construção de uma matriz de relacionamento.

A condução da fase de interpretação da ACV através do uso de uma matriz de relacionamento objetivou expor, de maneira sistemática e clara, os principais *hotspots* do estudo e suas respectivas relações com cada categoria de impacto do ciclo de vida.

A matriz construída correlaciona e interpreta os *hotspots* identificados na ACV da produção do painel MDF com as categorias de impactos avaliadas durante a fase de AICV, bem como, a análise de fontes não renováveis e fósseis realizada na fase de ICV deste trabalho.

Cada *hotspot* identificado foi apresentado na primeira coluna da matriz de relacionamento. Suas relações com as categorias de impactos foram demarcadas no corpo da matriz. Cada *hotspot* identificado normalmente apresenta-se relacionado à várias categorias de impactos diferente.

A interpretação dos pontos críticos potenciais foi realizada na própria matriz de relacionamento. A última coluna da matriz exhibe os comentários gerais para as relações entre os *hotspots* identificados e as categorias de impactos do ciclo de vida utilizadas neste trabalho. A matriz de relacionamento construída apresenta-se na Figura 27 (p. 114).

| Hotspots Identificados | Energia de Fontes Não Renováveis e Fósseis | | | | | | | | | | Comentários Gerais |
|--|--|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|--|--------------------------------|---|---|---|--|---|
| | Potencial de Acidificação | Potencial de Aquecimento Global | Potencial de Eutrofização | Potencial de Ecotoxicidade | Potencial de Formação fotoquímica de ozônio troposférico | Potencial de Toxicidade humana | Potencial de Depleção de recursos abióticos | Potencial de Depleção da camada de ozônio | | | |
| Gás Natural (Combustível para Planta Térmica) | X | X | X | X | | X | | X | X | | Utilizado como combustível nas Plantas Térmicas, sendo o combustível exclusivo da Planta Térmica II. Possui suas contribuições às categorias de impacto pelo fato de gerar emissões devido sua combustão e se tratar de um recurso de fonte fóssil e não renovável. O ciclo de vida da Produção do gás natural apresenta-se com maior destaque principalmente na categoria de depleção da camada de ozônio. |
| Resíduos de Madeira (Combustível para Planta Térmica) | | X | | X | | X | | | | | Principal fonte de combustível na P.T. I. A combustão dos resíduos de madeira (pó de madeira) apresentam alto teor de emissão de Óxidos de Nitrogênio (NOx). Os NOx possuem alta relação com as categorias de impactos de Acidificação, Eutrofização e Formação Fotoquímica de ozônio troposférico. O fato de que os resíduos de madeira que são gerados pelo próprio sistema de produção do MDF sofreram tratamento químico (principalmente de resinas sintéticas) anteriormente podem acarretar em variações nas emissões de NOx. A eficiência nas condições de queima na Planta Térmica também pode interferir na composição das emissões geradas. |
| Energia Elétrica | | | X | | X | | X | X | X | | A composição da matriz elétrica brasileira apesar de ser, em sua maior parte, de origem renovável, acaba interferindo em diferentes categorias de impactos. A utilização de fontes não renováveis e fósseis influencia ao longo do ciclo de vida da produção do painel MDF. O percentual de geração de energia elétrica oriunda de biomassa também impacta em algumas categorias devido o uso de substâncias químicas para o cultivo agrícola e florestal. |
| Resina UF | | | X | | X | | X | X | X | | A resina UF aparece como uma matéria prima de destaque considerável no que se refere à impactos associados ao ciclo de vida do painel de madeira MDF. Além de possuir em sua composição componentes de origem fósseis e impactantes como a uréia e o metanol, a resina UF gera a emissão de formaldeído livre em decorrência das características e condições de manufatura do painel MDF. A emissão do formaldeído atinge notavelmente as categorias de impactos toxicológicas. |
| Transporte de Madeira (cavacos) | | | X | | X | | X | X | X | | A principal matéria prima do painel MDF é a madeira. Devido ao grande volume do material e a alta demanda, o transporte da madeira contribui para categorias de impactos associadas à emissão gerada pela combustão do óleo diesel utilizado pelos caminhões. O volume da carga, a demanda e a distância influenciam diretamente nos impactos gerados por essa logística. |
| Cavaco de Madeira | | | | | X | | X | | | | O cavaco de madeira possui significância em termos de impactos ambientais nas categorias toxicológicas. A utilização de compostos químicos para cultivo e manutenção das florestas, bem como as emissões provenientes da combustão do óleo diesel utilizados por máquinas florestais, estão entre os principais contribuintes. |

Figura 27 – Matriz de relacionamento dos pontos críticos potenciais (*hotspots*)
Fonte: Autoria Própria.

Analisando a Figura 27, contata-se que os *hotspots* podem ser resumidos em seis itens elementares: Gás Natural (Combustível para Planta Térmica), Resíduos de Madeira (Combustível para Planta Térmica), Energia Elétrica, Resina

UF, Transporte de Madeira (cavacos), Cavaco de Madeira. Cada um dos *hotspots* foi comentado na última coluna da matriz.

Ainda na fase de interpretação da ACV, vale citar que outros elementos químicos levantados no ICV tal como a ureia e o sulfato de amônio, apesar de gerarem impactos ambientais notáveis, não possuem grande significância no cenário do ciclo de vida (*cradle-to-gate*) da produção do painel de madeira MDF por não serem consumidos em grandes quantidades.

Com a interpretação conjunta das questões significativas ambientais resultantes da ACV, formulou-se a proposta de ações de melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. As ações propostas foram arquitetadas com base nos seis principais *hotspots* identificados na matriz de relacionamento (Figura 27). O próximo capítulo deste trabalho apresenta a proposta de ações de melhoria do desempenho ambiental da produção do painel de madeira MDF.

7 PROPOSTA DE AÇÕES DE MELHORIA DO DESEMPENHO AMBIENTAL

A proposta de ações de melhorias foi elaborada com base nos pontos críticos potenciais identificados. A elaboração de cenários alternativos, com as mudanças que visam reter os impactos promovidos pelos *hotspots* ao longo do ciclo de vida da produção do painel MDF, foi discutida junto aos gestores da indústria pesquisada. A consulta aos gestores objetivou verificar a viabilidade tecnológica e consensual das propostas.

Para análises sensitivas das ações propostas foram aplicados os métodos CML 2001 e USEtox 2008 (para categorias de impactos de toxicidade). As ações propostas foram expostas nas seções subsequentes e analisaram-se cenários alternativos que possam subsidiar a implementação das mesmas. As análises sensitivas realizadas demonstram os efeitos das ações de melhoria de desempenho ambiental nos resultados das avaliações de impactos. A primeira proposta está relacionada ao *hotspot* do gás natural (utilizado como combustível nas plantas térmicas).

7.1 ALTERAÇÕES QUANTO AO CONSUMO DE GÁS NATURAL: ANÁLISE DE CENÁRIOS

O gás natural possui cerca de 77% de seu consumo na Planta Térmica II (responsável pelo aquecimento do óleo térmico). Neste sentido, a substituição desta planta térmica por outra que utilize combustíveis de origem renovável pode contribuir para a redução de impactos ambientais potenciais, bem como estreitar a dependência de combustível de origem não renovável nos limites *gate-to-gate*.

Neste sentido, propõe-se extinguir o combustível gás natural da Planta Térmica II. Criou-se um cenário alternativo para verificar os efeitos da redução do consumo do gás natural que são notáveis nos impactos ao longo do ciclo de vida da produção do painel MDF. Os cenários analisados foram:

- C0: Cenário 0 – Cenário original analisado neste estudo;
- C1: Cenário 1 – Não considera o consumo de gás natural na planta térmica II, ou seja, há uma redução de 77% no consumo de gás natural para a produção de 1,0 m³ de painel de madeira MDF.

A Figura 28 apresenta uma análise sensível entre os dois cenários (C0 e C1), podendo identificar os principais efeitos da redução do consumo do gás natural.

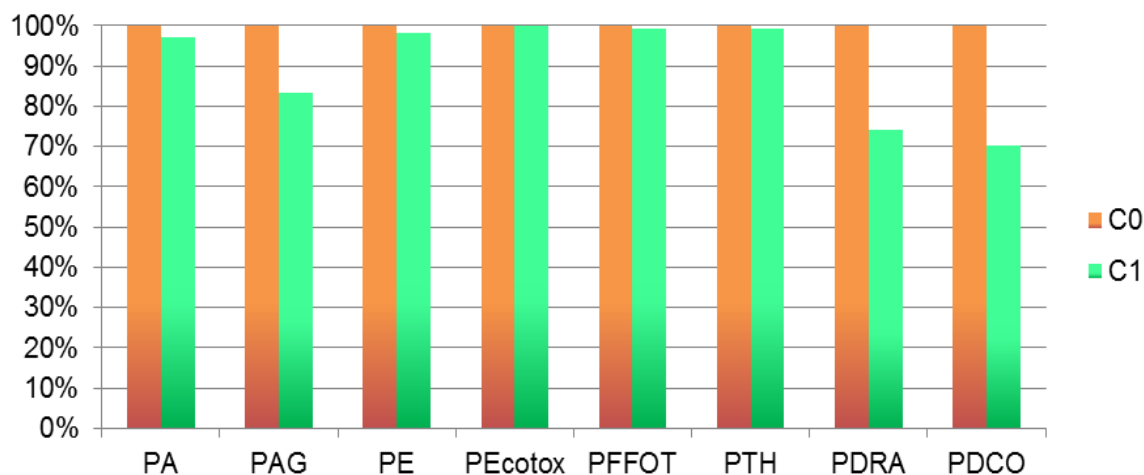


Figura 28 - Análise sensível para alterações em gás natural (*cradle-to-gate*)

Através da comparação entre os cenários, nota-se a influência direta do gás natural consumido na Planta Térmica II nos impactos observados ao longo do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. As maiores reduções de impactos foram observadas nas categorias de Potencial de Depleção de Camada de Ozônio – PDCO (redução de 30%), Potencial de Depleção de recursos Abióticos – PDRA (redução de 25%) e Potencial de Aquecimento Global – PAG (redução de 17%).

Obviamente, uma nova planta térmica com combustíveis de origem renovável também apresenta contribuições para outros impactos. Entretanto, para a contabilização real destes novos impactos, se faz necessário quantificar e avaliar as emissões e a fonte de combustíveis da nova planta térmica. A Figura 28 objetivou analisar a sensibilidade da redução do consumo de gás natural (fonte fóssil) para a geração de energia térmica na indústria produtora do painel MDF.

Por fim, a substituição da Planta Térmica II por outra que utilize um combustível de fonte renovável (biomassa, por exemplo), promove uma redução de aproximadamente 63% na dependência de combustíveis fósseis (de 19,2% para 7,1) nas fronteiras *gate-to-gate*.

7.2 ALTERAÇÕES QUANTO AOS RESÍDUOS DE MADEIRA UTILIZADOS COMO COMBUSTÍVEL PARA PLANTA TÉRMICA

Observou-se na fase de AICV que a combustão de resíduos de madeira (pó de madeira) na Planta Térmica I possui contribuições significativas para as categorias de impactos de Potencial de Acidificação e de Eutrofização devido às emissões de óxidos de nitrogênio (NOx).

A emissão atmosférica de NOx possui alta influência na quantificação de impactos nas categorias de acidificação, eutrofização e formação fotoquímica de ozônio troposférico e sua emissão pode apresentar variações devido a duas hipóteses.

A primeira condiz com a origem dos resíduos de madeira gerados no interior da fábrica. Por se tratarem de pó de madeira gerado no processo de produção do MDF, este combustível de origem renovável possui compostos químicos impregnados às fibras de madeira, entre eles as resinas sintéticas, a ureia e a parafina. A combustão da madeira com estes compostos, pode promover variações das emissões de NOx quando comparada a combustão de pó de madeira sem prévio tratamento químico, como é o caso dos resíduos de madeira comprados de terceiros, que representam aproximadamente 52% do total de pó de madeira consumido na Planta Térmica II.

A segunda hipótese condiz com a qualidade da combustão dos combustíveis na Planta Térmica. Fatores como a quantidade de oxigênio e umidade da matéria-prima podem alterar a composição dos elementos emitidos, entre eles, o NOx.

Diante destas explicações, propõe-se reduzir proporcionalmente o uso de combustíveis de madeira que receberam tratamento químico prévio e analisar os resultados e composição das emissões geradas pela Planta Térmica, a fim de verificar a sensibilidade desta mudança no fator de emissão de NOx.

Outra proposta formulada para esta temática é a realização de uma análise especializada em eficiência da queima dos combustíveis de madeira na Planta Térmica I. A má eficiência de combustão em caldeiras pode influenciar negativamente nos resultados das emissões atmosféricas. Os ajustes de parâmetros técnicos de termodinâmica podem resultar em melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF.

Pelo fato da impossibilidade de avaliar mudanças técnicas no desempenho de equipamentos, em conceitos de termodinâmica e pela inexistência de banco de dados para geração de energia térmica através do reaproveitamento de resíduos de madeira provenientes de processos de produção de painéis de madeira, não foi

viável a realização de análises sensitivas de cenários alternativos. Para tanto, seria necessária a realização de testes *in loco*, inventariando as emissões geradas para as diferentes propostas desenvolvidas, possibilitando assim avaliar os efeitos nas categorias de impactos ambientais.

7.3 ALTERAÇÕES QUANTO AO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA: ANÁLISE DE CENÁRIOS

A participação de fontes de energia renovável para produção de eletricidade, em 2010, era de aproximadamente 86% (EPE, 2011). A parcela restante de fontes não renováveis é responsável pela maior parte dos impactos observados associados ao ciclo de vida da produção do MDF. Algumas fontes de geração de energia renovável, em especial a proveniente de biomassa (que representa 6,3% da matriz elétrica), também apresentaram impactos potenciais em categorias como relacionadas à toxicidade, devido o uso de substâncias químicas toxicológicas durante as fases de cultivo e manutenção agrícola e florestal.

Neste cenário, a composição da matriz elétrica nacional implica em diferentes impactos ao longo do ciclo de vida da produção do painel MDF. A proposta formulada para este *hotspot* observado consiste no estímulo a redução do consumo de energia elétrica na fronteira *gate-to-gate* da produção de painéis de madeira MDF.

Foram realizadas análises para verificar a sensibilidade da redução do consumo de energia elétrica nos impactos potenciais observados em todo o ciclo de vida do painel MDF (*Cradle-to-gate*). Foram realizadas análises sensitivas em três diferentes cenários:

- C0: Cenário 0 – Cenário original analisado neste estudo;
- C1: Cenário 1 – Redução de 3% no consumo de energia elétrica;
- C2: Cenário 2 – Redução de 5% no consumo de energia elétrica;
- C3: Cenário 3 – Redução de 10% no consumo de energia elétrica.

A Figura 29 exibe a sensibilidade observada da redução do consumo de energia elétrica nos impactos totais do ciclo de vida do painel de madeira MDF.

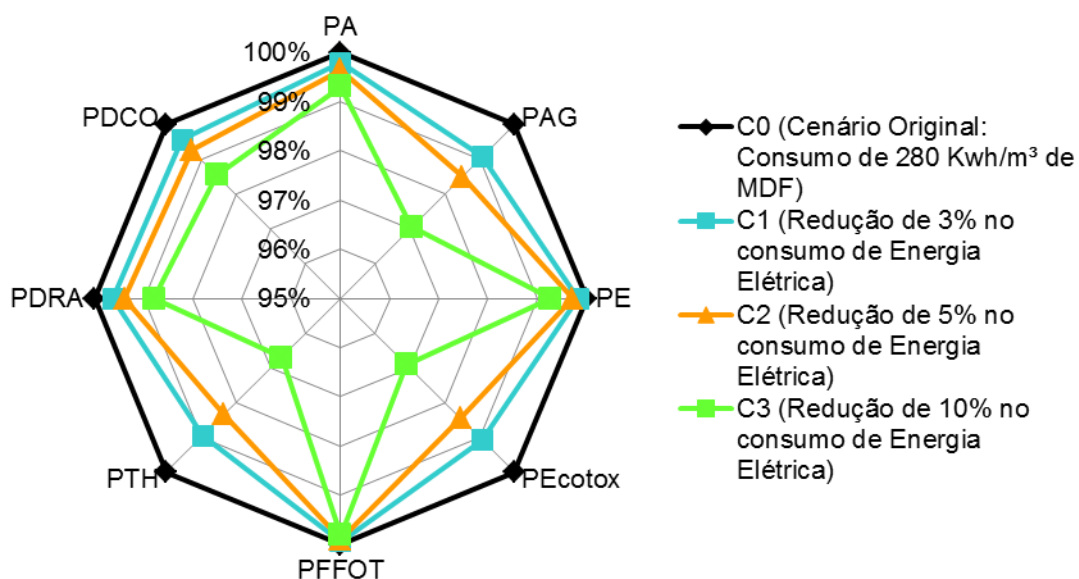


Figura 29 - Análise sensível para alterações em consumo de energia elétrica (*cradle-to-gate*)

O gráfico apresentado na Figura 29 evidencia as reduções nos impactos abordados na fase de AICV em decorrência da proposta de redução do consumo de energia elétrica na indústria produtora do painel MDF.

A redução do consumo de energia promove melhoria em todas as oito categorias de impacto analisadas. Destacam-se o Potencial de Aquecimento Global (PAG), Potencial de Ecotoxicidade (PEcotox) e Potencial de Toxicidade Humana (PTH), que com uma redução de 10% no consumo de energia elétrica acabam resultando em uma redução de 3% (em média) no impacto total gerado ao longo de todo o ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. Uma redução de 3% no consumo de energia elétrica resulta, em média, uma redução de 1% nos impactos totais (*cradle-to-gate*) destas três categorias.

As categorias de Potencial de Depleção de recursos abióticos (PDRA) e da camada de ozônio (PDCO) possuem uma redução média de 0,13% nos impactos gerados a cada 1% de redução de energia elétrica. Se caso a matriz elétrica brasileira possuísse maior percentual de fontes de energia não renovável, estas duas categorias de impactos sofreriam reduções mais acentuadas.

De maneira geral, a simples redução de consumo de energia elétrica nas fronteiras da indústria produtora do painel pode, além de gerar benefícios econômicos, resultar em reduções de impactos ambientais totais. As reduções de impactos apresentaram-se tímidas (não mais que 3% para uma redução de 10% no consumo de energia elétrica), entretanto esta proposta quando combinada com

outras de melhora de desempenho ambiental (como a redução do consumo de resina UF) podem ser fundamentais para uma melhora global do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida de produção do painel MDF.

7.4 ALTERAÇÕES QUANTO AO CONSUMO DE RESINA UF: ANÁLISE DE CENÁRIOS

A utilização da resina UF para a produção do painel de madeira MDF caracterizou-se como um dos importantes *hotspots* identificados. Os impactos foram refletidos principalmente nas categorias de toxicidade, aquecimento global, depleção de recursos abióticos e da camada de ozônio.

Entre as razões para a alta influência da resina nestas categorias de impactos são decorrentes de algumas características pontuais. A primeira é devido à resina UF possuir uma composição baseada em recursos fósseis (com destaque a ureia e ao metanol, atualmente obtido da reação do gás de síntese com origens fósseis). Durante o processo produtivo do painel MDF, ocorre a cura térmica da resina, durante este processo há emissão de formaldeído livre (composto químico com alta toxicidade humana, em especial à carcinogênica).

De acordo com a consulta aos gestores da indústria produtora do painel MDF, as barreiras tecnológicas e financeiras ainda impedem a fabricação do painel de madeira MDF com outro tipo de resina, menos impactante. A substituição da resina UF, caracteriza-se como uma ação ainda inviável acarretando em altos custos de fabricação e, como consequência, tem-se perdas competitivas e de mercado.

Neste sentido, as propostas para melhora de desempenho ambiental, baseada em ações sobre a resina UF, foram formuladas baseadas na redução do consumo da mesma. Foram analisados quatro cenários que simulam percentuais de redução do consumo de resina UF no painel:

- C0: Cenário 0 – Cenário original analisado neste estudo;
- C1: Cenário 1 – Redução de 3% no consumo de resina UF;
- C2: Cenário 2 – Redução de 5% no consumo de resina UF;
- C3: Cenário 3 – Redução de 10% no consumo de resina UF.

Os resultados obtidos foram dispostos na Figura 30:

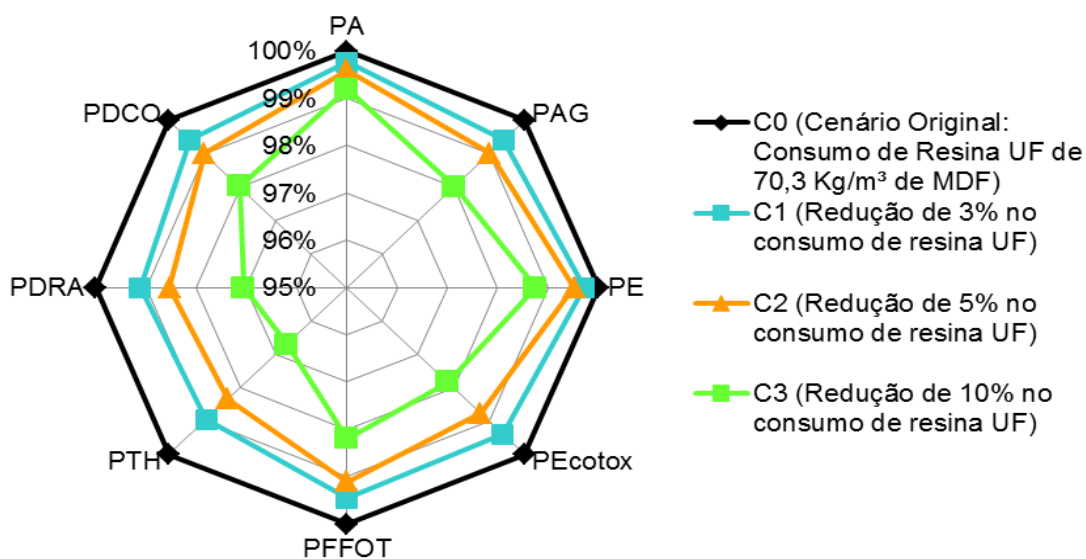


Figura 30 - Análise sensível para alterações em consumo de resina UF (cradle-to-gate)

Observa-se que a redução no consumo de resina UF (acompanhada pela consequente redução de emissão de formaldeído livre) acarreta em ganhos ambientais principalmente nas categorias de impactos relacionadas à toxicidades (PTH, PEcotox) e à depleção de recursos abióticos.

Reduzindo o consumo de resina UF original (100%) até 90%, obteve-se uma redução nos impactos potenciais de todo o ciclo de vida da produção do painel em 3,3% para potencial de toxicidade humana (PTH), 3,1% para ecotoxicidade, 2,9% para depleção de recurso abióticos, 2% para aquecimento global e depleção da camada de ozônio, 1,8% formação fotoquímica de ozônio troposférico, 1,2% em ecotoxicidade e 0,8 em acidificação.

Outra alternativa para melhorar os impactos relacionados ao consumo de resina UF, além da redução do seu consumo, é melhorar a ecoeficiência na produção dos insumos mais impactantes da cadeia produtiva da resina, o metanol e a ureia.

7.5 ALTERAÇÕES QUANTO AO TRANSPORTE E CONSUMO DE MADEIRA (CAVACO): ANÁLISE DE CENÁRIOS

A principal matéria-prima da produção do painel MDF é a madeira em cavacos. Nos dados quantificados no ICV, tem-se que 88% (617 Kg/m³ de MDF) dos cavacos consumidos foram provenientes de pinus, enquanto outros 12% são de madeira de eucalipto.

Os cavacos de madeira foram classificados como um *hotspot* ao longo do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF por dois principais motivos. O primeiro diz respeito ao transporte deste cavaco.

O transporte é realizado por caminhões via rodovias e a distância média dos fornecedores de cavaco foi de 150 km (por trecho). O grande volume de madeira em cavacos transportada, em especial de pinus, faz com que a operação de logística rodoviária gere impactos significativos devido à combustão do óleo diesel utilizado por caminhões.

O segundo principal motivo ocorre em decorrência do consumo de combustíveis fósil em atividades de campo e do uso de substâncias toxicológicas para manutenção e cultivo de florestas (fertilizantes e herbicidas).

Neste sentido, a fim de minimizar os impactos promovidos pelo transporte e consumo de cavacos de madeira, foram propostas as seguintes ações:

a) Redução no consumo de madeira: Confeccionar painéis com densidades menores que, ao mesmo tempo, atendam com os requisitos normativos de fabricação do painel de MDF, de acordo com as características de cada espessura do painel. A redução de consumos também pode ocorrer com a compra de cavacos com teores de umidade menores;

b) Redução no transporte logístico da madeira: Optar pela compra de cavaco de madeira de fornecedores mais próximos à indústria. A distância de 150 km foi obtida através da média ponderada entre volume transportado e distância de 69 fornecedores de cavacos durante o ano de 2010. Neste sentido, sugere-se aumentar o volume de compra de fornecedores com distâncias menores.

As ações propostas foram simuladas através de três cenários alternativos:

- C0: Cenário 0 – Cenário original analisado neste estudo;
- C1: Cenário 1 – Redução de 5% no consumo de madeira;
- C2: Cenário 2 – Redução de 20% da distância de fornecedores;
- C3: Cenário 3 – Redução conjunta de 5% no consumo de madeira e de 20% da distância de fornecedores.

A Figura 31 apresenta as análises sensitivas realizadas para cada um dos cenários propostos, em relação aos impactos potenciais observados na ACV da produção do painel de madeira MDF.

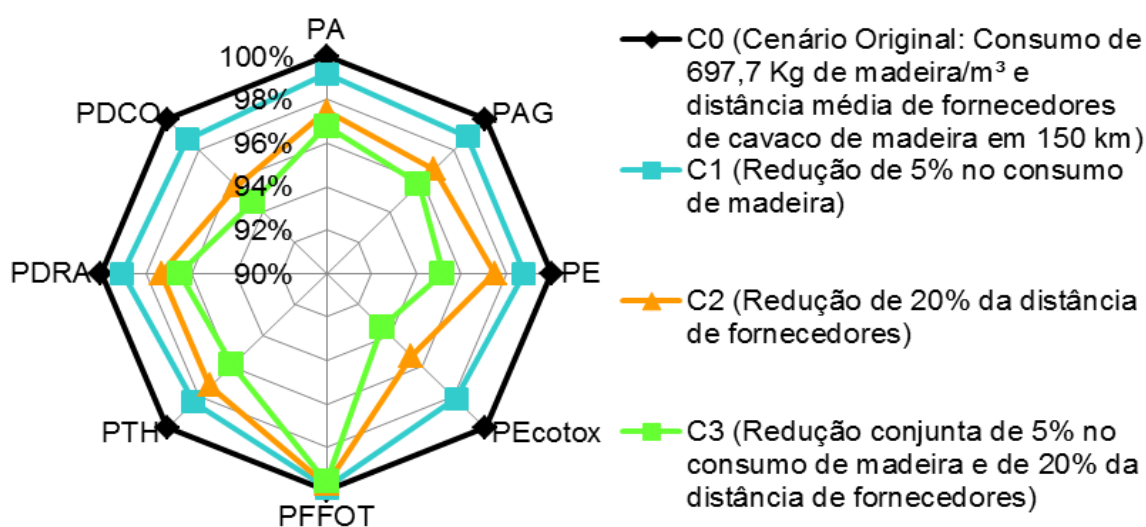


Figura 31 - Análise sensível para alterações em consumo e transporte de cavaco de madeira (cradle-to-gate)

As propostas formuladas para minimizar os impactos observados no *hotspot* identificados relacionado ao consumo e transporte de madeira apresentam-se satisfatórias. Observando a Figura 31 nota-se que a implementação conjunta de ações para a redução do consumo de madeira e da distância de fornecedores de cavaco pode resultar em minimização de até 6,5% no impacto potencial total de ecotoxicidade no ciclo de vida da produção do MDF.

As propostas quando aplicadas em conjunto (C3) resultam na minimização do potencial impacto em 5,4% na depleção da camada de ozônio (principalmente pela redução nas distâncias com fornecedores), em 4,8% na categoria de eutrofização, em 4,2% no aquecimento global e toxicidade humana, em 3,5% na depleção de recursos abióticos e, em 3,2% na acidificação. A categoria de impacto associada ao ciclo de vida da produção do painel MDF menos sensível às ações propostas foi a de formação fotoquímica de ozônio troposférico.

Observa-se ainda que as propostas em ações individuais (C1 e C2) possuem sensibilidades diferenciadas em cada categoria de impacto. Por exemplo, na categoria de PDCO o principal contribuidor para a minimização de impactos foi a condição do Cenário 2 (C2), enquanto que na categoria de PTH, o Cenário 1 (C1) apresentou-se como maior contribuidor para a redução do impacto. De modo geral, a ACV permite realizar análises sensíveis, em diferentes cenários, para avaliar qual a relação entre causa e efeito de mudanças nos principais *hotspots* identificados no estudo com as diferentes categorias de impactos de AICV.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo geral propor ações de melhoria de desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida da produção do painel MDF, mediante a aplicação da ACV. Para que este objetivo pudesse ser atingido, foi necessário responder aos objetivos específicos traçados na introdução deste trabalho.

Em resposta ao objetivo específico vinculado à construção do inventário do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF, foi desenvolvido e apresentado o ICV do sistema de produção do painel nas fronteiras *gate-to-gate*. Os dados foram coletados de fontes primárias na indústria pesquisada e foram expostos em função da unidade funcional de 1,0 m³ de painel de madeira MDF. O ICV construído caracteriza-se como o primeiro realizado para a produção do MDF nas características da cadeia produtiva brasileira e contribuindo ao cenário acadêmico no que se refere ao avanço e construção de base de dados de ICVs nacionais.

No que se refere ao objetivo específico de avaliação dos impactos ambientais associados à produção do painel de madeira MDF utilizando diferentes métodos de avaliação. Este trabalho utilizou três métodos de AICV: CML 2001, EDIP 1997 e USEtox 2008. Pode-se constatar que sempre que houve comparações entre resultados das avaliações entre os métodos CML 2001 e EDIP 1998, os resultados apresentaram equiparidade e revelaram as mesmas tendências na identificação dos *hotspots* de cada categoria de impacto. O método USEtox 2008 foi utilizado, especificamente, para o cálculo das categorias de impactos potenciais toxicológicos (potencial de ecotoxicidade e toxicidade humana) e nas suas respectivas identificações de *hotspots*. O USEtox é o método mais aconselhável para avaliação de tais categorias.

Os resultados da AICV subsidiaram os resultados do terceiro objetivo específico deste trabalho: Identificar as atividades de produção que possuem contribuição significativa para os impactos potenciais totais associados ao produto. Ou seja, identificar os *hotspots* do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF.

Como o primeiro *hotspot*, está a atividade de consumo de gás natural para geração de energia térmica nas plantas térmicas. O uso de gás natural possui contribuições significativas nas categorias de impactos potenciais de acidificação,

aquecimento global, eutrofização, formação fotoquímica de ozônio troposférico, toxicidade humana, e com destaque especial para a categoria de depleção da camada de ozônio.

A segunda atividade que apresenta alta contribuição aos impactos observados é o consumo de resíduos de madeira como combustível na Planta Térmica I. Os principais efeitos deste insumo são refletidos nas categorias de potencial de aquecimento global, eutrofização e formação fotoquímica de ozônio troposférico. A emissão de NOx durante a combustão dos resíduos de madeira apresenta-se a principal razão para a contribuição nestas categorias de impacto.

O consumo de energia elétrica se apresentou como um *hotspot* nas categorias de impactos de aquecimento global, ecotoxicidade, toxicidade humana, depleção de recursos abióticos e depleção da camada de ozônio. Como discutido nos resultados, as principais razões destas contribuições são representadas pelas parcelas de geração de eletricidade proveniente de fontes fósseis e de biomassa.

A utilização de resina UF atinge notavelmente as categorias de impactos toxicológicos, especialmente pela emissão de formol livre durante o processo de fabricação do painel MDF. A emissão de formol livre representou 60% do total dos impactos toxicológicos carcinogênicos do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. A composição da resina possui, em sua grande maioria, componentes de origem fóssil (tais como a ureia e o metanol), isto acabou caracterizando o consumo da resina UF como uma atividade impactante também às categorias de potencial de aquecimento global, depleção de recursos abióticos e da camada de ozônio.

O consumo e transporte de cavacos de madeira possuem impactos potenciais às categorias de aquecimento global, ecotoxicidade, toxicidade humana, depleção de recursos abióticos e depleção da camada de ozônio. O uso de compostos químicos no cultivo e manutenção de florestas, bem como, as emissões geradas pela combustão do óleo diesel em máquinas e caminhões são as principais razões para tais categorias de impactos no desempenho ambiental avaliado.

Com base nas atividades identificadas com maiores potenciais de efeitos no desempenho ambiental da produção do painel MDF, formulou-se a proposta de ações de melhoria de desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel MDF.

As ações de melhorias propostas foram expostas, analisadas e discutidas no Capítulo 8, juntamente com a realização de análises sensitivas destas em diferentes cenários. A realização de análises sensitivas de cenários alternativos, que subsidiam a incorporação das propostas de ações de melhoria, responde ao último objetivo específico deste trabalho.

Entre os principais resultados encontrados nesta etapa da pesquisa, estão: a melhora de aproximadamente 30% no total de impactos potenciais de depleção de recursos abióticos e da camada de ozônio, em decorrência da extinção do consumo de gás natural na Planta Térmica II; e a redução de aproximadamente 3% nos impactos de todo o ciclo de vida da produção do painel MDF nas categorias de aquecimento global, ecotoxicidade e toxicidade humana em razão de uma diminuição de 10% no consumo de eletricidade.

Com uma redução de 10% no consumo de resina UF consegue-se, também, uma minimização de aproximadamente 4% nos impactos ambientais totais das categorias de depleção de abióticos e toxicidade humana. Por fim, destaca-se que a redução conjunta de 5% no consumo de madeira e de 20% na distância de fornecedores resulta em uma diminuição de aproximadamente 5% no potencial total de impactos nas categorias de depleção da camada de ozônio, eutrofização, aquecimento global e toxicidade humana, observados ao longo do ciclo de vida da produção do MDF.

De acordo com os resultados gerados pelas análises sensitivas, conclui-se que as ações de melhoria propostas demonstram-se eficazes para a melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel MDF.

O alcance dos objetivos específicos traçados remete a resposta do objetivo geral deste estudo, citado na previamente na introdução deste trabalho e no início deste capítulo. Os resultados e as conclusões obtidas também respondem a pergunta problema deste estudo: Quais ações se mostram efetivas para a melhora do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida de produção do painel MDF mediante a aplicação da ACV?

De acordo com os resultados alcançados neste trabalho, afirma-se que as ações que se mostraram efetivas para melhoria do desempenho ambiental associado ao ciclo de vida da produção do painel MDF compreendem: a extinção do consumo de gás natural na Planta Térmica II, redução proporcional de combustíveis de madeira que não receberam tratamento químico prévio, realização de análise

especializada para verificação de eficiência de combustão na Planta Térmica I, redução do consumo de energia elétrica, redução no consumo da resina UF, redução no consumo de madeira e a minimização de distância entre fornecedores de cavaco e indústria.

A abordagem interativa, o alto grau de detalhamento e profundidade no tratamento de informações ambientais, e a característica exclusiva de gestão baseada no ciclo de vida, fazem da ACV uma ferramenta eficaz para formulação de ações de melhoria de desempenho ambiental.

As ações de melhorias propostas neste trabalho basearam-se em aspectos e impactos associados às diferentes fases do ciclo de vida do painel MDF, passando por todos os elos da cadeia produtiva, não se limitando somente ao processo produtivo ou a uma única atividade operativa. Tais características subsidiam a tomada de decisão sustentável nos mais variados campos da Engenharia de Produção, acarretando ganhos nas esferas acadêmicas, empresariais e sociais.

Na esfera acadêmica, este estudo coopera no direcionamento de pesquisas científicas em temas que apresentaram destaque no desempenho ambiental observado ao longo do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. Neste contexto, destacam-se a cadeia produtiva e consumo de resina UF, o uso do gás natural para geração de energia térmica na indústria, e o desenvolvimento de ICVs nacionais para a promoção da ACV no Brasil.

Na esfera empresarial, em especial no setor de painéis de madeira MDF, os resultados revelados neste estudo podem ser utilizados como base à tomada de decisão no universo de outras indústrias produtoras de MDF no Brasil. A indústria pesquisada enquadra-se em cenário de destaque nacional, seu processo de produção, seu estado da arte tecnológico e os insumos consumidos são similares às demais indústrias nacionais produtoras de MDF. Portanto, os *hotspots* identificados neste estudo podem ser assumidos como generalizados ao setor nacional de fabricação de painéis de madeira MDF.

Por fim, a promoção da melhora ambiental na produção do painel de madeira MDF acarreta em ganhos consequenciais para a sociedade. A diminuição de impactos ambientais, em especial os associados à toxicidade humana, geram benefícios à saúde humana, aos recursos necessários à vida e garantem condições favoráveis para futuras gerações atenderem suas próprias necessidades.

8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No decorrer do desenvolvimento deste estudo foram identificadas algumas oportunidades para o desenvolvimento de futuras pesquisas relacionadas ao tema deste trabalho. Entre elas se destacam:

- Ampliar a aplicação da pesquisa em outras unidades produtoras do painel de madeira MDF no Brasil, a fim de retratar uma realidade precisa a nível nacional para a ACV do painel;
- Comparar a produção do painel MDF deste estudo com outros estudos de ACV já realizados no exterior (EUA, Canadá e Europa, como observados no Capítulo 3). Considerando as limitações, suposições e considerações tomadas em cada estudo, podem-se avaliar os pontos positivos e negativos da produção do painel MDF nas condições da cadeia produtiva brasileira perante o contexto do exterior;
- Comparar os resultados obtidos na ACV deste estudo com a ACV do painel MDP produzido no Brasil, realizada por Silva (2012). Para isto, devem-se considerar as limitações, suposições e considerações específicas de cada estudo;
- Desenvolver estudos baseados na ACV de outros painéis de madeira ainda não desenvolvidos no Brasil, tais como o HDF e o OSB;
- Incluir as fases do ciclo de vida do painel de madeira MDF posteriores a etapa industrial, ou seja, avaliar o ciclo de vida nas fronteiras *cradle-to-grave* e identificar os *hotspots* nesta abordagem do ciclo de vida do painel MDF;
- Realizar a ACV do painel MDF utilizando outros métodos de avaliação de impacto, com abordagem *endpoint*. Apesar de ser uma prática não comum em estudos de ACV de painéis de madeira, a utilização de métodos de AICV com abordagem *endpoint* permite uma análise final em categorias de danos, em indicadores únicos, possibilitando verificar resultados em outras categorias de impactos não abordadas neste trabalho;
- Realizar pesquisas e estudos de ICV e ACV de resinas UF e resinas alternativas que não possuam composição baseada em ureia formaldeído. A avaliação dos efeitos técnicos e ambientais da substituição da resina UF, ou até mesmo do uso de resinas UF com razões molares menores (o que acarreta em menor emissão de formaldeído livre), são de interesse das indústrias produtoras de painéis de madeira.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA – ABIPA. 2012a. **Números**. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br/numeros.php>>. Acesso em: 13 Nov. 2012.

_____. 2012b. **Nossos produtos**. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br/produtosMDF.php>>. Acesso em: 13 Nov. 2012.

_____. 2012c. **Nossas unidades industriais**. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br/industrias.php>>. Acesso em: 13 Nov. 2012.

_____. 2012d. **Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br/deOlhoNoMercado.php>>. Acesso em: 13 Nov. 2012.

ABRAF. **Anuário Estatístico da ABRAF 2012**: Ano base 2011. Brasília: ABRAF, 2012.

ALVARENGA, R. A. F. **Avaliação de métodos de AICV**: Um estudo de caso de quatro cenários de ração para frangos de corte. 2010. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Departamento de Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

ANDRADE, J. N.; NETO, J. A. A.; PIRES, M. M. Avaliação de ferramentas computacionais para análise de ciclo de vida. In: Seminário de iniciação científica, 11., 2005, Santa Catarina. **Anais...** Santa Catarina: UESC, 2005. IN: RODRIGUES, S. C. **Análise do processo de fabricação do compósito ecowood**: estudo de caso de reciclagem. 2009. 111f. Dissertação. (Mestrado em Tecnologia) - Centro Federal de Educação Tecnológica CEFET/RJ - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14001**: Sistemas de Gestão Ambiental - Requisitos com orientações de uso. Brasil, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações**. Brasil, 2009b.

ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE. **A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Medium Density Fibreboard (MDF)**. Ottawa, On, 2009.

BARE, J. C.; HOFSTETTER, P.; PENNINGTON, D. W.; DE HAES, H. A.U. Life cycle impact assessment midpoints vs. endpoints: the sacrifices and the benefits. **International Journal of Life Cycle Assessment** , v.5, n.5, 2000.

BARE J. C.; NORRIS, G. A.; PENNINGTON D. W.; MCKONE, T. TRACI, The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. **Journal of Industrial Ecology**, v. 6, n. 3–4, 2003.

BENETTO, E.; BECKER, M.; WELFRING, J. Life Cycle Assessment of Oriented Strand Boards (OSB): from Process Innovation to Ecodesign. **Environmental Science & Technology**, Iowa City, v. 43, n. 15, p.6003-6009, 2009.

BERTHOUD, A. et al. Assessing freshwater ecotoxicity of agricultural products in life cycle assessment (LCA): a case study of wheat using French agricultural practices databases and USEtox model. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n.8, 2011.

BLENGINI, G. A. et al. Life Cycle Assessment guidelines for the sustainable production and recycling of aggregates: the Sustainable Aggregates Resource Management project (SARMa). **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 27, p.177-181, 2012.

_____. Life Cycle Assessment guidelines for the sustainable production and recycling of aggregates: the Sustainable Aggregates Resource Management project (SARMa). **Journal Of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 27, p.177-181, 2012.

BNDES SETORIAL. **Painéis de Madeira no Brasil: Panorama e Perspectivas**. 27. ed. Rio de Janeiro, 2008. p. 121-156. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2706.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2012.

BNDES SETORIAL. **Panorama de mercado: painéis de madeira**. 32. ed. Rio de Janeiro, 2010. p. 49-90. Disponível em:

<http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set32102.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2012.

BONTON, A. et al. Comparative life cycle assessment of water treatment plants. **Desalination**, London, v. 284, p.42-54, 2012.

BRAND G.; BRAUNSCHWEIG A.; SCHEIDEGGER A.; SCHWANK O. **Bewertung in Oekobilanzen mit der Methode der ökologischen Knappheit Oekofaktoren 1997**. BUWAL Schriftenreihe Umwelt Nr. 297. BUWAL, Bern, 1998.

CAMBRIA, D.; PIERANGELI, D. Application of a life cycle assessment to walnut tree high quality wood production: a case study in southern Italy. **Journal Of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 23, p.37-46, 2012.

CARVALHO, P. S. G. **Estudo aplicado de ACV a sistema de refrigeração por absorção e por compressão de vapor de amônia**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Energia de Fluidos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3150/tde-19012011-160051/>>. Acesso em: 02 mai. 2012.

CAVALETT, O.; CHAGASM, M. F.; SEABRA, J. E. A.; BONOMI, A. Comparative LCA of ethanol versus gasoline in Brazil using different LCIA methods. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 2012 [in press].

CCI. **ILCD Handbook**: analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment, 2010. Disponível em: <<http://ict.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2012.

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do ciclo de vida de produtos**: Ferramenta gerencial da ISO 14.000. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998.

CHIPANSKI, E. R. Proposição para melhoria de desempenho ambiental da indústria de aglomerado no Brasil. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

COSTA, M. S. V. **O enfoque de ciclo de vida como estratégia para a gestão sustentável: um estudo de caso sobre pneus**. 2007. 158f. Dissertação (Mestrado

em Ciências em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ECOINVENT - SWISS CENTRE FOR LIFE CYCLE INVENTORIES (Suíça).

Development towards ecoinvent v3. Disponível em:

<<http://www.ecoinvent.org/ecoinvent-v3/>>. Acesso em: 14 jun. 2012.

ECOINVENT. **Ammonium sulphate, as N, at regional storehouse [RER]**. Software Umberto and Ecoinvent v.2.2 Database for life cycle assessment. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, 2010a.

_____. **Diesel, burned in building machine [GLO]**. Software Umberto and Ecoinvent v.2.2 Database for life cycle assessment. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, 2010b.

_____. **Ecoinvent data v2.2: the 2010 version of the most comprehensive and most popular public LCI database.** St. Gallen, 2010c

_____. **Electricity mix [BR]**. Software Umberto and Ecoinvent v.2.2 Database for life cycle assessment. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, 2010d.

_____. **Natural gas, high pressure, at consumer [RER]**. Software Umberto and Ecoinvent v.2.2 Database for life cycle assessment. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, 2010e.

_____. **Paraffin, at plant [RER]**. Software Umberto and Ecoinvent v.2.2 Database for life cycle assessment. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, 2010f.

_____. **Transport, lorry 16-32t, EURO3 [RER]**. Software Umberto and Ecoinvent v.2.2 Database for life cycle assessment. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, 2010g.

_____. **Wood chips, hardwood, from industry, u=40%, at plant [RER]**. Software Umberto and Ecoinvent v.2.2 Database for life cycle assessment. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, 2010h.

_____. **Wood chips, softwood, from industry, u=40%, at plant [RER].** Software Umberto and Ecoinvent v.2.2 Database for life cycle assessment. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Dübendorf, 2010i.

ELKINGTON, J. **Cannibals With Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business.** Capstone: New Society, 1997, 407 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) (Brasil). **Balço Energético Nacional 2011:** Ano base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2012. 266 p.

FINNVEDEN, G. et al. Recent developments in Life Cycle Assessment. **Journal of Environmental Management**, London, v. 91, p.1-21, 2009.

FRISCHKNECHT R.; STEINER R.; JUNGBLUTH N. **Methode der ökologischen Knappheit - Ökofaktoren 2006.** Methode für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen. Umwelt-Wissen Nr. 0906, Bundesamt für Umwelt, Bern, 2009.

GARCIA, R. P. **Avaliação comparativa de instrumentos de gestão ambiental do ciclo de vida aplicados a dois sistemas com biomassa:** painéis e eletricidade. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Ciências e

GARRIGUES, E. et al. Soil quality in Life Cycle Assessment: Towards development of an indicator. **Ecological Indicators**, London And New York, v.18, p.434-442, 2012.

GOEDKOOOP M.; HEIJUNGS R.; DE SCHRYVER A.; STRUIJS J.; VAN ZELM R. **ReCiPe 2008:** A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level / Report I: Characterization. Holanda: Ministerie van VROM, Den Haag, 2009.

GOEDKOOOP M.; HOFSTETTER P.; MÜLLER-WENK R.; SPRIENSMA R. The Eco-Indicator 98 Explained. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.3, n. 6, p.352-360, 1998.

GOEDKOOOP M.; SPRIENSMA R. **Methodology Annex - The Eco-indicator 99:** A damage oriented method for life cycle impact assessment. Holanda: PRé Consultants, 2000b.

_____. **The Eco-indicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment.** Holanda: PRé Consultants, 2000a.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S. et al. Combined application of LCA and eco-design for the sustainable production of wood boxes for wine bottles storage. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 16, p.224-237, 2011.

_____. Environmental assessment and improvement alternatives of a ventilated wooden wall from LCA and DfE perspective. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 17, p.432-443, 2012.

_____. Environmental impacts of forest production and supply of pulpwood: Spanish and Swedish case studies. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 14, p.340-353, 2009a.

_____. Environmental performance assessment of hardboard manufacture. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 14, p.456-466, 2009b.

GUINÉE J. B.; et al. **Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards - Characterisation and Normalisation Factors.** Holanda: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), 2001a.

_____. **Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards - Part 3: Scientific Background.** Holanda: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), 2001b.

_____. **Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards - Parts 1 and 2.** Holanda: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment (VROM) and Centre of Environmental Science (CML), 2001c.

_____. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. **Environmental Science & Technology**, Iowa City, v. 45, n. 1, p.90-96, 2011.

HAUSCHILD, M. Z.; et al. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, set. 2012.

HAUSCHILD, M. Z.; POTTING, J. **Spatial differentiation in life cycle impact assessment – The EDIP 2003 methodology**. Guidelines from the danish environmental protection agency. Environmental News, n. 80, Copenhagen, Dinamarca, 2005.

HAUSCHILD, M.; et al. Building a Consensus Model for Life Cycle Impact Assessment of Chemicals: the Search for Harmony and Parsimony. **Environmental Science Technology**, v.42, n.19, 2008.

IDEMAT (Online). **Product Info / Database**. Disponível em: <http://www.idemat.nl/Product/pi_frame.htm>. Acesso em: 18 nov. 2012.

IFU HAMBURG GMBH (Germany). **Funktionen und Features von Umberto®**. Disponível em: <<http://www.Umberto®.de/de/functions/>>. Acesso em: 12 jun. 2012.

INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM (ILCD). **ILCD Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance**. Luxemburgo: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environmental and Sustainability, 1. ed., 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14040: Environmental Management –Life Cycle Assessment – Principles and Framework**. Geneva (Switzerland): European Standard, 2006a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14044: Environmental management – life cycle assessment – Requirements and Guidelines**. Geneva (Switzerland): European Standard, 2006b.

ITSUBO, N., SAKAGAMI, M., WASHIDA, T., KOKUBU, K. AND INABA, A. Weighting Across Safeguard Subjects for LCIA through the Application of Conjoint Analysis. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.9, n.3, 2004.

JEFFERIES, D. et al. Water Footprint and Life Cycle Assessment as approaches to assess potential impacts of products on water consumption: Key learning points from pilot studies on tea and margarine. **Journal Of Cleaner Production**, Amsterdam, p.1-28, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.015>>. Acesso em: 08 maio 2012.

JOLLIET, O. et al. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.8, n.6, p.324-330, 2003.

KEMNA, R., VAN ELBURG, M., LI, W., VAN HOLSTEIN, R. **MEEuP – The methodology Report**. EC, Brussels, 2005.

KLÖPFFER, W. The critical review of life cycle assessment studies according to ISO 14040 and 14044: origin, purpose and practical performance. **The International Journal Of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, p.1-7, 2012. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/content/mk77544m09113412/fulltext.pdf>>. Acesso em: 07 maio 2012.

LÖFGREN, B.; TILLMAN, A.; RINDE, B. Manufacturing actor's LCA. **Journal Of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 19, p.2025-2033, 2011.

LUO, L. et al. Allocation issues in LCA methodology: a case study of corn stover-based fuel ethanol. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 14, p.529-539, 2009.

MATOS, S.; QUELHAS, O. Organizações Humanamente Sustentáveis: Estudo de Caso em Organizações de Base Tecnológica, um Foco na Gestão de Pessoas. **Revista de Gestão Social e Ambiental**. v.2, n.2, p 51-68, 2008.

MONDARDO, M.; FRANK, B. Balanço ambiental de processos como ferramenta de gestão ambiental. In: XX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2000, São Paulo. XX Encontro Nacional de Engenharia da Produção. **Anais...** São Paulo: USP, p. 111-112, 2000.

MYLLYVIITA, Tanja et al. Assessing environmental impacts of biomass production chains: application of life cycle assessment (LCA) and multi-criteria decision analysis (MCDA). **Journal Of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 29-30, p.238-245, 2012.

NUNES, I. S. et al. Estudo do fluxo de materiais e energia na produção de creme base utilizando o software Umberto®: Os potenciais impactos ambientais da produção farmacêutica magistral. In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 30., 2010, São Carlos. **Anais...** São Carlos: Abepro, 2010. p. 1 - 13.

OOTEGHEM, Kevin Van; XU, Lei. The life-cycle assessment of a single-storey retail building in Canada. **Building And Environment**, London, v. 49, p.212-226, 2012.

PASSUELO, A. C. B. **Aplicação da Avaliação do ciclo de vida em embalagens descartáveis para frutas**: estudo de caso. 2007. 148f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

PEREIRA, C. L. F. **Avaliação da Sustentabilidade Ampliada de Produtos Agroindustriais: estudo de caso suco de laranja e etanol**. 2008. 290f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

PIEKARSKI, C. M.; LUZ, L. M.; ZOCHE, L.; FRANCISCO, A. C. Métodos de Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida: Uma discussão para a adoção de métodos nas especificidades brasileiras. **Revista Gestão Industrial**, v. 08, n.3, p.222-240, 2012.

PIZZOL, M.; CHRISTENSEN, P.; SCHMIDT, J. H; THOMSEN, M. Eco-toxicological impact of “metals” on the aquatic and terrestrial ecosystem: a comparison between eight different methodologies for life cycle impact assessment (LCIA). **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p.687–698, 2011.

PRÉ CONSULTANTS (Holanda). **Life Cycle Assessment**. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/content/life-cycle-assessment>>. Acesso em: 17 jun. 2012.

RIBEIRO, P. H. **Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida**: fertilizantes nitrogenados. 343f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

RIVELA, B.; HOSPIDO, A.; MOREIRA, M.T.; FEIJOO, G. Life Cycle inventory of Particleboard: A Case Study in the Wood Sector. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 11, n. 2, p.106-113, 2006.

RIVELA, B.; MOREIRA, M.; FEIJOO, G. Life cycle inventory of medium density fibreboard. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 12, n. 3, p.143-150, 2007.

ROSENBAUM, R. K; et al. USEtox - the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 13, 2008.

SANTOS, M. F. N. **Análise dos Impactos na Construção Civil: Avaliação do Ciclo de Vida em Chapas de Partículas para forros**. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2010

SARAIVA, G. D. I.; LIMA JUNIOR, J. A. T. de; XAVIER, L. S.; PEIXOTO, J. A. A. A metodologia da análise do ciclo de vida, apoiada pelo software Umberto®, como ferramenta de gestão na perspectiva da sustentabilidade: um estudo de caso. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA. 4., Resende. **Anais...** Resende: AEDB, 2007.

SILVA, D. A. L. **Avaliação do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDP no Brasil**. 2012. 207 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SILVA, A. L. R. T. **Desenvolvimento de fatores de normalização de impactos ambientais regionais para avaliação do ciclo de vida de produtos no Estado de São Paulo**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SILVA, G. A.; KULAY, L. A. **Avaliação do ciclo de vida**. In: VILELA JUNIO, A.; DEMAJOROVIC, J. **Modelos de ferramentas de gestão ambiental: desafios e perspectivas para as organizações**. São Paulo: Editora Senac, 2006.

STEEN, B. . **A systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS)**. Version 2000 – General system characteristics. CPM Report 1999:4, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 1999a.

_____. **A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS)**. Version 2000 – Models and data of the default method. CPM Report 1999b, Technical Environmental Planning, Chalmers University of Technology, Sweden. 1999b.

_____. **Identification of significant environmental aspects and their indicators.** NORDEPE, CPM Report Nr 2001:7. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2001.

TOFFOLETTO, C.; BULLE, J.; GODIN, C.; REID L.; DESCHÊNES. LUCAS – A New LCIA Method Used for a Canadian-Specific Context. **International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v.12, n.2, 2007.

TORQUATO, L. P. **Caracterização dos Painéis MDF Comerciais Produzidos no Brasil.** 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal Do Paraná. Curitiba, 2008.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Global Guidance Principles for Life Cycle Assessment Databases:** A Basis for Greener Processes and Products. Paris: United Nations Publication, 2011, 156 p.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Life Cycle Management:** A Business Guide to Sustainability. Paris: United Nations Publication, 2007, 50 p.

WACKERNAGEL, M.; MONFREDA, C.; MORAN, D.; WERMER, P.; GOLDFINGER, S.; DEUMLING, D.; MURRAY, M. **National Footprint and Biocapacity Accounts 2005:** The underlying calculation method. Global Footprint Network, Oakland, California, USA, 2005.

WELZ, T.; HISCHIER, R.; HILTY, L. Environmental impacts of lighting technologies: Life cycle assessment and sensitivity analysis. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 31, p.334-343, 2011.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M. Z.; ALTING, A. **Environmental assessment of products:** Methodology, tools and case studies in product development. Dordrecht: Kluwer Academic, v.1, 1997.

WILSON, J. B. Life-cycle inventory of medium density Fibreboard in terms of resources, emissions, energy and carbon. **Wood And Fiber Science (CORRIM SPECIAL ISSUE)**, USA, p. 107-124, 2010.

WORLD PANEL INDUSTRY. **Products: MDF.** Disponível em: <<http://www.worldpanelindustry.com/mdf>>. Acesso em: 20 jan 2012.

WRAP (WASTE & RESOURCES ACTION PROGRAMME). **Life Cycle Assessment of Closed Loop MDF Recycling: Microrelease Trial**. Glunz, Meppen, Germany, 2009.

YAN, M.J.; HUMPHREYS, J.; HOLDEN, N. M.. An evaluation of life cycle assessment of European milk production. **Journal Of Environmental Management**, London, v.92, p.372-379, 2011.

ZOLDAN, M. A.. **Análise dos Requisitos Organizacionais para a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) De Produtos Madeireiros**. 2008. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Ponta Grossa, 2008.

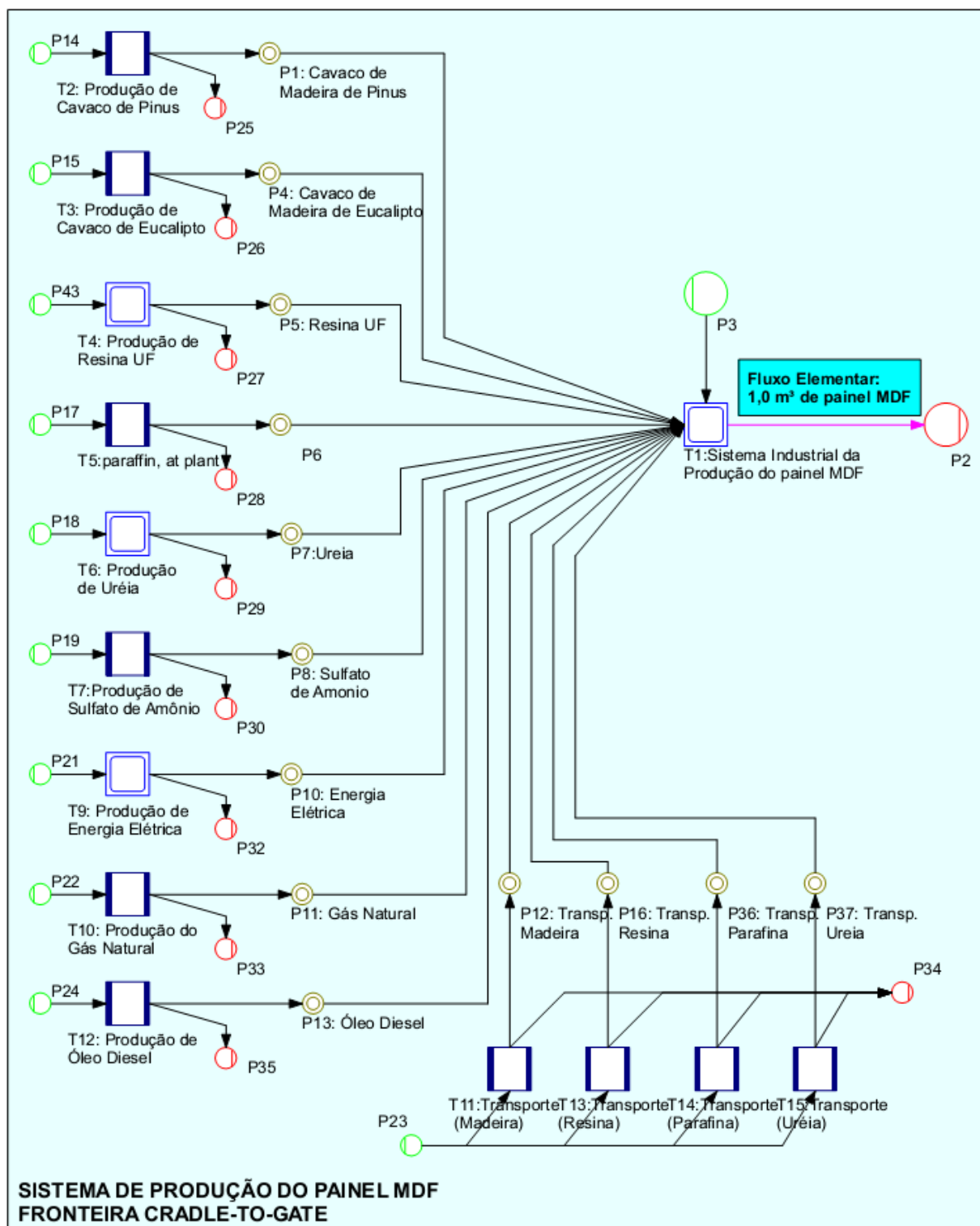
APÊNDICE A - Questionário de Pesquisa

QUESTIONÁRIO PARA ACV DO SISTEMA PRODUTIVO DO PAINEL MDF

| QUESTIONÁRIO 1 (SISTEMA PRODUTIVO "A" - ANO 2010) PARTE A - INFORMAÇÕES GERAIS DA FÁBRICA | | | | |
|--|--|---------------------------|----------------------------|-------------|
| Seção A.1: Questões Básicas | | | | |
| 1 | Por favor, complete as seguintes informações: | | | |
| | Nome da Empresa: _____ | | | |
| | Nome do Gestor: _____ | | | |
| | Cargo do Gestor: _____ | | | |
| | Telefone: _____ | | | |
| | E-mail: _____ | | | |
| 2 | Quantos dias a empresa operou durante o ano de 2010? _____ | | | |
| 3 | Qual foi a Produção total anual para o ano de 2010? _____ m ³ de MDF | | | |
| 4 | Na linha abaixo informe o valor mínimo, máximo e médio de espessura do MDF produzido no ano de 2010: | | | |
| | Espessura Mínima: _____ mm | Espessura Média: _____ mm | Espessura Máxima: _____ mm | |
| 5 | Qual é a densidade média estimada dos painéis? _____ kg/m ³ | | | |
| 6 | Qual é o período da coleta de dados? _____ | | | |
| 7 | Qual foi o total de Energia Elétrica consumida no ano de 2010? _____ | | | |
| 8 | Qual foi o total de Gás Natural consumido no ano de 2010? _____ | | | |
| 9 | Qual foi o total de Água consumida no ano de 2010? Quais eram as fontes? _____ | | | |
| PARTE B - SISTEMA PRODUTIVO "A" DO MDF | | | | |
| <p>A Parte B do questionário divide-se em 5 seções:</p> <ul style="list-style-type: none"> B.1. Diagrama de fluxo de processos elementares da Produção MDF B.2. Dados do Processo Elementar B.3. Dados para Análise de Inventário de Ciclo de Vida B.4. Dados para transporte a montante do Processo B.5. Dados para transporte interno | | | | |
| Seção B.1: Diagrama de fluxo de processos elementares da Produção MDF | | | | |
| <p>Esta parte do questionário é baseado no fluxo genérico de processos elementares do processo produtivo do painel MDF no ano de 2010. A figura abaixo ilustra o limite de fronteira do sistema de produção MDF.</p> | | | | |
| | | | | |
| | | SIM | NÃO | Comentários |
| 1. | A figura acima retrata a realidade em relação ao seu processo produtivo? | | | |
| 2. | Há algum outro processo elementar do sistema que não está ilustrado no diagrama acima? | | | |

| Seção B.2: Dados do Processo Elementar | | | | |
|--|--|----------------------------|--|-------------------------|
| Esta seção compreende as informações relativas a cada processo elementar citado na figura da seção B.1. Preencha uma tabela de dados para cada processo elementar de maneira mais completa possível e específica possível, garantindo a confiabilidade e qualidade do estudo. | | | | |
| Tabela de Dados de Processo Elementar | | | | |
| Preenchido por: | | Data do preenchimento: | | |
| Identificação do processo elementar: | | Local de Origem dos Dados: | | |
| Período de Tempo (ano): | | Mês de Início: | Mês de Término: | |
| Descrição do Processo Elementar: (pode-se anexar folhas adicionais, se necessário) | | | | |
| Entrada de material | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem | Origem |
| | | | | |
| Consumo de Água ^a | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem | Origem |
| | | | | |
| Entradas de Energia ^b | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem | Origem |
| | | | | |
| Saída de material (incluindo produtos) | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem | Origem |
| | | | | |
| NOTA Os dados nesta folha de coleta de dados referem-se a todas as entradas e saídas coletadas durante o período de tempo especificado, antes de possíveis alocações. | | | | |
| ^a Por exemplo água superficial, água potável. | | | | |
| ^b Por exemplo, óleo combustível pesado, óleo combustível médio, óleo combustível leve, querosene, gasolina, gás natural, propano, carvão, biomassa, eletricidade da rede. | | | | |
| Seção B.3: Dados para Análise de Inventário de Ciclo de Vida | | | | |
| O questionário abaixo permite a análise de Inventário do Ciclo de Vida. É necessário informar os dados para todos os processos elementares existentes no diagrama da seção B.1. | | | | |
| Identificação de Processo Elementar: | | Local de Origem dos Dados: | | |
| Emissões atmosféricas ^a | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem (anexar folhas, se necessário) | |
| | | | | |
| Liberações para Água ^b | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem (anexar folhas, se necessário) | |
| | | | | |
| Liberações para o solo ^c | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem (anexar folhas, se necessário) | |
| | | | | |
| Outras Liberações ^d | Unidade | Quantidade | Descrição dos procedimentos de amostragem (anexar folhas, se necessário) | |
| | | | | |
| Descrever quaisquer cálculos específicos, coleta de dados, amostragem ou variação da descrição das funções do processo elementar (anexar folhas, se necessário). | | | | |
| ^a Por exemplo, inorgânicos: Cl ₂ , CO, CO ₂ , poeira/particulado, F ₂ , H ₂ S, H ₂ SO ₄ , HCl, HF, N ₂ O, NH ₃ , NOx, SOx; orgânicos: hidrocarbonetos, PCB, dioxinas, fenóis; metais: Hg, Pb, Cr, Fe, Zn, Ni. | | | | |
| ^b Por exemplo: DBO, DQO, ácidos, Cl ₂ , CN ₂ -, detergentes/óleos, compostos orgânicos dissolvidos, F-, íons de Fe, íons de Hg, hidrocarbonetos, Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , organoclorados, outros metais, outros compostos de nitrogênio, fenóis, fosfatos, SO ₄ ²⁻ , sólidos em suspensão. | | | | |
| ^c Por exemplo: resíduos minerais, resíduo industrial misto, resíduos sólidos urbanos, resíduos tóxicos (por favor listar os compostos incluídos nesta categoria de dados). | | | | |
| ^d Por exemplo: ruído, radiação, vibração, odor, calor perdido. | | | | |
| Seção B.4: Dados para transporte a montante do Processo | | | | |
| Este questionário permite analisar os dados referentes a transporte de produtos. O questionário abaixo refere-se ao transporte rodoviário. Caso exista o modal ferroviário ou aquático o padrão segue o mesmo. | | | | |
| Nome do produto intermediário | | Transporte rodoviário | | |
| | Distância Km | Capacidade do Caminhão | Carga Real (toneladas) | Retorno Vazio (Sim/Não) |
| | | | | |
| Seção B.5: Dados para transporte interno | | | | |
| Nesta seção é inventariado o transporte interno em uma instalação para cada processo elementar descrito na seção B.1. Os valores são coletados durante um período específico de tempo e mostram as quantidades reais de combustível utilizadas. | | | | |
| Combustível | Quantidade total de entrada transportada | | Consumo total de combustível | |
| | Óleo Diesel | | | |
| | Gasolina | | | |
| | GLP | | | |

APÊNDICE B – Modelagem do sistema de produção do painel de madeira MDF realizado no *software* Umberto® (*cradle-to-gate*)



* Os subsistemas representados pelas transições T1, T4, T6 e T9, foram modelados através de subredes apresentadas na página seguinte

Figura 32 - Modelagem sistema de produção do painel MDF, fronteira *cradle-to-gate*

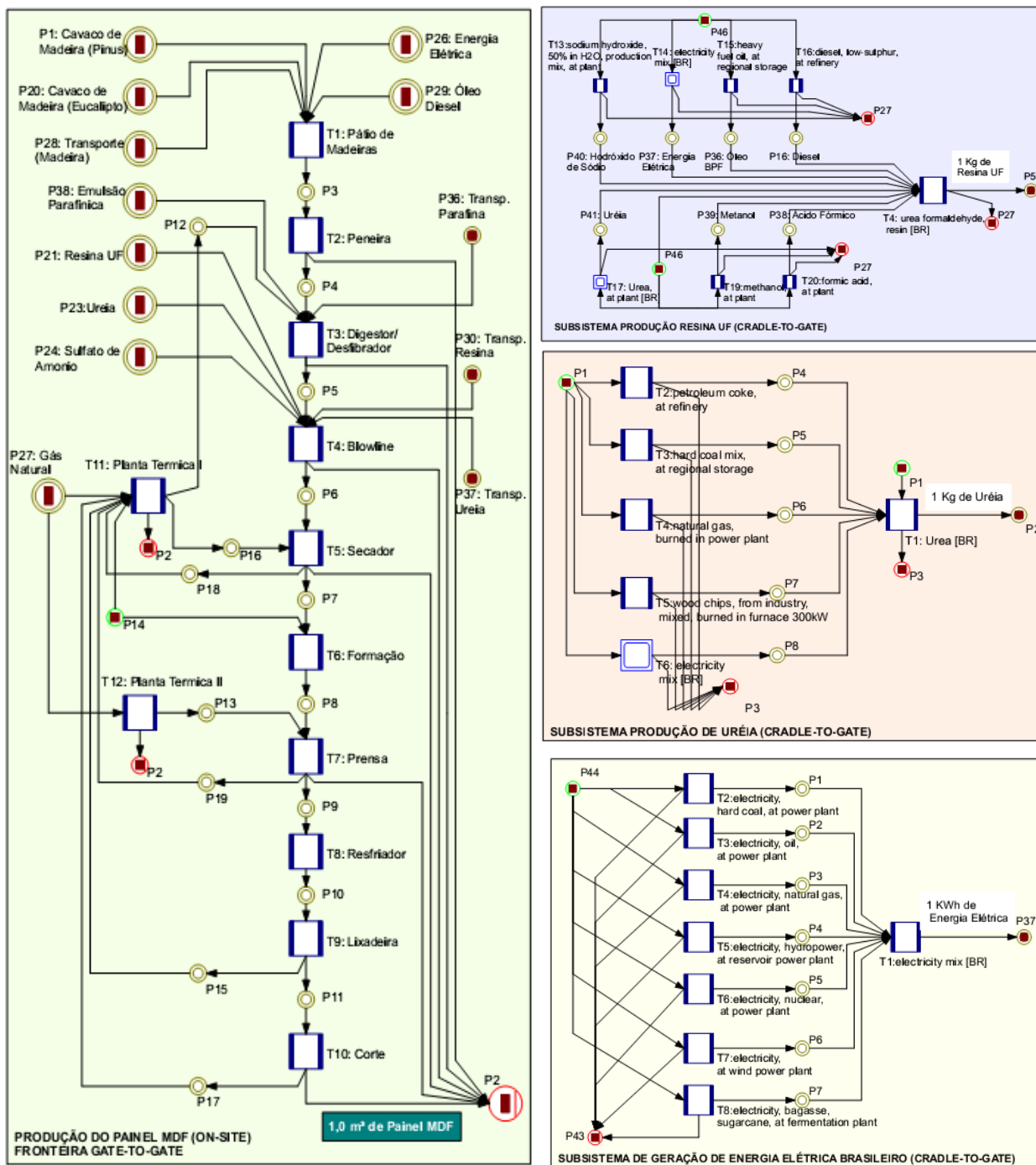


Figura 33 – Modelagem dos subsistemas sistema de produção do painel MDF, fronteira *cradle-to-gate*