

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

CASSIANO MORO PIEKARSKI

**MODELO MULTICRITÉRIO PARA APOIO À TOMADA DE DECISÃO
BASEADO EM AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E INDICADORES
CORPORATIVOS**

TESE

PONTA GROSSA

2015

CASSIANO MORO PIEKARSKI

**MODELO MULTICRITÉRIO PARA APOIO À TOMADA DE DECISÃO
BASEADO EM AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA E INDICADORES
CORPORATIVOS**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco

Coorientador: Prof. Dr. Daniel Poletto Tesser

PONTA GROSSA

2015

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca da UTFPR
Câmpus Ponta Grossa.
n. 25/2015

P618 Piekarski, Cassiano Moro

Modelo multicritério para apoio à tomada de decisão baseado em avaliação do ciclo de vida e indicadores corporativos. / Cassiano Moro Piekarski. -- Ponta Grossa, 2015. 146f. : il. 30 com.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco
Coorientador: Prof. Dr. Daniel Poletto Tesser

Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

1. Ciclo de vida do produto. 2. Impacto ambiental - Avaliação. 3. Processo decisório por critério múltiplo. 4. Sistemas de suporte de decisão. 5. Madeira - Produtos. I. Francisco, Antonio Carlos de. II. Tesser, Daniel Poletto. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 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 Tese Nº 1/2015

MODELO MULTICRITÉRIO PARA APOIO À TOMADA DE DECISÃO BASEADO EM
AValiação DO CICLO DE VIDA E INDICADORES CORPORATIVOS

por

Cassiano Moro Piekarski

Esta tese foi apresentada às **10h00min de 24 de abril de 2015** como requisito parcial para a obtenção do título de DOUTOR 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. Rogério de Aragão Bastos do Valle
(UFRJ)

Prof. Dr. Luiz Antonio Brandalise (UEPG)

Prof. Dr. João Luiz Kovaleski (UTFPR)

Prof. Dr. Daniel Poletto Tesser (UTFPR) -
Coorientador

Prof. Dr. Flavio Trojan (UTFPR)

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

Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco (UTFPR)
Coordenador do PPGEP

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

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas bênçãos, inspirações e forças a mim concedidas;

À minha esposa, por todo apoio, amor e compreensão;

Aos meus pais, por toda orientação, amor e educação;

Às minhas irmãs, pela compreensão e carinho;

À minha família e amigos, pelo apoio e por compartilhar grandes momentos;

Ao meu orientador, pelas oportunidades, amizade e orientações;

Ao meu coorientador, pela disponibilidade, diálogos e orientações;

Aos professores participantes das bancas de qualificação e defesa da tese, pela disponibilidade e críticas construtivas;

À empresa que colaborou com o fornecimento de dados e acesso à pesquisa que sustentaram este trabalho. Em especial, aos gestores que estiveram à frente deste projeto, pelo interesse, colaboração e prestabilidade;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, incluindo docentes, servidores, alunos e colaboradores;

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelos recursos, estrutura e excelência destes últimos oito anos, entre a graduação, mestrado e doutorado em Engenharia de Produção.

RESUMO

PIEKARSKI, Cassiano Moro. **Modelo multicritério para apoio à tomada de decisão baseado em avaliação do ciclo de vida e indicadores corporativos.** 2015. 146f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

O uso da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) permite identificar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental, gerar aprendizagem sobre produtos e processos e apoiar decisões para alcançar vantagens competitivas. O processo de tomada de decisão baseado nos resultados da ACV envolve, além dos aspectos e impactos ambientais, outros critérios importantes para um processo decisório. Neste sentido, esta tese objetivou desenvolver um modelo multicritério para apoio à decisão baseado em avaliação de ciclo de vida e indicadores corporativos. O modelo desenvolvido possui caráter interativo, pode ser generalizado e foi validado utilizando dados de diferentes cenários do ciclo de vida da produção do painel MDF. O modelo avalia par a par as opções de cenários distintos e identifica a opção mais atrativa de acordo com um índice final. O índice final é composto por dimensões específicas, subdimensões e indicadores. A dimensão ambiental do modelo é baseada em ACV, a qual foi modelada no *software* Umberto e utilizou a base de dados Eco-Invent 2.2. Para a estrutura decisória do modelo e a construção de escalas cardinais foi utilizado o método MACBETH, através do *software* M-MACBETH. A validação do modelo ocorreu por meio da avaliação de três situações decisórias da produção do painel MDF (variações no processo produtivo, variações em parâmetros de processo e variações em espessura do produto). Os resultados apresentados contribuíram para avanços acadêmicos em construções de modelos de apoio à decisão baseados em ACV e multicritérios. Permitiram, ainda, interpretar e gerar aprendizados acerca do processo produtivo, do ciclo de vida do produto e da gestão da produção da indústria pesquisada. Neste sentido, concluiu-se que o modelo mostrou-se apto para apoiar e gerar aprendizagem em processos decisórios multicritérios baseados em ACV e em outros indicadores corporativos.

Palavras-chave: Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Avaliação de Desempenho Ambiental. Decisão multicritério. Modelo de apoio à decisão. Painel de madeira MDF.

ABSTRACT

PIEKARSKI, Cassiano Moro. **Multi-criteria model to support decision-making based on life cycle assessment and corporate indicators**. 2015. 146f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2015.

Life Cycle Assessment (LCA) allows identify opportunities to improve environmental performance, providing knowledge about products and processes and supporting decision-making in order to achieve advantages. Decision-making based on LCA results involves, in addition to the environmental aspects and impacts, others important criteria. In this sense, this thesis aimed to develop a multi-criteria model for decision-making based on life cycle assessment and corporate indicators. The model developed has interactive nature and can be generalized. The model was validated using data for different scenarios of MDF panel production life cycle. The pairwise model evaluates the options for different scenarios and identifies the most attractive option in accordance with a final index. The final index is composed of specific, sub-dimensions and indicators. The environmental dimension is based on an LCA, which was modeled in Umberto *software* and used Eco-Invent 2.2 as database. For the model structure and construction of cardinal scale was used MACBETH method using M-MACBETH *software*. The model validation was made by evaluation of three decision-making scenarios in MDF panel production (changes in production processes, changes in process parameters and changes in product thickness variations). The results allowed to reach academic advances in order to support decision models structures based on LCA and multi-criteria. The results allowed interpreting and generating knowledge about production process, product life cycle and industrial management. In this sense, it is concluded that the model is able to support and generate knowledge on decision-making processes based on LCA and other corporate indicators.

Keywords: Life Cycle Assessment (LCA). Environmental Performance Assessment. Multi-criteria decision. Decision support model. Wood-based panel (MDF).

LISTA DE SIGLAS

ABCV	Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Inventário de Ciclo de Vida
AHP	Análise Hierárquica de Processos
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BRL	Real Brasileiro
C1	Cenário 1
C2	Cenário 2
CC	<i>Climate Change</i> (Mudança Climática)
CML	<i>Center for Environmental Science</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
FC	Fator de Caracterização
HDF	<i>High Density Fibreboard</i>
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IR	Indicador de Resultado
LCA	Life Cycle Assessment
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MAUT	<i>Multi-Attribute Utility Theory</i>
MAVT	<i>Multi-Attribute Value Theory</i>
MCDA	<i>Multi-criteria Decision Analysis</i>
MCDA-C	<i>Multi-criteria Decision Analysis (Constructivist)</i>
MDP	<i>Medium Density Particleboard</i>
NBR	Norma Brasileira Registrada
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PAF	<i>Potentially Affected Fraction of Species</i>
PBACV	Programa Brasileiro em Avaliação do Ciclo de Vida
PMVA	Produtos de Maior Valor Agregado
QIA	Qualidade Interna do Ar
RUF	Resina Ureia Formaldeído
SDF	<i>Super Density Fiberboard</i>
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
EBITDA	<i>Earning before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization</i>
IfEU	Instituto de Pesquisa Ambiental e Energética de Heidelberg
IFAT	Índice de Frequência de Acidente de Trabalho
ISAT	Índice de Severidade de Acidente de Trabalho
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MACBETH	Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique
NOx	Óxidos de Nitrogênio
SETAC	<i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>
SOx	Óxidos de Enxofre
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
WRAP	<i>Waste & Resources Action Programme</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma dos passos delineados para a condução da tese	20
Figura 2 - Segmentos da indústria de processamento da madeira	22
Figura 3 - Painel de Madeira MDF	28
Figura 4 – As fases da ACV, seus relacionamentos e aplicações diretas	31
Figura 5 - Procedimentos simplificados para a análise de inventário	34
Figura 6 - Elementos da fase de AICV	38
Figura 7 - Relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV	46
Figura 8 - Representação de componentes da modelagem do Umberto	51
Figura 9 – Caminhos ilustrativos de impactos na ACV.....	54
Figura 10 - Matriz de julgamento consistente.....	66
Figura 11 - Violação das relações da ordem entre diferenças de atratividade	68
Figura 12 - Estrutura metodológica para desenvolvimento do modelo.....	70
Figura 13 - Estrutura preliminar genérica do modelo	74
Figura 14 - Sistema de produto de referência e fronteiras definidas para a produção do MDF	76
Figura 15 – Escala genérica de representação de resultados	85
Figura 16 – Propriedades do Indicador Custos Fixos.....	87
Figura 17 - Matriz de julgamento para indicador de custo fixo no M-MACBETH.....	87
Figura 18 - Matriz de julgamento para indicador de custo fixo no M-MACBETH.....	88
Figura 19 - Estrutura decisória final do modelo multicritério construído	92
Figura 20 - Normalização e função de valor para dimensão ambiental.....	103
Figura 21 - Matrizes de julgamento e escalas MACBETH para indicadores da dimensão econômica	104
Figura 22 - Matrizes de julgamento e escalas MACBETH para indicadores da dimensão social.....	105
Figura 23 - Matrizes de julgamento e escalas MACBETH para indicadores da dimensão técnica	106
Figura 24 - Identificação de taxas de substituições no modelo multicritério	107
Figura 25 - Resultados do modelo multicritério para análise decisória 1	109
Figura 26 - Resultados do modelo multicritério para análise decisória 2	111
Figura 27 - Resultados do modelo multicritério para análise decisória 3	113
Figura 28 – Folha para Coleta para ACV do sistema produtivo do painel MDF	135
Figura 29 – Folha para Coleta dos Dados Alimentadores do Modelo Desenvolvido	137
Figura 30 - Modelagem sistema de produção do painel MDF, fronteira <i>cradle-to-gate</i>	143
Figura 31 – Modelagem dos subsistemas sistema de produção do painel MDF, fronteira <i>cradle-to-gate</i>	144

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Histórico da Produção, Exportação e Importação de painéis de madeira no Brasil	25
Gráfico 2 – Evolução na produção de painéis de madeira MDF no mundo	28

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Categorização, Características e Aplicações dos principais painéis de madeira	24
Quadro 2 - Principais categorias de impactos e modelos de caracterização para ACV	39
Quadro 3 - Objetivos das Etapas da fase de interpretação da ACV	47
Quadro 4 - Principais <i>softwares</i> para ACV	49
Quadro 5 –Abordagens e métodos para AICV	56
Quadro 6 – Princípios Gerais dos principais métodos <i>endpoint</i>	59
Quadro 7 - Considerações sobre sistemas incluídos e excluídos da ACV do painel MDF	77
Quadro 8 – Descrição de Indicadores derivados da qualidade de ecossistema	95
Quadro 9 - Descrição de Indicadores derivados da saúde humana.....	96
Quadro 10 - Descrição de Indicadores derivados da depleção de recursos	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da Avaliação de Impactos para cenários de referência	102
Tabela 2 - Resumo dos dados coletados na pesquisa por cenários	139
Tabela 3 – Dados para ICV de resinas ureia-formaldeído de razões molares diferentes.....	141
Tabela 4 - Resultados obtidos na AICV para os cenários analisados na validação do modelo, funções de valores e normalização	146

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS DA TESE.....	16
1.1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	17
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	20
2 CARACTERIZAÇÃO E ASPECTOS DA PRODUÇÃO DO MDF	21
2.1 VISÃO GERAL DE PAINÉIS DE MADEIRA.....	21
2.2 PAINEL DE MADEIRA DE FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE (MDF).....	27
3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	30
3.1 METODOLOGIA DA ACV	30
3.1.1 Definição de Objetivo e Escopo	31
3.1.2 Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)	34
3.1.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	37
3.1.4 Interpretação.....	45
4 FERRAMENTAS PARA ACV, BASES DE DADOS E MÉTODOS DE AICV.....	49
4.1 O SOFTWARE UMBERTO	50
4.2 BASE DE DADOS DE ICV E O ECOINVENT.....	52
4.3 MÉTODOS PARA AICV	53
4.3.1 Métodos com abordagem endpoint.....	58
5 ACV E A PERSPECTIVA MULTICRITÉRIO PARA DECISÕES	61
5.1 MÉTODO MULTICRITÉRIO: MACBETH.....	64
6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	70
6.1 PRÉ-EXPERIMENTAÇÃO	71
6.1.1 Aplicação da pesquisa	71
6.1.2 Definição dos atores envolvidos	71
6.1.3 Estrutura preliminar genérica e os objetivos do modelo	72
6.1.4 Definições elementares para a condução de ACV.....	75
6.1.5 Definição do método multicritério de apoio à decisão.....	79
6.1.6 Construção da estrutura criterial, definição dos dados alimentadores e folha de coletas de dados para o modelo	80
6.1.7 Definição dos cenários analisados para validação do modelo.....	81
6.2 EXPERIMENTAÇÃO.....	83
6.2.1 Coleta dos dados.....	83
6.2.2 Análise de consistência dos dados.....	84
6.2.3 Definição de escalas e taxas de substituição	84
6.3 PÓS-EXPERIMENTAÇÃO	89
6.3.1 Validação do modelo	89
6.3.2 Interpretações e aprendizagens obtidas	90

7 RESULTADOS	91
7.1 ESTRUTURA DECISÓRIA FINAL DO MODELO	91
7.2 DESCRITORES DO MODELO MULTICRITÉRIO E TAXAS DE SUBSTITUIÇÃO	93
7.2.1 Índice Final.....	93
7.2.2 Dimensão Ambiental.....	94
7.2.2.1 Qualidade de Ecossistema	95
7.2.2.2 Saúde Humana	96
7.2.2.3 Depleção de Recursos.....	97
7.2.3 Dimensão Social.....	97
7.2.4 Dimensão Econômica	98
7.2.5 Dimensão Técnica	99
7.3 NORMALIZAÇÕES, ESCALAS MACBETH E TAXAS DE SUBSTITUIÇÃO.....	101
7.3.1 Valores de referência e normalização de indicadores da dimensão ambiental	101
7.3.2 Valores de referência, escala MACBETH e taxas de substituição da dimensão econômica	103
7.3.3 Valores de referência, escala MACBETH e taxas de substituição da dimensão social	104
7.3.4 Valores de referência, escala MACBETH e taxas de substituição da dimensão técnica	105
7.3.5 Taxas de substituição para composição do índice final	107
7.4 VALIDAÇÃO DO MODELO, INTERPRETAÇÃO DE CENÁRIOS E APRENDIZAGENS OBTIDAS	108
7.4.1 Principais aprendizagens científicas obtidas no desenvolvimento e validação do modelo	115
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
8.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	120
REFERÊNCIAS.....	121
APÊNDICE A - Folha de Coletas de Dados para ACV de painel MDF	133
APÊNDICE B - Folha para Coleta dos Dados Alimentadores do Modelo Desenvolvido	136
APÊNDICE C - Resumo dos dados coletados na pesquisa por cenários	138
APÊNDICE D - Dados relativos ao Inventário do ciclo de vida das Resinas ureia-formaldeído (RUF) com razões molares diferentes	140
APÊNDICE E - Modelagem de ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF no software Umberto.....	142
APÊNDICE F - Resultados obtidos na AICV para os cenários analisados na validação do modelo, funções de valores e normalização.....	145

1 INTRODUÇÃO

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia que quantifica os aspectos e avalia os potenciais impactos ambientais e de saúde humana para um produto, processo ou serviço ao longo de todo seu ciclo de vida. Todos os fluxos de massa e energia são quantificados e avaliados no ciclo de vida, desde a extração das matérias-primas podendo ir até a destinação final de um produto, passando por todos os elos da cadeia produtiva.

Ao se referir à avaliação de impactos ambientais e de saúde humana, a ACV tem ganhado uma atenção notável perante todas as diversas ferramentas existentes (WANG, CHAN e LI, 2015). A ACV pode ser caracterizada como a metodologia mais importante na gestão ambiental industrial moderna (LÖFGREN, TILLMAN E RINDE, 2011). A afirmação se justifica pela unicidade da ACV em identificar e quantificar impactos ambientais e analisar quais fases, dentro de todo o ciclo de vida do produto, possuem impactos ambientais mais consideráveis (CAMBRIA E PIERANGELI, 2012).

Neste âmbito, a ACV é uma metodologia utilizada, principalmente, por universidades e institutos de pesquisa, porém é uma fonte de oportunidades de negócios que vem crescendo tanto na área de prestação de serviços, quanto na indústria. No Brasil, apesar da metodologia ser incipiente quando comparada com países europeus, a comunidade de ACV é representada por 27 grupos e/ou laboratórios de pesquisa, 18 empresas de consultoria e 64 empresas/indústrias que utilizam a ACV como prática corrente de gestão ambiental (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015).

Ainda no Brasil, a disseminação do pensamento do ciclo de vida vem acontecendo, também, através de políticas e ações de entidades governamentais. Entre elas, Cherubini e Ribeiro (2015) destacam: a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que estabelece o conceito de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos; o Guia de Compras Públicas Sustentáveis na esfera Federal, que sugere o uso de rotulagens baseadas em estudos de ACV como comprovação da sustentabilidade em processos de produtos e serviços; e, o Programa Brasileiro em Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV), desenvolvido e incentivado pela Associação Brasileira de Ciclo de Vida (ABCV), pelo Ibict e pelo Inmetro.

Diante de tais ações, programas, pesquisas e políticas públicas, nota-se uma

permeabilidade da ACV como ferramenta estratégica para gestão ambiental e sustentável entre gestores do ambiente empresarial. Neste ambiente corporativo a aplicação da ACV permite identificar oportunidades para melhorar o desempenho ambiental, aumentar o conhecimento de seus processos e gerar informações ambientais para buscar vantagens competitivas em seus produtos e serviços, e incrementar a imagem corporativa (CHERUBINI; RIBEIRO, 2015)

O fato é que as ações para a melhoria do desempenho ambiental em uma empresa se deparam com processos de tomada de decisão e se relacionam com diversos e diferentes indicadores corporativos. Fatores ambientais, econômicos e sociais (que envolvem o *Tripple Bottom Line* da Sustentabilidade), aliados a outros critérios específicos, relacionam-se com a tomada de decisões corporativas (HERVA E ROCA, 2013).

Muitas vezes o incremento no desempenho ambiental de um determinado produto ou processo pode interferir negativamente na competitividade econômica da empresa, ou ainda, em outro indicador corporativo julgado importante pela empresa. Entende-se por indicadores corporativos os valores quantitativos de resultados que uma empresa utiliza para a gestão de seu negócio. Os indicadores corporativos podem referenciar resultados relacionados a produção, qualidade, saúde e segurança do trabalho, custos, etc.

Diante do exposto, nota-se certa dificuldade na utilização dos resultados provenientes da ACV para tomadas de decisão que efetivamente melhorem o desempenho ambiental de um produto ou processo industrial, sem deixar de considerar outros indicadores corporativos singulares (específicos à uma empresa) julgados importantes para a competitividade do negócio.

Neste cenário, definiu-se como problema deste trabalho a seguinte pergunta: **Como utilizar os resultados da ACV conjuntamente a outros indicadores corporativos singulares para apoiar tomadas de decisões em diferentes cenários da produção do painel MDF (*Medium Density Fiberboard*) em uma indústria?**

1.1 OBJETIVOS DA TESE

Decorrente do problema apresentado delinearam-se os objetivos a seguir:

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo multicritério amparado na metodologia de avaliação do ciclo de vida do produto e em indicadores corporativos, a fim de mensurar o desempenho da produção de painéis MDF em diferentes cenários, apoiando, de forma integrada, a tomada de decisões no ambiente industrial pesquisado.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho, que irão compor o objetivo geral, são:

- Modelar o sistema do ciclo de vida do painel MDF pesquisado em um *software* de ACV;
- Identificar o método para Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), com suas respectivas categorias de impacto, que irão compor o modelo;
- Identificar os indicadores corporativos que, junto com os indicadores da AICV, irão compor o modelo;
- Estruturar o modelo;
- Validar o modelo.

1.2 JUSTIFICATIVA

A primeira justificativa cabível para esse estudo é quanto a sua aplicação em uma indústria produtora de painéis de madeira reconstituída. Os painéis de madeira estão presentes no cotidiano de grande parte das pessoas. Basta reparar em ambientes residenciais e comerciais para perceber a popularização na adoção de painéis para os mais diferentes fins: mesas, armários, camas, portas, pisos, paredes, elementos estruturais, objetos decorativos e, em diversos outros produtos do setor de construções.

A crescente utilização dos painéis nas últimas décadas se deu pelo avanço tecnológico do setor e pelas vantagens oferecidas em suas aplicações perante a madeira maciça. De modo geral, as principais vantagens são o alto aproveitamento do material, a homogeneidade do produto, o baixo peso quando comparado com a

madeira maciça e a alta resistência oferecida. De modo específico, diferentes painéis possuem distintas vantagens para determinadas aplicações.

Os mais conhecidos painéis de madeiras são o MDF (*Medium Density Fiberboard*), o MDP (*Medium Density Particleboard*) e o OSB (*Oriented Strand Board*) (SILVA *et al.*, 2013). Cada um possui particularidades técnicas que os diferem quanto as suas concepções e aplicações para um cliente final. As traduções das necessidades dos clientes em requisitos do produto foram responsáveis pela elaboração de diferentes variações dos painéis para atender demandas específicas.

Os impactos ambientais gerados por painéis de madeira, especialmente com o MDF que é o painel mais consumido no mercado interno (ABIPA, 2014), vêm sendo discutidos pelo fato de serem amplamente utilizados em espaços internos. De modo a exemplificar, He, Zhang e Wei (2012) afirmam que a emissão de formaldeído e compostos orgânicos voláteis (VOCs) dos painéis têm se tornado um dos maiores causadores da degradação da qualidade interna do ar (QIA), a qual pode afetar negativamente o conforto humano, a saúde e a produtividade. Neste sentido, identifica-se uma oportunidade de desenvolvimento de estudos e pesquisas que busquem a melhora do desempenho ambiental e de saúde humana no ciclo de vida do painel MDF.

Em geral, afirma-se, ainda, que este trabalho justifica-se pelo ineditismo e pela relevância vinculados à sua estrutura. O presente estudo é inédito em função do desenvolvimento de um modelo multicritério único amparado no ciclo de vida do produto e em indicadores corporativos a fim de mensurar o desempenho da produção em diferentes cenários da produção de painéis MDF, apoiando a tomada de decisões.

Quanto ao ineditismo ou originalidade, é possível respaldar-se em Wang, Chan e Li (2015) que afirmam que há a necessidade de desenvolver abordagens inovadoras, ou complementares, à ACV no cunho científico. Neste sentido, diante dos conflitos que podem ocorrer entre a efetivação de ações indicadas por resultados de ACV para melhoria de desempenho ambiental e possíveis comprometimentos de outros indicadores corporativos, há uma lacuna científica que permite novos estudos e pesquisas acadêmicas baseadas na ACV.

A originalidade deste estudo está no desenvolvimento de uma abordagem inovadora da ACV, incluindo indicadores corporativos singulares de uma empresa e utilizando, ainda, uma abordagem multicriterial e interativa (onde a estruturação decisória é livre e reflexiva para o decisor) para apoiar tomadas de decisões.

Revela-se uma ausência na literatura de qualquer estudo científico que utilize os resultados provenientes da ACV aliados a outros critérios importantes para auxiliar tomada de decisões no ciclo de vida de painéis de madeira. Não foram encontradas na literatura pesquisas que abordem as singularidades de uma empresa produtora de painéis de madeira em processos decisórios envolvendo a produção. O fato é ainda mais restritivo quando se fala, exclusivamente, do painel de madeira MDF.

Por fim, a relevância vinculada a este trabalho está quanto às possibilidades de aprendizagem à comunidade acadêmica, empresarial e governamental, geradas na construção e validação do modelo. A construção de um modelo multicritério baseado em ACV e indicadores corporativos contribui para o avanço científico na construção de novos modelos, métodos e ferramentas que aloquem ACV e MCDA.

Vale ressaltar ainda que, atualmente, o Brasil possui uma importante colocação no cenário mundial na produção e comercialização de painéis de madeira. É o sexto maior produtor mundial de painéis de madeira (10.371.000 m³/ano) e produz 63% de todos os painéis fabricados na América do Sul (FAOSTAT, 2014).

O setor de produção de painéis de madeira no Brasil tem maior destaque com o painel de madeira MDF. Atualmente, o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de painéis MDF (FAOSTAT, 2014) e a produção de MDF apresentou o maior crescimento do setor durante a última década no Brasil. A capacidade nominal anual de produção de MDF no Brasil é de 5,7 milhões de m³ de painéis, 21% a mais que a capacidade nominal de outro importante painel, o MDP (ABIPA, 2014). O MDF é, também, o painel preferido pelo brasileiro para produção de móveis e arquitetura de interiores. O último relatório da ABIPA (2014) revela que o MDF detém o maior consumo interno de painéis de madeira (3.654.472 m³/ano).

Apesar da perspectiva deste mercado ser muito favorável internamente (ABRAF, 2013), o setor de produção e comercialização de MDF no Brasil vem sofrendo pressão para a redução de impactos ambientais e para a saúde humana. O MDF está presente em grande parte dos móveis residenciais, comerciais e na arquitetura de interiores do setor imobiliário. Neste sentido, justifica-se a relevância em desenvolver estudos científicos que busquem, auxiliem e gerem aprendizagem na melhora do perfil ambiental e de saúde humana do painel MDF.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Com o intuito de fornecer uma visão geral do desenvolvimento deste estudo, a Figura 1 ilustra um fluxograma dos passos delineados para a condução da tese.

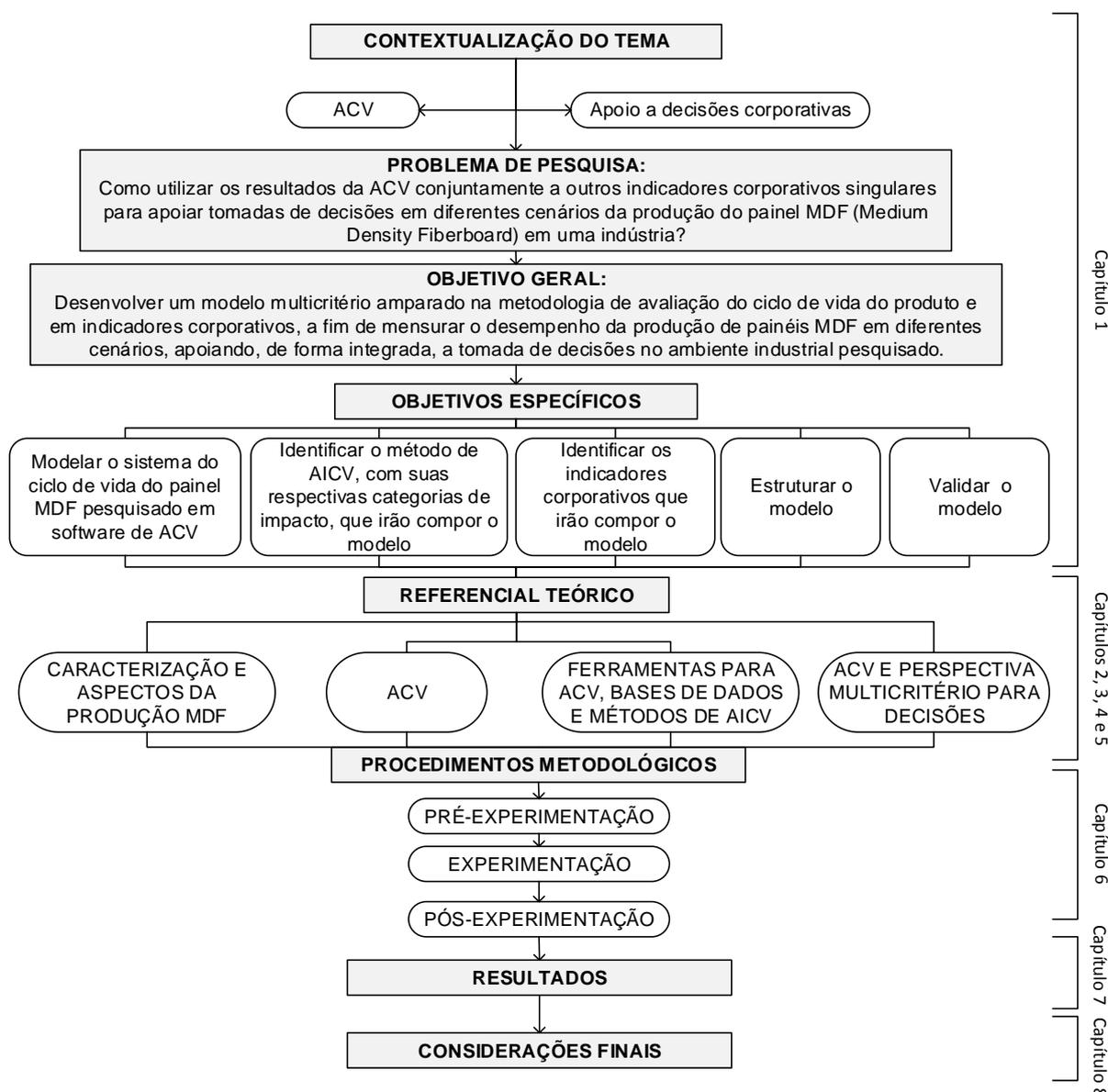


Figura 1 - Fluxograma dos passos delineados para a condução da tese
Fonte: Autoria Própria

Esta seção de organização da tese é o último elemento do capítulo de Introdução. Neste contexto, o capítulo seguinte (2. Caracterização e aspectos da produção do MDF) inicia o referencial teórico, conforme observado na Figura 1.

2 CARACTERIZAÇÃO E ASPECTOS DA PRODUÇÃO DO MDF

Este capítulo apresenta o referencial teórico sobre os painéis de madeira MDF. O objetivo da primeira seção é ilustrar os produtos, as características e o mercado do setor de produção e comercialização dos diferentes painéis de madeira industrializada. Em sua segunda seção, o capítulo aborda, especificamente, os aspectos produtivos e a caracterização do painel de madeira reconstituída MDF.

2.1 VISÃO GERAL DE PAINÉIS DE MADEIRA

Algumas características singulares da madeira como as boas propriedades físico-químico-mecânicas e as funções de sustentação foram responsáveis pela ampla utilização deste material desde as primeiras civilizações existentes. A madeira ganhou grande potencial econômico por seu uso em estruturas de sustentação para abrigos, construção de artigos cotidianos e na produção de calor através de sua combustão (MACEDO, 2014).

Com o progresso no beneficiamento e no uso da madeira, árvores nativas de grande porte se tornaram cada vez menos disponíveis. Neste sentido, madeiras de boa qualidade destinadas às serrarias ficaram cada vez mais escassas. O plantio comercial de espécies nativas e exóticas para atender a demanda de serrarias se tornou uma opção. Entretanto, o longo ciclo de vida da árvore para alcançar diâmetros comercialmente necessários, aliado ao manejo adequado para garantir a qualidade da madeira serrada, implica em maiores custos aos produtos derivados da madeira *in natura* (NASCIMENTO; ROCCO LAHR; CHRISTOFORO, 2011).

Junto com o avanço no uso de madeiras serradas surgiu a necessidade em agregar valor às madeiras baratas ou de baixa qualidade e aos resíduos gerados nas atividades agrícolas, florestais e das serrarias (BENADUCE, 1998). Diante desta demanda, e como alternativa de substituição da madeira nativa e de grandes diâmetros, os painéis de madeira reconstituída (também chamada de industrializada) constituem uma alternativa viável.

Os painéis de madeira reconstituída são produtos resultantes de um processo de transformação da madeira *in natura* em fibras, partículas, flocos ou lâminas que, com a junção de resinas sintéticas e outros aditivos específicos, compõem diferentes

composições de painéis de madeira reconstituída.

A partir da produção dos primeiros painéis, as empresas se depararam com outros problemas: flutuações entre safras florestais, dificuldade de estocagem de matérias-primas (diferentes compostos de madeiras), e a distância entre madeireiras, serrarias e as empresas produtoras de painéis. Conjuntamente com o avanço tecnológico nos processos produtivos de painéis tornou-se necessária uma padronização nos insumos de madeira. Desta forma, a madeira proveniente de florestas plantadas (com ciclos de vida mais curtos e com facilidades no manejo florestal) passou a ser a principal fonte de matéria-prima dos painéis de madeira (SANCHES SANTIAGO, 2007).

O processamento da madeira proveniente de florestas pode ser classificado em segmentos específicos que realizam o beneficiamento da madeira.

A Figura 2 ilustra os três níveis de segmentos da indústria de processamento da madeira:



Figura 2 - Segmentos da indústria de processamento da madeira
Fonte: ABRAF (2013)

Observa-se que o nível de beneficiamento e o valor agregado na madeira são

crecentes desde o nível da indústria de processamento primário até o processamento terciário. Empresas produtoras de chapas e lâminas de madeira maciça (*in natura*), tratamento de madeira, e madeiras para combustão são provenientes das atividades realizadas no segmento primário. Por sua vez, os painéis de madeira reconstituída são dependentes das indústrias de processamento secundário. E, finalmente, as indústrias de processamento terciário da madeira são as responsáveis por transformar a madeira *in natura* em produtos finais e específicos, normalmente com maior valor econômico.

De acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013), o maior consumo de madeira de floresta plantada no Brasil é na produção de carvão vegetal, lenha e outros produtos florestais, responsáveis pelo consumo de 38,7% de toda a madeira de floresta plantada produzida no país. Cerca de 35,2% é utilizada para a produção de celulose, ao passo que a produção de painéis de madeira industrializada, serrados e compensados consumiram, respectivamente, 7,1%, 16,4% e 2,7% do total de madeira produzida. Estima-se que a produção madeireira potencial de Pinus, *Eucalyptus* e Teca seja da ordem 271,5 milhões de m³/ano no Brasil. Do estimado, 76,5% correspondem à madeira de *Eucalyptus* e 23,1% de Pinus (ABRAF, 2013).

Ainda segundo a ABRAF (2013), o mercado interno do setor de produção de painéis de madeira industrializada consome 98,6% de toda a produção de madeira destinada para este setor. Apenas 1,4% de madeira industrializada destinada à produção de painéis são encaminhados ao mercado exterior. De toda a madeira consumida para a produção de painéis de madeira industrializada, cerca de 55,8% são madeiras de Pinus, ao passo que 42,9% são provenientes de madeira de *Eucalyptus*.

De modo geral, a categorização dos painéis de madeira reconstituída se dá pelo nível de transformação sofrido pela madeira e pela densidade final obtida pelo painel. Entre as principais categorias e variações desses produtos estão os painéis de fibras de média densidade (MDF – *Medium Density Fiberboard*), os painéis de partículas de média densidade (MDP - *Medium Density Particleboard*), os painéis de flocos orientados (OSB - *Oriented Strand Board*) e as chapas de fibras.

O Quadro 1 apresenta os principais tipos de painéis de madeira reconstituída, bem como suas características e principais aplicações:

Painel de Madeira	Características	Principais Aplicações
MDF	O MDF é um painel de madeira fabricado com fibras de madeira (<i>fiberboard</i>) que são aglutinadas por meio de resinas, com ação de calor e pressão. Seus correlatos, o HDF (<i>High Density Fiberboard</i>) e o SDF (<i>Super Density Fiberboard</i>), apresentam maior densidade e menor espessura. No Brasil, a madeira proveniente de florestas plantadas – em especial, de eucalipto e de pinus – constitui a principal fonte de matéria-prima.	Móveis, componentes para móveis, arquitetura de interiores, produtos da construção civil.
MDP	O MDP, ou aglomerado, é um painel fabricado com partículas de madeira (<i>particleboard</i>) também aglutinadas por meio de resina, com ação de calor e pressão. A matéria-prima utilizada nesses painéis é a mesma empregada na fabricação do MDF. A nomenclatura MDP é resultante da modernização tecnológica produtiva, passando do processo de prensagem cíclica para prensagem contínua, o que conferiu melhores características de resistência, substituindo a nomenclatura de aglomerado para MDP.	Móveis, componentes para móveis, arquitetura de interiores, produtos da construção civil.
OSB	O painel de flocos orientados – OSB (<i>Oriented Strand Board</i>) – é formado por diversas lascas de madeiras orientadas perpendicularmente em diversas camadas, unidas por resinas e sob a ação de alta pressão e temperatura. Os painéis OSB têm a vantagem de ser produzidos, também, com toras de qualidade inferior ou de árvores com menores diâmetros.	Produtos e Estruturas da construção civil, embalagens, armações para mobílias.
Chapa de Fibra	Também conhecida como chapa dura (<i>Hardboard</i>), 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 (lignina) e confere ao produto alta densidade. No Brasil, utiliza-se como principal matéria-prima a madeira de <i>Eucalyptus</i> reflorestada e certificada. A seleção das espécies é fundamental para obter melhor rendimento agroindustrial. A chapa dura pode ser trabalhada de diversas formas: estampadas, curvadas, moldadas, usinadas, cisalhadas e pintadas.	Móveis, embalagens, indústria automotiva, de brinquedos, de imagem e som, em hortifrutigranjeiros e na construção civil.

Quadro 1 – Categorização, Características e Aplicações dos principais painéis de madeira
Fonte: Adaptado de ABIPA (2014), Matos; Gonçalves; Chagas (2008), e ABRAF (2013)

As utilizações dos painéis de madeira apresentadas no Quadro 1 estão diretamente associadas às suas propriedades físicas e mecânicas. As restrições técnicas para utilização e a aplicação de diferentes tipos de painéis de madeira reconstituída envolvem características como: resistência, uso em interiores ou exteriores, uniformidade da superfície, tolerância à usinagem, resistência à fixação de parafusos, entre outros. Cada tipo de painel apresenta diferentes sobreposições nas restrições técnicas (ABIMCI, 2009).

No Brasil, o setor de produção e comercialização de painéis de madeira brasileiro é formado por indústria produtora dos painéis ilustrados no Quadro 1 (MDF,

MDP, OSB e Chapa de Fibras). Nosso país está entre os mais avançados do mundo na fabricação de painéis de madeira reconstituída. É o país com o maior número de fábricas de última geração. Os investimentos contínuos em tecnologia e automação se traduzem em indústrias versáteis e modernos parques industriais destinados à instalação de novas unidades, à atualização tecnológica das plantas já existentes, à implantação de linhas contínuas de produção e aos novos processos de beneficiamento dos painéis (ABIPA, 2014).

O Brasil é o sexto maior produtor mundial de painéis de madeira (10.371.000 m³/ano) e produz 63% de todos os painéis fabricados pela América do Sul (FAOSTAT, 2014). O mercado de painéis de madeira industrializada encontra-se em expansão no Brasil. Desde 1997, ano de instalação da primeira fábrica produtora de MDF no Brasil (BIAZUS; HORA; LEITE, 2010), a produção anual brasileira cresceu de 3,9 milhões para 10,48 milhões de m³ de painéis de madeira reconstituída com um crescimento médio de 6,5% a.a. no mesmo período (FAOSTAT, 2014).

O Gráfico 1 apresenta o histórico da produção anual de painéis de madeira reconstituída no Brasil, bem como as quantidades importadas e exportadas, em milhões de m³.

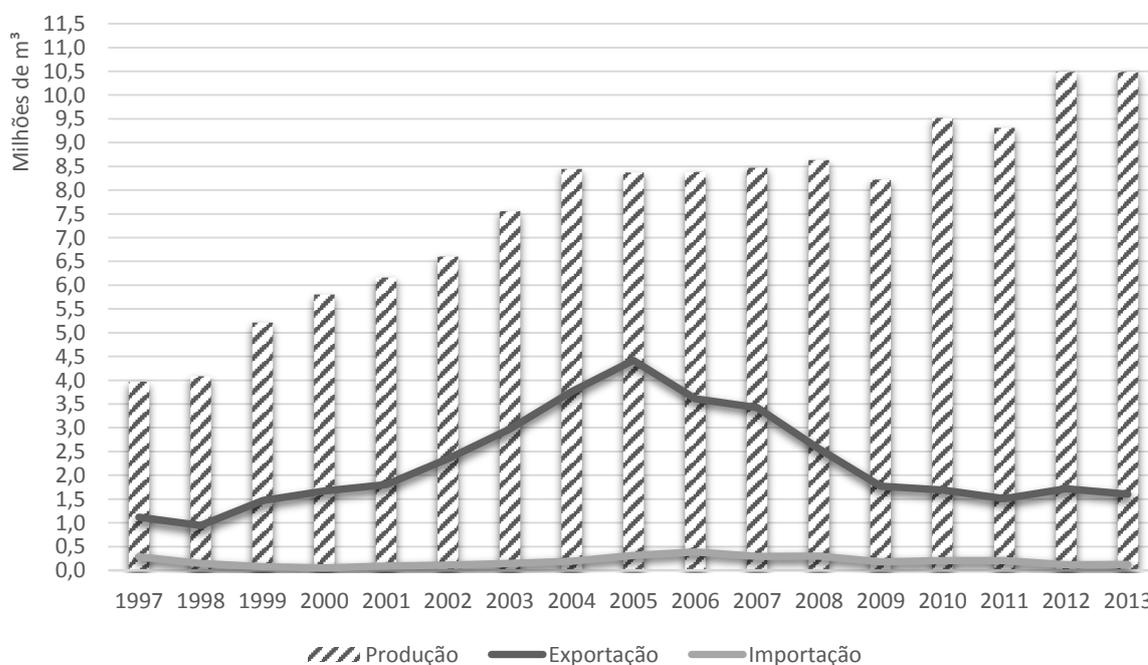


Gráfico 1 – Histórico da Produção, Exportação e Importação de painéis de madeira no Brasil
 Fonte: Adaptado de FAOSTAT (2014)

De acordo com o Gráfico 1, nota-se o crescente avanço na produção de

painéis de madeira reconstituída no Brasil nos últimos anos. Pela ampla produção nacional, a importação de painéis é baixa (representando 1,2% dos painéis existentes no mercado interno) e cerca de 8% da produção nacional foi exportada durante o ano de 2013.

De acordo com a ABRAF (2013), a produção e o consumo da indústria de painéis de madeira industrializada apresentaram o maior crescimento médio anual dentre os produtos florestais do Brasil. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA, 2014), tal aumento foi devido ao incremento do consumo doméstico e aos investimentos significativos realizados pelas indústrias do setor, as quais dobraram a capacidade nominal instalada na última década. As indústrias desse segmento são importantes fornecedoras de matéria-prima para as indústrias de móveis, construção civil e embalagens. Portanto, o crescimento do mercado de painéis está fortemente ligado ao cenário econômico interno (ABRAF, 2013).

A Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013) afirma que a substituição do uso de compensados pelos painéis de madeira reconstituída na produção moveleira tem interferido de maneira expressiva no desenvolvimento do setor. Os pacotes governamentais de estímulos à elevação da competitividade do setor moveleiro brasileiro em 2012, como a isenção do Imposto sobre Produto Industrializado (IPI), beneficiaram toda a cadeia moveleira nacional. Este setor faturou BRL 35,1 bilhões em 2011, 11,4% a mais do que em 2010. Paralelamente, a ABRAF (2013) afirma que as políticas públicas voltadas ao setor habitacional (Programa Minha Casa Minha Vida) e a elevação da renda média da população brasileira também contribuíram para o incremento da demanda por produtos à base de painéis de madeira reconstituída.

Dentre todos os painéis que compõem o mercado nacional, o MDF é o mais produzido e o mais consumido no Brasil. De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA, 2014), em 2014, a capacidade nominal anual de produção de MDF no Brasil é de 5,7 milhões de m³ de painéis, 21% a mais que a capacidade nominal de outro importante painel, o MDP (4,7 milhões de m³/ano) (ABIPA, 2014).

Os números nacionais de produção do painel MDF são ainda mais expressivos: o Brasil é o terceiro maior produtor mundial de painéis MDF (FAOSTAT, 2014) e a produção de MDF apresentou o maior crescimento do setor de painéis

durante a última década no Brasil. O último relatório da ABIPA (2014), ano base 2012, revela que o MDF apresentou o maior consumo interno de painéis de madeira (3.654.472 m³/ano). O painel MDP revelou o consumo interno de 3.232.733 m³/ano. A próxima seção aborda, de maneira mais aprofundada, o painel de madeira reconstituída que é objeto de estudo desta tese – o MDF.

2.2 PAINEL DE MADEIRA DE FIBRAS DE MÉDIA DENSIDADE (MDF)

O primeiro registro de que se tem história a respeito de algum material composto de fibras de madeira é referente a uma produção realizada no Japão por volta do Século VI a.C. e ficaram conhecidos como “papéis duros”. Este produto era utilizado na construção de paredes de pequenas habitações japonesas. O próximo registro conhecido é do ano 1772, na Inglaterra, com o registro de patente do “*papier maché*” para aplicação não apenas em divisórias, portas e móveis, como também, em carruagens. Foi no século XIX que realmente se iniciou o primeiro sistema de produção de painéis de fibras com uma máquina para a produção de papelão com quatro cilindros formadores, na fábrica de produção de chapas semiduras da “The Patent Imperable Millboard Co” (BENADUCE, 1998; SANCHEZ SANTIAGO, 2007).

O grande desenvolvimento da indústria de painéis de fibras de madeira se deu após a instalação do processo Masonite e Asplund (com o sistema Desfibrador) em 1926 e 1931, respectivamente. Por fim, na década de 60, com o desenvolvimento de um processo de aglutinação de fibras formando um painel de média densidade deu-se o nome de painel MDF. A partir de 1967 as iniciais MDF passaram a identificar o produto e a comercialização do Painel de Fibras de Média Densidade. Na década de 80, com o aumento no valor de densidade do painel MDF, foi apresentado ao mercado o painel HDF (BENADUCE, 1998).

As evoluções no sistema de produção aliado ao avanço tecnológico possibilitaram maior conformação e qualidade no processo básico de fabricação dos painéis MDF. O painel MDF é caracterizado pela aglutinação e compactação das fibras de madeira com adição de resina sintética e ação conjunta de pressão e calor em um processo de prensagem (ABIPA, 2014).

Neste enlace, a Figura 3 apresenta o painel MDF *in natura* em diferentes espessuras.



Figura 3 - Painel de Madeira MDF
Fonte: Peuttmann, Oneil e Wilson (2013)

As características de fabricação do MDF garantem características singulares que foram e são responsáveis pela grande aceitação do painel no mercado mundial, tal como a homogeneidade do produto como é possível observar na Figura 3.

As principais características do produto que influenciaram o avanço do painel no mercado estão: a excelente trabalhabilidade no processo de usinagem e de acabamento superficial, a homogeneidade, excelente estabilidade dimensional, superfícies uniformes, lisas e de altas densidades, ausência de defeitos (nós, desvios de grã, medula, etc.), a alta relação entre resistência mecânica e massa específica, possibilidade de reciclagem e renovação da matéria-prima, imobilização do carbono em sua composição e menor demanda de energia para produção em relação ao aço, plástico, alumínio, etc. (BENADUCE, 1998; ELEOTÉRIO; TOMAZELLO FILHO; BORTOLETTO JÚNIOR, 2000; BNDES, 2002; IWAKIRI *et al.*, 2005).

A respeito desta grande aceitação do produto no mercado, o Gráfico 2 apresenta o avanço na produção mundial do MDF nos últimos vinte anos.

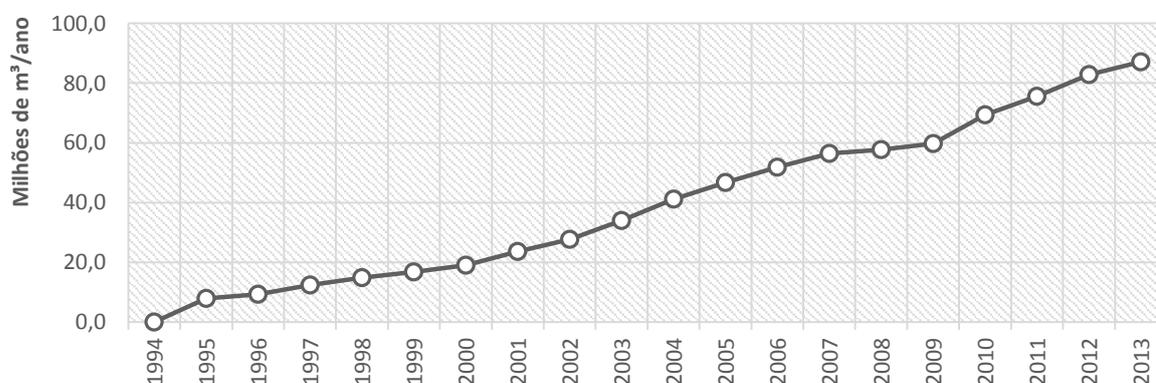


Gráfico 2 – Evolução na produção de painéis de madeira MDF no mundo
Fonte: Adaptado de FAOSTAT (2014)

Como é possível observar, até 1994 a produção mundial era menor de um milhão de m³ ao ano. Desde então, o crescimento médio observado na produção industrial mundial do MDF foi de 14,5% ao ano (FAOSTAT, 2014). A significativa taxa de crescimento foi resultante, principalmente, do processo de prensagem contínua do painel que garantiu maiores possibilidades de controle do processo produtivo e dos parâmetros do produto.

Quanto aos parâmetros do produto, no Brasil, 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 o painel MDF em quatro categorias de acordo com suas densidades:

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

Dentre as classificações, o painel que predomina no mercado nacional é o *standard*, o qual também é objeto de estudo nas ACVs desta pesquisa. Neste sentido, o próximo capítulo aborda sobre os princípios e a metodologia da Avaliação do ciclo de vida.

3 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Este capítulo apresenta os princípios da Avaliação do Ciclo de Vida e as quatro fases contempladas em sua metodologia.

A Avaliação do Ciclo de Vida, ACV, é uma abordagem metodológica que objetiva quantificar e avaliar os potenciais impactos de um produto ao longo de todo seu ciclo de vida. A avaliação pode ir do “berço-ao-túmulo” (*cradle-to-grave*) do produto, processo ou serviço, incluindo todos os estágios de extração de matéria-prima, processamento de bens semimanufaturados, a produção, distribuição, uso, reparo e manutenção, e a disposição final e/ou a reciclagem de materiais ou energias. (UNEP, 2014).

Em 2003, a Comissão de Comunidades Europeias (COM, 2003) reconheceu a ACV como a melhor estrutura para avaliar os potenciais impactos de produtos na Política Integrada do Produto (IPP – *Integrated Product Policy*) da União Europeia. A importância da metodologia perdura durante a última década, autores como Finnveden *et al.* (2009) e Blengini *et al.* (2012) reafirmam a importância desta metodologia. Eles enfatizam que a característica única da ACV em focar sua aplicação na perspectiva do ciclo de vida do produto faz com que se forneça grande parte de informações ambientais necessárias para interpretar, prever e gerar soluções sustentáveis para sistemas industriais.

Duas normas ISO (14040 e 14044) estabelecem a consolidação dos cálculos e da metodologia da ACV. A ISO 14040 (ABNT, 2009a) especifica os requisitos e provê orientações, ao passo que a ISO 14044 (ABNT, 2009a) descreve os princípios e a estrutura de uma ACV. As normas, em geral, fornecem uma estrutura metodológica para definir a unidade funcional, identificar e descrever os processos e unidades inerentes, avaliar a magnitude de potenciais impactos ambientais e, finalmente, interpretar os resultados encontrados em relação ao objetivo determinado para o estudo. A seção a seguir apresenta a metodologia para a ACV.

3.1 METODOLOGIA DA ACV

A ISO, através das normas 14040 e 14044 (ABNT, 2009a; ABNT, 2009b), define quatro fases para a condução de uma ACV, os relacionamentos entre as fases

e algumas aplicações diretas para a estrutura (Figura 4). A primeira fase é a “Definição de Objetivo e Escopo” que inclui a especificação do objetivo do estudo, a unidade funcional (que é a unidade de referência para o produto, o processo ou o serviço avaliado pelo sistema em estudo) e as fronteiras/limites do sistema; a segunda fase é a “Análise de Inventário” onde os dados do sistema de entradas e saídas são coletados e quantificados; na terceira fase ocorre a “Avaliação do inventário do ciclo de vida” onde os dados coletados na segunda fase são caracterizados e agregados em categorias de impactos para melhor entendimento dos impactos potenciais; por fim, a última fase é a “Interpretação” onde os resultados são analisados, comparados e discutidos perante os objetivos e o escopo traçado para a ACV.

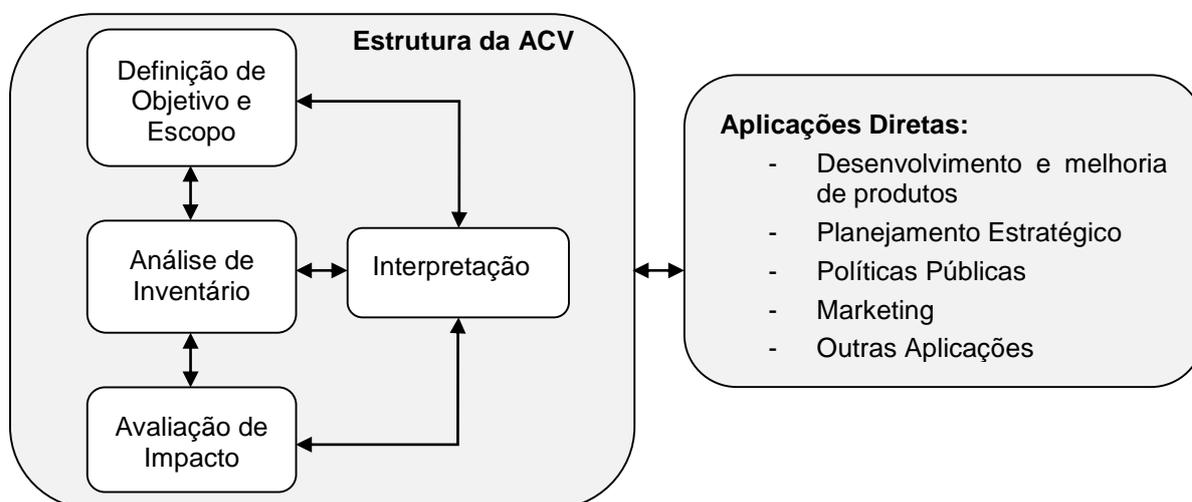


Figura 4 – As fases da ACV, seus relacionamentos e aplicações diretas
 Fonte: ABNT (2009a)

Em análise da Figura 4, nota-se que as quatro fases possuem inter-relações (flechas em duplo sentido), caracterizando a condução de uma ACV em um processo dinâmico. De acordo com a ABNT NBR ISO 14040 (2009a), as fases individuais de uma ACV utilizam e contribuem com os resultados de outras fases, a fim de garantir a completeza e consistência do estudo e dos resultados relatados. É comum que o escopo seja ajustado durante o estudo dependendo dos resultados que vão sendo encontrados. As quatro fases da ACV são detalhadas nas seções subsequentes.

3.1.1 Definição de Objetivo e Escopo

É a etapa crucial para a condução da Avaliação do Ciclo de Vida. Neste

momento, o objetivo e escopo da ACV devem ser declarados e estarem consistentes e claros com a aplicação pretendida. Quanto mais analisada, detalhada e aprofundada for essa etapa, menores serão as inconsistências, incertezas e riscos dos resultados do estudo.

Desta maneira, o objetivo pretendido necessita ser exposto de maneira clara e concisa, evidenciando a aplicação pretendida, as razões para conduzir a ACV (motivação), e o público alvo que será alcançado na divulgação dos resultados. Por sua vez, o escopo deve ser detalhado e claramente descrito, para que a extensão, a profundidade e o grau de informações do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender o objetivo estabelecido (ABNT, 2009a).

A declaração e o detalhamento do escopo da ACV podem se apresentar de modos variados em diferentes estudos. Dependendo da área do estudo e dos objetivos traçados, algumas declarações de escopo são mais simplistas que outras. De qualquer modo, a ISO 14044 (ABNT, 2009b) recomenda que os seguintes itens devam ser declarados no escopo de uma ACV: 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; os 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; tipos de revisão crítica, se aplicáveis; tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

A definição da unidade funcional é um dos temas mais importantes da primeira fase da ACV, seu principal objetivo é servir como uma fonte de referência única que irá permitir a comparação justa entre diferentes estudos e cenários. Se a unidade funcional for 1,0 m³ de um determinado produto acabado, por exemplo, os resultados incluirão o montante bruto dos recursos e dos poluentes liberados para cada m³ do produto produzido. Esta singularidade na unidade de referência garante a comparabilidade de resultados entre diferentes sistemas avaliados em uma base comum.

Outra importante definição da primeira fase é a declaração dos limites do sistema (fronteira do sistema). Estes limites estabelecem o que será considerado e o que não será considerado no âmbito do estudo. A seleção da fronteira deve ser consistente com o objetivo traçado e os critérios utilizados na definição dos limites do sistema devem ser identificados e explicados (ABNT, 2009b).

As fronteiras do sistema irão determinar a abrangência do estudo, ou seja, sobre quais etapas do ciclo de vida será realizada a ACV. Um estudo de ACV que considera o ciclo de vida completo do produto é chamado de “*cradle-to-grave*”, que vai do berço (extração de matérias-primas) ao túmulo (destinação final do produto), passando por todas as etapas intermediárias do ciclo de vida do produto (beneficiamento de matérias-primas, fabricação, transportes, uso, reuso e destinação final).

Dependendo dos objetivos e das limitações em obter informações em etapas específicas do ciclo de vida de um produto, as fronteiras podem ser redefinidas para as seguintes abordagens: “*cradle-to-gate*” (do berço ao portão da fábrica, quando for necessário eliminar as fases de uso e destinação final), “*gate-to-gate*” (entre dois pontos definidos no ciclo de vida do produto, quando se tem dificuldades para conseguir dados anteriores e posteriores aos limites da fabricação do produto, por exemplo).

Há, também, variações em conceitos e abordagens complementares do ciclo de vida, tais como o “*cradle-to-cradle*” (berço ao berço), desenvolvida por McDonough e Braungart (2009) (quando o destino final do produto é a reciclagem, tornando-o uma nova matéria-prima) e a “*gate-to-crave*” (do portão da fábrica a destinação final do produto, utilizado, principalmente, para análise do uso, reuso e destinação final do produto).

Ainda na primeira fase do estudo, define-se a abordagem da ACV podendo ser atribucional ou consequencial. A ACV Atribucional (ACV-A) informa os impactos e os fluxos de materiais, energia e emissões dentro de um sistema atribuído a certa quantidade de unidade funcional. Por sua vez, a ACV Consequencial (ACV-C) revela quais são as alterações (positivas ou negativas) nos impactos e fluxos de um sistema quando sujeito a variações de cenários, na saída de certa quantidade da unidade funcional (THOMASSEN *et al.*, 2008). A ACV-A é caracterizada como estática, de contexto independente e apresenta valores médios, já a ACV-C é dinâmica, de contexto específico e com valores marginais (PLEVIN *et al.*, 2013).

Neste contexto, é possível afirmar que cada estudo possuirá suas particularidades e limitações para condução da ACV. Tais informações serão consideradas continuamente durante as fases da ACV e irão moldando os objetivos e o escopo do estudo. Com a primeira fase da ACV realizada, é possível iniciar o levantamento do inventário do ciclo de vida.

3.1.2 Análise de Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

A análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV) compreende a obtenção de dados e a definição dos procedimentos de cálculo para a quantificação dos fluxos de entradas e saídas de um sistema de produto (ABNT, 2009a). Portanto, é nesta fase em que os dados são quantificados para construir o inventário do ciclo de vida.

A definição dos objetivos e escopo da ACV são os balizadores para a preparação da coleta de dados e para análise do ICV.

A Figura 5 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).

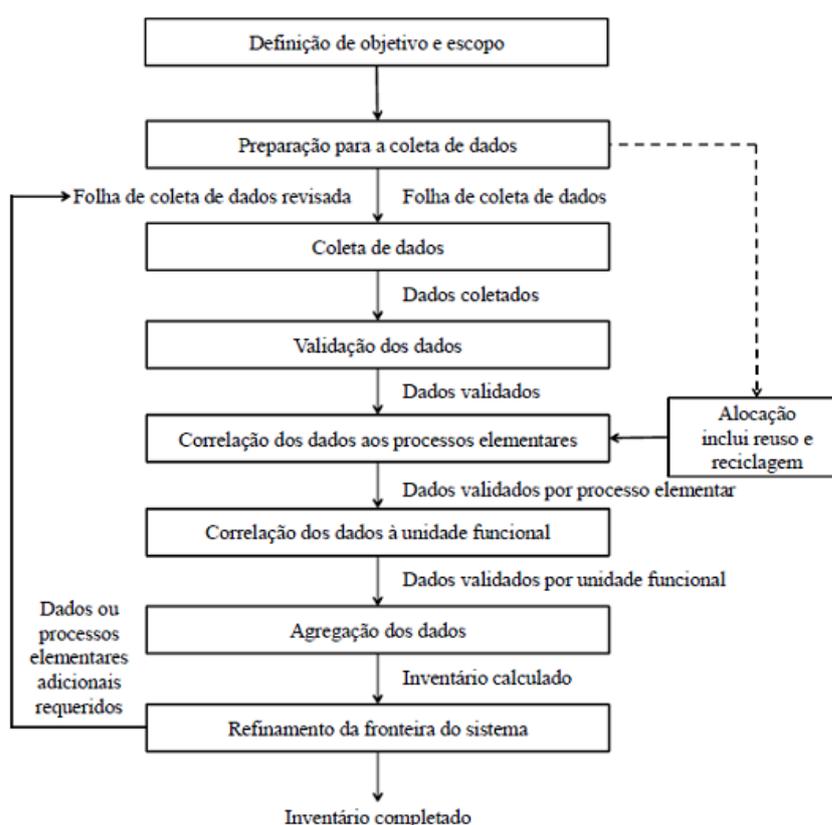


Figura 5 - Procedimentos simplificados para a análise de inventário
Fonte: ABNT (2009b)

As atividades exibidas na Figura 5 partem dos aspectos definidos no objetivo e escopo da ACV e seguem até o inventário completado. Tais atividades são condensadas pela ISO 14044 (ABNT, 2009b) em três grupos: coleta de dados,

procedimentos de cálculo e alocação.

a) Coleta de dados: é a mais exaustiva das partes e o produto gerado nesta fase são os dados efetivamente coletados. Para a coleta de dados é necessária uma preparação prévia para que análises futuras de dados não sejam comprometidas (ABNT, 2009a). A preparação prévia envolve o planejamento das coletas, a elaboração das folhas de coletas de dados, agendamento e contato com fornecedores de informações, capacitação dos públicos envolvidos no estudo, etc.

Existem duas fontes de coleta de dados para uma ACV: dados primários e dados secundários. Os primários são dados próprios, coletados diretamente nos processos que estão no escopo do estudo, a partir de medições e possíveis estimativas para quantificação. Os dados secundários são públicos ou adquiridos, baseados em informações retiradas de bases de dados já existentes, levantadas por outros estudos (ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2013).

Os dados secundários são utilizados mediante limitações encontradas na coleta de dados. Existem casos em que há inviabilidade na coleta de dados de alguma matéria-prima, por exemplo. Supondo que um dos insumos do produto analisado seja importado, pode haver inviabilidade (por limitações temporais, econômicas, ou de acesso à empresa produtora) para coletar os dados de forma primária. Neste caso, recorre-se à ICVs da matéria-prima em bases de dados ou em estudos já publicados.

Caso não existam ICVs de um determinado produto para uma localidade desejada, por exemplo, pode-se selecionar e ajustar o máximo possível os dados provenientes da literatura para o contexto em que o estudo está inserido. Vale ressaltar que a qualidade e a transparência na coleta de dados são elementos primordiais para a garantia da qualidade e da confiabilidade dos resultados da ACV. A ABNT (2009a) cita que é conveniente que o escopo, as suposições adotadas e a descrição da qualidade dos dados (origens primárias e secundárias) da ACV sejam, de fato, transparentes.

Por fim, para auxiliar na construção do ICV, a ISO 14044 (ABNT, 2009b) fornece, em seu anexo, 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.

b) Procedimentos de Cálculo: Após a coleta dos dados é necessário efetivar os procedimentos de cálculos de ICV. Os procedimentos são realizados para tratar,

calcular e validar os dados coletados e correlacioná-los com a unidade de processo, a unidade funcional e a agregação dos dados (ABNT, 2009a; PONTES, 2014).

Para se efetuar o cálculo completo de todo sistema, pode-se fazer uso do balanço de massa, balanço de energia e/ou análises comparativas de fatores de emissão (ABNT, 2009b) para validar se as informações estão completas. Segundo o Athena Sustainable Materials Institute (2013), normalmente os balanços de massas e de energia são modelados através de *softwares* de ACV de modo a facilitar a operacionalização dos dados, a validação dos dados por processo elementar por unidade funcional, a agregação dos dados e, por fim, fornecer o inventário calculado. Os *softwares* para ACV são apresentados no capítulo 4 “FERRAMENTAS PARA ACV, BASES DE DADOS E MÉTODOS DE AICV”.

Conforme é possível observar ainda na Figura 5 (p.34), ao final da agregação dos dados tem-se o inventário calculado. Neste momento, é possível refinar as fronteiras do sistema. Segundo a ISO 14044 (ABNT, 2009b), decisões com relação aos dados a serem incluídos e/ou excluídos devem ser baseadas em uma análise de sensibilidade para determinar sua significância.

Com a análise de sensibilidade é possível decidir excluir estágios do ciclo de vida ou processos elementares que não sejam significantes para o estudo ou, ainda, excluir entradas e saídas não significativas para os resultados do estudo. Da mesma forma, é possível também incluir aspectos ambientais ou novos processos elementares que foram julgados relevantes. O resultado obtido com o refinamento das fronteiras do sistema deve ser justificado e documentado (ABNT, 2009b).

c) Alocação: Objetiva aplicar os procedimentos de alocação conforme o que foi definido no escopo do estudo. A alocação refere-se à “repartição dos fluxos de entrada ou saída de um processo ou sistema de produto entre o sistema de produto em estudo e outro(s) sistema(s) de produto” (ABNT, 2009b, p.4).

A alocação acaba sendo utilizada em processos multifuncionais, onde existem várias entradas ou saídas, com valor econômico, e não é possível coletar os dados de modo individual para cada entrada ou saída (GHG PROTOCOL, 2010). Neste caso, o estudo deve identificar os processos compartilhados com outros sistemas de produto e tratá-los para resolver o problema da multifuncionalidade. A ISO 14044 (ABNT, 2009b) apresenta um procedimento passo a passo para tratar a alocação: (1) Primeiramente buscar evitar a alocação por meio da subdivisão de processos elementares ou a expansão do sistema de modo a incluir as funções adicionais

relacionadas aos coprodutos; (2) quando a alocação não puder ser evitada, convém subdividir as entradas e saídas do sistema entre seus diferentes produtos ou funções, de maneira a refletir as relações físicas subjacentes entre eles; (3) quando uma relação física não puder ser estabelecida ou usada como base para a alocação, convém que as entradas sejam alocadas entre os produtos e funções de uma maneira que reflita outras relações entre eles (valor econômico, por exemplo).

Com a coleta de dados, os procedimentos de cálculos realizados, e os procedimentos de alocação considerados, se tem o inventário do ciclo de vida. É possível agora quantificar os impactos do ciclo de vida através do correlacionamento de categorias de impacto e suas significâncias ambientais com o ICV. Tal processo ocorre na próxima fase da ACV: a Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV).

3.1.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A terceira fase é a essência da avaliação do ciclo de vida. Nesta fase, os dados inventariados são traduzidos em impactos potenciais para o meio ambiente e para a saúde humana. A ISO 14044 (ABNT, 2009b) afirma que a AICV associa dados do inventário com categorias de impacto específicas e indicadores da categoria de modo a compreender a magnitude e a significância dos impactos ao longo do ciclo de vida do produto.

O enfoque da AICV se dá nas questões ambientais declaradas no objetivo e escopo da ACV (ABNT, 2009a). Ou seja, a avaliação envolve as questões ambientais delineadas no sistema de produto do estudo. Ainda assim, Chehebe (1997) afirma que, os impactos ambientais analisados provêm de intervenções que cruzam a fronteira entre a tecnosfera e a biosfera, impactando sobre o meio natural e os seres vivos. Segundo o autor, é importante, observar que os indicadores de impacto ambiental e de saúde humana, contraídos, devem ser considerados como impactos potenciais ao invés de previsões de reais efeitos ambientais e de saúde humana.

Para a realização da AICV, os dados inventariados são correlacionados com categorias de impacto ambiental e de saúde humana, por meio de três elementos obrigatórios: seleção, classificação e caracterização. Além destes, existem os elementos opcionais de uma AICV: a normalização, o agrupamento e a ponderação

(PONTES, 2014).

A Figura 6 ilustra os elementos mandatórios e opcionais da avaliação de impactos do ciclo de vida.

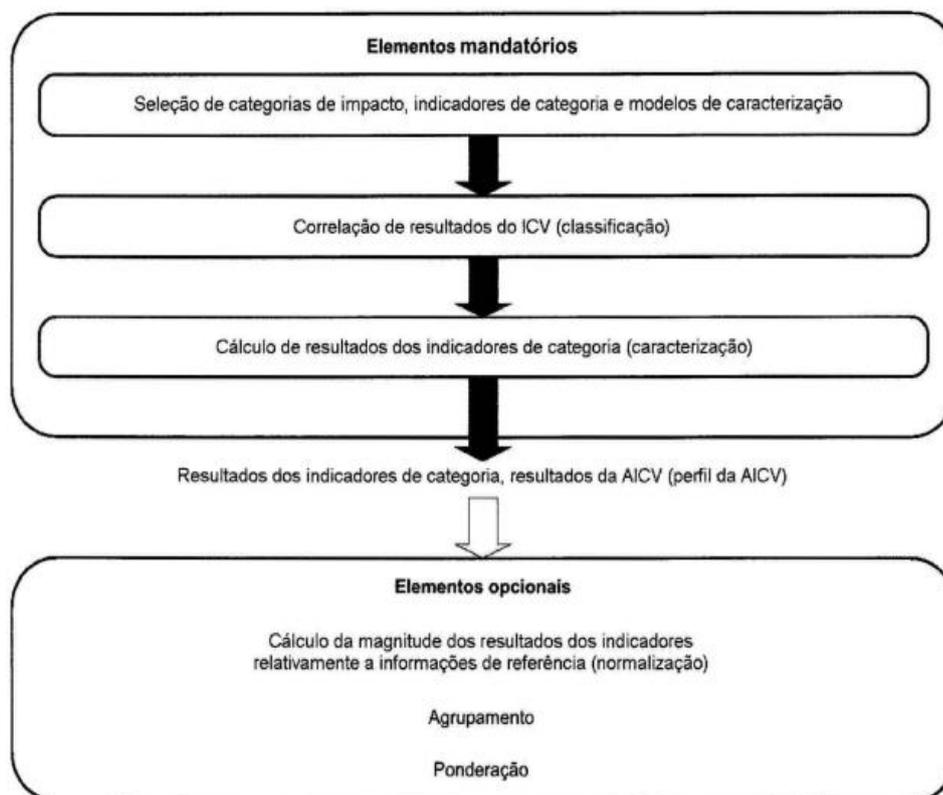


Figura 6 - Elementos da fase de AICV
Fonte: ABNT (2009a)

Os três elementos mandatórios da ACV são descritos nos tópicos a seguir.

a) Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização: São definidas as categorias de impactos, os indicadores de categorias e modelos de caracterização que serão utilizados na AICV. Pontes (2014) afirma que, em geral, primeiramente são selecionadas as categorias de impacto, e os outros dois itens são automaticamente elegidos quando se define o método de AICV.

Conforme a ISO 14044 (ABNT, 2009b), para a maioria dos estudos de ACV, são selecionadas as categorias de impacto, indicadores de categoria ou modelos de caracterização já existentes. Em casos específicos e raros, no entanto, estes elementos não são suficientes para satisfazer o objetivo e escopo definidos para a ACV. Desta forma, devem ser definidas novas categorias de impacto, indicadores de categoria ou modelos de caracterização.

As categorias de impacto se referem às classes de alterações ambientais relevantes que podem ser provocadas ou agravadas pelos aspectos ambientais do ciclo de vida do produto em estudo (PONTES, 2014). Tais categorias podem estar associadas a impactos globais (aquecimento global, depleção da camada de ozônio, etc.) e não globais (ecotoxicidade, acidificação, eutrofização, etc.) (COLTRO, 2007).

De modo a exemplificar, o Quadro 2 ilustra as principais categorias de impactos de ACVs e os métodos de AICV para a caracterização de impactos.

MÉTODOS DE AICV (MODELOS DE CARACTERIZAÇÃO)	CATEGORIAS DE IMPACTOS											
	Mudança Climática	Depleção da Camada de Ozônio	Efeitos Respiratórios (Inorgânicos)	Toxicidade Humana	Radiação Iônica	Ecotoxicidade	Formação de Ozônio Troposférico	Acidificação	Eutrofização Terrestre	Eutrofização Aquática	Ocupação/Uso de Terra	Consumo de recursos abióticos
CED												X
CML2002	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Eco-Indicator 99	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X
EDIP2003 / EDIP976	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
EPS 2000	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Impact 2002+	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X
IPCC	X											
LIME	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
LUCAS	X	X		X		X	X	X	X	X	X	X
MEEuP	X	X	X	X		X	X	X	X			X
ReCiPe	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Swiss Ecoscarcity 07	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TRACI	X	X	X	X		X	X	X	X	X		X
USEtox				X		X						

Quadro 2 - Principais categorias de impactos e modelos de caracterização para ACV
Fonte: Matthews, Hendrickson e Matthews (2014)

Em análise ao Quadro 2 é possível constatar que alguns métodos como o CED (*Cumulative Energy Demand*) e o IPCC (*International Panel on Climate Change Method*) focam em apenas uma categoria de impacto, enquanto outros, como o CML 2002, Ecoindicator 99 e ReCiPe, envolvem um número maior de categorias de impacto durante a análise.

As categorias de impacto apresentadas no Quadro 2 são caracterizadas como *midpoint*, que seriam resultados intermediários. Existem também a possibilidade da ACV trabalhar com a avaliação de impactos *endpoint*, ou dano propriamente dito, que seria o resultado final do impacto. O quarto capítulo deste trabalho aborda, exclusivamente, sobre os métodos para AICV e suas abordagens.

A seleção de categorias de impacto, indicadores de categoria, abordagem dos impactos e modelos de caracterização devem ser justificados e condizentes com o objetivo e escopo da ACV, bem como, deve refletir um conjunto abrangente de questões ambientais relacionadas ao sistema de produto em estudo (ABNT, 2009b). Refletir sobre o que se espera com os resultados da ACV e realizar um levantamento teórico de outros estudos de ACV com produtos similares são alternativas que auxiliam na justificativa da escolha dos métodos e das categorias de impacto selecionadas.

b) Classificação: O elemento seguinte da AICV é a classificação, sendo o primeiro elemento quantitativo da avaliação de impactos. 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).

Desta forma, os elementos (entradas e saídas) coletados no inventário são classificados em grupos específicos, onde cada um destes está associado com uma determinada categoria de impacto selecionada para a AICV (MATTHEWS, HENDRICKSON e MATTHEWS, 2014). Uma determinada quantidade de CO₂ emitida no ciclo de vida de determinado produto, por exemplo, é classificada para a categoria de aquecimento global.

De acordo com Vieira Neto (2012), a proposta geral da classificação é organizar e possibilitar a combinação das categorias dos impactos dentro dos resultados do ICV. Como citado anteriormente, ao selecionar um dos métodos de AICV disponíveis, os sistemas de classificação, bem como os de caracterização, são automaticamente elegidos para a avaliação dos impactos.

c) Caracterização: O último elemento obrigatório da AICV compreende a realização dos cálculos dos resultados dos indicadores de categoria. 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. Saídas com impactos similares podem ser caracterizadas para compor uma mesma categoria de impacto (MYLLYVIITA *et al.*, 2012).

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. Neste sentido, os impactos ambientais potenciais de um inventário de ACV são avaliados em fatores de caracterização, que são multiplicadores de cargas potenciais de impactos de uma determinada intervenção ambiental (por exemplo, de emissões) (ROY, *et al.* 2014).

Tradicionalmente, os procedimentos de caracterização são dados pela Equação (1):

$$IR_c = \sum_s FC_{cs} \times m_s \quad (1)$$

Onde:

IR_c = Indicador de Resultado para categoria de impacto c ;

FC = Fator de Caracterização que conecta a intervenção s com a categoria de impacto c ;

m_s = Quantificação da intervenção s (por exemplo, a massa da substância s emitida).

A Equação (1) é tipicamente utilizada para caracterização nos métodos de AICV. O método IPCC para avaliação de mudança climática, por exemplo, é conhecido por criar valores de equivalência potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa (GEE), onde o CO_2 é dado com valor definido em 1 e os outros GEE têm um fator de caracterização quilograma equivalente de CO_2 (Kg CO_2 -equiv. ou Kg CO_2e) (MATTHEWS, HENDRICKSON e MATTHEWS, 2014).

De acordo com IPCC (2007), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), dois gases de efeito estufa, possuem fatores de caracterização (FC) para a categoria de impacto de mudança climática (CC) de 25 kg CO_2 -equiv./ kg da substância e 298 kg CO_2 -equiv./ kg da substância, respectivamente. Desta forma, considerando que em um ICV hipotético tem uma quantificação de intervenção de emissão de 3,8 kg de CH_4 e 0,02 kg de N_2O tem-se que o Indicador de Resultado para Mudança Climática (IR_{MC}) é:

$$IR_c = \sum_s FC_{cs} \times m_s \quad (1)$$

$$IR_{MC} = (FC_{MCCH_4} \times m_{CH_4}) + (FC_{MCN_2O} \times m_{N_2O})$$

$$IR_{MC} = (25 \times 3,8) + (298 \times 0,02)$$

$$IR_{MC} = 100,96 \text{ Kg CO}_2 \text{ equiv.}$$

Cada método de avaliação de impacto realiza a caracterização específica de cada substância do inventário com a(s) categoria(s) de impacto(s), classificada(s) e abordada(s) pelo método (conforme visto no Quadro 2). Devido às milhares de entradas e saídas que são quantificadas durante o ciclo de vida de um produto, os procedimentos de cálculos para a caracterização e consequente avaliação de impacto do ciclo de vida vêm sendo realizados com o apoio de *softwares*, base de dados e outras ferramentas para a ACV (discutidas no Capítulo 4).

Por fim, a caracterização é o último dos elementos mandatórios da AICV, conforme visto na Figura 6. Como resultado, têm-se os indicadores de resultados das categorias de impacto (perfil da AICV). A partir desta etapa torna-se possível avançar para a última etapa da ACV, a Interpretação. Entretanto, existem os elementos opcionais da AICV que podem ser utilizados e considerados na ACV. Os elementos opcionais podem utilizar informações externas à estrutura da AICV (ABNT, 2009b). São eles: Normalização, Agrupamento e Ponderação.

a) Normalização: A normalização é um item não obrigatório que se mostra interessante quando há a necessidade de se comparar os resultados da AICV de diferentes sistemas analisados em um valor de referência de um sistema base. De acordo com a ISO 14044 (ABNT, 2009b), o objetivo da normalização é entender melhor a magnitude relativa para cada resultado de indicador do sistema de produto em estudo.

De acordo com Matthews, Hendrickson e Matthews (2014) e a ISO 14044 (ABNT, 2009b) a normalização dos resultados da ACV envolve a divisão destes por um valor de referência selecionado. Alguns exemplos de valores de referência são: as entradas e saídas totais para uma dada área, que pode ser global, regional, nacional ou local; as entradas e saídas totais para uma dada área em uma base per capita ou outra medida similar; e, entradas e saídas em um cenário de linha-base, tal como um dado sistema alternativo de produto.

Outra aplicação útil de fatores de normalização é a possibilidade de

fornecimento e comunicação de resultados da AICV para uma das alternativas estudadas como valor de referência (ou para um valor proveniente de um estudo completo previamente realizado em um sistema de produto similar). O valor de referência escolhido pode ser maior ou menor que os resultados da AICV. Por exemplo, qualquer resultado normalizado maior que 1 (um) tem maior impacto que o sistema de referência, ao passo que, resultados menores de 1 (um) têm menor impacto que o sistema base (MATTHEWS, HENDRICKSON e MATTHEWS, 2014).

A Normalização pode ser útil ainda para verificar inconsistências de resultados da AICV e para preparar procedimentos adicionais, tais como agrupamento, ponderação ou interpretação do ciclo de vida (ABNT, 2009b). Desta forma, tem-se o agrupamento como o segundo elemento opcional da ACV.

b) Agrupamento: O agrupamento, como o nome sugere, consiste em agrupar os impactos em uma ou mais categorias para alcançar os resultados definidos no objetivo e escopo do estudo. Se a ACV avalia o produto em termos de uma ou duas categorias de impacto, o agrupamento não se mostra interessante. Entretanto, se a AICV envolve uma grande variedade de categorias de impacto, pode ser útil o agrupamento de impactos para relatar e apresentar resultados aos interessados (MATTHEWS, HENDRICKSON e MATTHEWS, 2014).

Segundo a ISO 14044 (ABNT, 2009b) a reunião de categorias de impacto em conjunto(s), conforme predefinido na definição do objetivo e escopo, pode envolver agregação e/ou hierarquização. A agregação agrupa as categorias de impacto em uma base nominal (por exemplo, por características como entradas e saídas ou escalas espaciais globais, regionais e locais) e a hierarquização classifica as categorias em níveis (por exemplo, alta, média ou baixa prioridade).

De acordo com o Matthews, Hendrickson e Matthews (2014), o agrupamento pode ser feito por triagem e/ou classificação dos resultados da AICV caracterizados ou normalizados. Por triagem, os resultados são agrupados por dimensões de valores, escalas e características de espaço, etc. Por classificação, pode ser realizada uma hierarquia de prioridade de impactos, subjetivamente definida em alta, média e baixa, por exemplo, a fim de colocar os impactos em contexto com o outro. Ainda segundo os autores, uma vez escolhido realizar o agrupamento por classificação (priorização de impactos) este deve ser feito com cuidado e reconhecer que outros envolvidos na ACV (gestores, empresas, governo) podem criar diferentes classes baseados em diferentes prioridades para classificar os impactos.

Diante da última afirmação, nota-se que há um aspecto singular para classificação e agrupamento de impactos na ACV. Uma categoria de impacto pode ser considerada de prioridade alta a uma empresa α , enquanto a mesma categoria de impacto pode ser priorizada como de médio impacto a outra empresa β . Além do agrupamento, é possível atribuir um peso (fator de ponderação) relativo para as categorias de impacto através da ponderação da AICV.

c) Ponderação: O último elemento não obrigatório da AICA é a ponderação. Para a ISO 14044 (ABNT, 2009b, p.22), a “ponderação é o processo de conversão dos resultados de indicadores de diferentes categorias de impacto pela utilização de fatores numéricos baseados em escolha de valores”. É possível converter os resultados dos indicadores ou resultados normalizados com base em fatores de ponderação selecionados, ou agregar esses resultados convertidos dos indicadores ou resultados normalizados entre as diferentes categorias de impacto.

A cada categoria de impacto definida para AICV pode ser atribuído um peso (fator de ponderação) destacando sua importância em relação às demais (PONTES, 2014). A ponderação na ACV é baseada em escolha de valores e não são embasados cientificamente (ABNT, 2009b). Tal fato caracteriza a ponderação como o mais subjetivo dos elementos opcionais da AICV (MATTHEWS, HENDRICKSON e MATTHEWS, 2014).

Igualmente ao agrupamento, a prática de ponderação é subjetiva, apresenta características singulares que geram divergentes resultados para os fatores de ponderação para diferentes autores ou partes envolvidas na ACV (MATTHEWS, HENDRICKSON e MATTHEWS, 2014). Diferentes indivíduos, organizações e sociedades podem possuir preferências diferentes; é possível, portanto, que os diferentes envolvidos na ACV cheguem a resultados de ponderação divergentes com base nos mesmos resultados de indicadores ou resultados normalizados de indicadores (ABNT, 2009b).

Desta forma, entendimentos e interesses singulares de envolvidos em uma ACV geram diferentes níveis de importância na criação e atribuição de pesos para destacar a importância de algumas categorias de impactos perante outras. Segundo a ISO 14040 (ABNT, 2009b), torna-se desejável utilizar métodos de ponderação e conduzir análises de sensibilidade para avaliar as consequências de diferentes pesos

sobre os resultados da AICV. A análise de sensibilidade é um dos itens contemplados na quarta e última fase da ACV, a Interpretação.

3.1.4 Interpretação

A interpretação é a fase da ACV onde as constatações da análise do inventário e/ou da avaliação de impacto são consideradas em conjunto e de forma consistente com o objetivo e o escopo definidos, propondo fornecer conclusões, explicar limitações e prover recomendações (ABNT, 2009a; ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2013). Independentemente, se o estudo envolve a ACV completa ou apenas realiza a análise de inventário de ciclo de vida (como os estudos de Wilson (2010) e Piekarski *et al.* (2014)), a interpretação é uma fase obrigatória.

De modo geral, a interpretação foca nos resultados do estudo de ACV, analisando-os em diferentes perspectivas e cenários para recomendar melhorias e outras mudanças para a minimização de impactos (MATTHEWS, HENDRICKSON e MATTHEWS, 2014). Nesta etapa final há, portanto, uma investigação dos aspectos ambientais mais significativos e sua relação com os fluxos, as unidades de processos e as fases do ciclo de vida do sistema analisado.

A primeira tarefa típica da interpretação é estudar os resultados da ACV para estabelecer conclusões baseadas no ICV e alinhadas com o objetivo e escopo. Uma das mais comuns e importantes ações da interpretação consiste em discutir qual a fase do ciclo de vida que possui maior contribuição para os resultados do ICV (MATTHEWS, HENDRICKSON e MATTHEWS, 2014). O Athena Sustainable Materials Institute (2013) 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 (entradas e saídas) e quais unidades de processo ou fases do ciclo de vida estão contribuindo para manter o valor elevado.

Tal fato se caracteriza como uma espécie de regra de Pareto ou controle da qualidade, onde é possível identificar as questões mais significativas para uma determinada categoria de impacto, de modo a maximizar os resultados de uma possível ação no sistema do produto. As informações geradas na fase de interpretação podem ser utilizadas para refinar a definição do escopo e se

concentrarem nas mais importantes unidades de processo.

A Figura 7 ilustra o relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV.

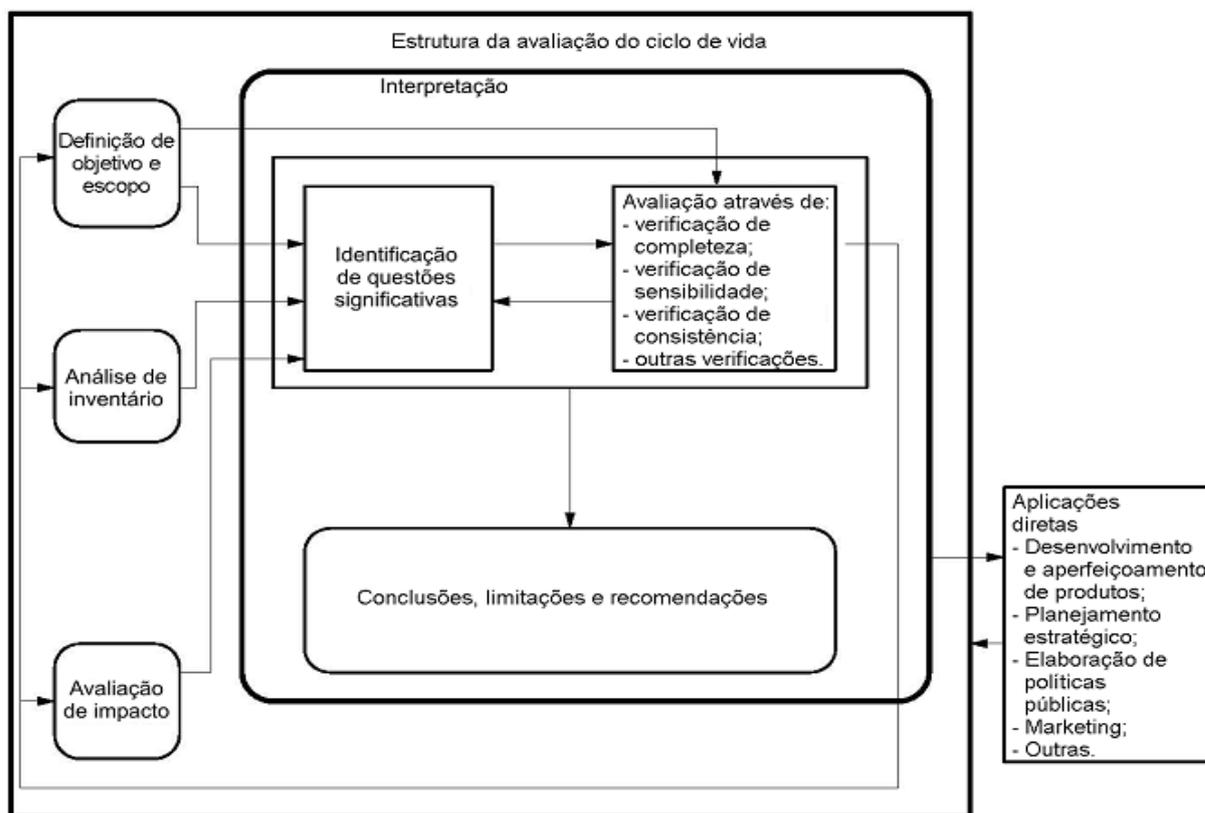


Figura 7 - Relacionamento dos elementos da fase de interpretação com as outras fases da ACV
Fonte: ABNT (2009b)

O inter-relacionamento das fases da ACV com a interpretação, representadas com as setas retro alimentadoras na Figura 7, demonstram a iteratividade da metodologia. É possível chegar à fase de interpretação, por exemplo, e perceber que os dados coletados não ajudam a responder as perguntas traçadas para a ACV. Neste caso, é possível revisar as fases anteriores da ACV. É possível, também, encontrar resultados inesperados na fase de interpretação que tornam difícil chegar a uma conclusão desejável. Para tanto, há a necessidade de adicionar categorias de impactos adicionais, por exemplo. As revisões e modificações em etapas anteriores não é sinal de falha ou fraqueza na condução da ACV, é a maneira prescrita de melhorar o estudo com base na aprendizagem gerada sobre o sistema de produto em questão (MATTHEWS, HENDRICKSON e MATTHEWS, 2014).

Ainda conforme a Figura 7, a fase de interpretação contempla três etapas:

Identificação de questões significativas; avaliação através de verificação de completudeza, sensibilidade e consistência; e, conclusões, limitações e recomendações.

As principais características dessas etapas são exploradas no Quadro 3.

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 utilizados 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 3 - Objetivos das Etapas da fase de interpretação da ACV

Fonte: Adaptado de ISO 14044 (ABNT, 2009b)

Para Matthews, Hendrickson e Matthews (2014), o elemento chave da interpretação é desenvolver uma análise sensível relevante nos resultados. A norma ISO não requer cenários específicos para análises sensíveis como parte da interpretação, mas é necessário fornecer considerações sobre as alterações que variações nos parâmetros de entrada, saída, métodos utilizados (alocações, ponderação, por exemplo) podem causar no resultado final. O uso de agrupamento e os fatores de ponderação (pesos) na fase de AICV, também podem passar por análise de completudeza e consistência, principalmente devido aos aspectos subjetivos envolvidos em tais atividades.

A interpretação busca melhorar a qualidade do estudo de ACV, especialmente a qualidade das conclusões escritas e as recomendações que surgem do trabalho quantitativo. Tal como acontece com outros métodos de análise quantitativa, se faz necessário, também, melhorar as características qualitativas do estudo, incluindo a parte documental da ACV para garantir que o empenho e trabalho alocados na fase de interpretação (e em toda a ACV) sejam respeitados e apresentados de modo transparente aos interessados (MATTHEWS, HENDRICKSON e MATTHEWS, 2014; ABNT, 2009b).

Em geral, uma apreciação crítica e uma avaliação cuidadosa das forças e fraquezas da ACV são essenciais durante a fase de interpretação para que as conclusões, limitações e recomendações resultantes do estudo sejam, de fato, significativas (SIMONEN, 2014).

Realizando uma análise geral da seção de metodologia da ACV, pode-se constatar que, ao longo das quatro fases da ACV, muitas informações, definições e dados são constantemente manipulados e analisados. Um estudo de ACV facilmente contará com milhares de unidades de fluxos de entradas e saídas de um sistema analisado. Neste sentido, através do tempo, foram desenvolvidas ferramentas computacionais para auxiliar no desenvolvimento da ACV e nos procedimentos de cálculos necessários. Base de dados de inventários de ciclo de vida e os métodos de AICV surgem, complementarmente, e continuam prosperando, de modo a promover o avanço e a aprendizagem na área.

Neste contexto, cabe ao próximo capítulo explicar sobre ferramentas computacionais para ACV e bases de dados de inventários de ciclo de vida e métodos para AICV.

4 FERRAMENTAS PARA ACV, BASES DE DADOS E MÉTODOS DE AICV

Este capítulo objetiva apresentar ferramentas computacionais baseadas na metodologia da ACV, revelar as principais bases de dados para inventários de ciclo de vida disponíveis e explicar sobre métodos para avaliação de impactos do ciclo de vida, com destaque aos de abordagem *endpoint*. Entre os conteúdos apresentados neste capítulo, o *software* Umberto v.56, a base de dados Ecoinvent v.2.2 e o método Eco-Indicator 99 foram mais discutidos por serem utilizados na pesquisa.

Conforme observado no capítulo anterior, a realização de uma ACV envolve e requer o acesso a milhares de dados. Para englobar todo o ciclo de vida de um determinado produto é necessário considerar todos os dados desde a extração dos insumos, dos processos de geração de energia elétrica, dos transportes, etc. Os envolvimento das fases do ciclo de vida resultam em uma quantidade de dados de entrada e de saídas do sistema que, facilmente, ultrapassam a casa dos milhares.

Com o intuito de facilitar a condução de estudos de ACV, *softwares* baseados na metodologia de ACV foram desenvolvidos e bases de dados de inventários de ciclo de vida foram criadas com vistas a agrupar e disponibilizar dados para viabilizar estudos de ACV. Da mesma forma, métodos para a avaliação de impactos foram propostos de modo a retratar diferentes peculiaridades em ciclos de vidas. A incorporação das bases de dados e métodos de AICV em *softwares* alavancaram o desenvolvimento mundial da ACV.

Atualmente, os *softwares* para ACV facilitam a estimativa de todos os consumos e extrações de inventários, bem como, os procedimentos de cálculos para caracterização, normalização e ponderação (PEREZ GALARDO, 2013).

O Quadro 4 ilustra os principais *softwares* disponíveis no mercado.

Nome do <i>software</i>	Desenvolvedor	Website
GaBi <i>Software</i>	PE INTERNATIONAL	http://www.gabi-software.com/brazil/index/
OpenLCA	GreenDelta GmbH	http://www.openlca.org/home
SimaPro	PRé Consultants	http://www.pre-sustainability.com/simapro
TEAM	ECOBILAN- PwC	http://ecobilan.pwc.fr/en/boite-a-outils/team.jhtml
Umberto	ifu Hamburg GmbH	http://www.umberto.de/en/

Quadro 4 - Principais *softwares* para ACV
Fonte: Adaptado de Perez Gallardo (2013)

Os *softwares* apresentados no Quadro 4 oferecem interessantes recursos como, por exemplo, a possibilidade de avaliação de cenários e análises sensitivas para o ciclo de vida. Eles possuem interatividade com diferentes bases de dados e com diferentes métodos para avaliação de impactos. Diante dessas características, tais *softwares* são os mais utilizados mundialmente para ACVs.

Globalmente, o SimaPro é, provavelmente, o *software* que mais se apresenta em estudos científicos publicados com acesso a diversos métodos de AICV. O GaBi fornece soluções para avaliar questões ambientais, além de possíveis questões econômicas, sociais e de otimização de processos. O TEAM, por sua vez, permite aplicar métodos de AICV similares ao SimaPro (PIERAGOSTINI *et al.*, 2012). O OpenLCA é um *software* livre para ACV, que também permite trabalhar com bases de ICV, como a Ecoinvent. Por fim, o *software* Umberto, selecionado para a realização das ACVs envolvidas nesta tese, é apresentado detalhadamente na seção seguinte.

Existem, ainda, outras soluções e ferramentas computacionais baseadas na metodologia de ACV disponíveis. Entre elas, pode-se mencionar: BEES 4.0; The Boustead Model 5.0; CMLCA; ECO-it 1.4; Economic Input-Output Life Cycle Assessment; The Environmental Impact Estimator; GEMIS (Global Emission Model for Integrated Systems); GREET Model; IDEMAT; LLamasoft; LCAiT 4; LCAPIX; SPINE@CPM; REGIS; MIET 3.0; IVAM LCA Data 4.0; EcoScan 3.0; Windchill LCA; Quantis Suite 2.0; WISARD (GLORIA, 2014; LEVIN, 2014).

4.1 O SOFTWARE UMBERTO

O *software* Umberto é uma ferramenta computacional para modelar, calcular e visualizar avaliações de ciclo de vida e Análises de Fluxo de Materiais (AFM) para sistemas de produtos ou sistemas. O *software* foi desenvolvido por especialistas de ACV do Instituto de Pesquisa Ambiental e Energética de Heidelberg juntamente com especialistas de computação do Instituto de Informática Ambiental da Universidade de Hamburgo (IFEU, 2014).

O *software* Umberto fornece o acesso a diversas bibliotecas de dados e pode ser utilizado para analisar variados cenários e identificar os processos produtivos mais ecologicamente sensíveis. Os resultados gerados pelo *software* podem ser avaliados

utilizando indicadores de performance ambiental e econômica visando a otimização de processos e alavancando a competitividade (PIERAGOSTINI *et al.*, 2012).

Entre os *softwares* para ACV na Europa e na Alemanha, o Umberto é um dos líderes. Ele é aplicado por diversas empresas, consultorias, universidades, pela Agência Federal do Meio Ambiente da Alemanha e por institutos de pesquisa (IFEU, 2014). Desde sua primeira versão, lançada na década de 90, o Umberto vem sendo aprimorado e sofre atualizações periódicas para alcançar novas demandas da teoria e prática da ACV. Mundialmente, os estudos científicos publicados que utilizaram o *software* Umberto para ACVs envolvem as versões 5.5 e 5.6.

O Umberto trabalha com o processo de operacionalização e modelagem de fluxos baseada nas redes de Petri, possuindo como princípios básicos três tipos de componentes: transições, lugares e setas/fluxos.

A Figura 8 apresenta os elementos básicos da modelagem de sistemas no Umberto.

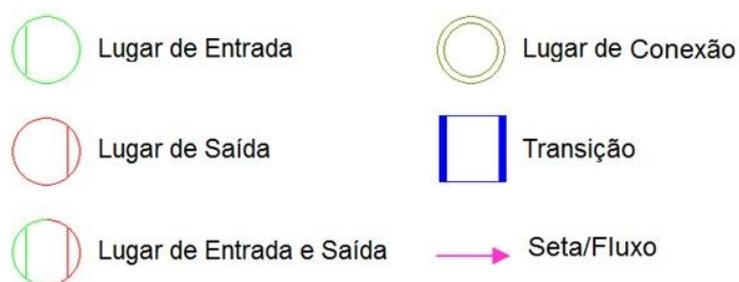


Figura 8 - Representação de componentes da modelagem do Umberto
Fonte: Piekarski (2013)

Os elementos são conectados uns aos outros através das setas/fluxos. Os locais (*places*) são representados por círculos e podem ser definidos como locais de entrada, saída, entrada e saída, e conexões. Transformações de materiais não ocorrem nesses locais, uma vez que eles são destinados para alocar insumos e resíduos do processo analisado. Cada processo deve possuir locais para as entradas (inputs) e saídas (outputs) de materiais. As conexões são utilizadas apenas para ligar dois processos, onde a quantidade de material que chega é igual à quantidade que sai, não há armazenamentos. Por fim, as transições são os processos onde ocorrem as transformações. Nas transições são especificadas as entradas e saídas para ocorrer determinada transformação do sistema do produto analisado.

O acesso aos dados de inventários de ciclo de vida são os elementos mais importantes quando se trabalha com *softwares* para ACV. O Umberto disponibiliza o

acesso às duas maiores bases de dados de ICV: a Ecoinvent e a GaBi (UMBERTO NXT, 2014).

A seção seguinte discute sobre bases de dados para ACV.

4.2 BASE DE DADOS DE ICV E O ECOINVENT

O desenvolvimento de bases de dados de inventários de ciclo de vida é imprescindível para o desenvolvimento da metodologia e para a aplicabilidade em diferentes contextos. Atualmente, existem diferentes bases de dados para estudos de ACV. Entre as mais conhecidas estão:

- a) Ecoinvent (<http://www.ecoinvent.org/>)
- b) GaBi (<http://www.gabi-software.com/databases/gabi-databases/>)
- c) ELCD - European reference Life Cycle Database (<http://eplca.jrc.ec.europa.eu>)
- d) NREL/U.S. Life-Cycle Inventory database (<https://www.lcacommons.gov/nrel/search>)
- e) IDEMAT (<http://www.idemat.nl/>)
- f) Athena (<http://www.athenasmi.org/our-software-data/lca-databases/>)
- g) Gemis (<http://www.gemis.de/>)

Todas as bases de dados acima apresentadas são internacionais. As bases europeias que mais se destacam são a Ecoinvent, a GaBi e a ELCD, ao passo que, a base não europeia mais conceituada é a norte-americana NREL/U.S.

No Brasil, há uma iniciativa do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT) para o desenvolvimento de uma base de dados brasileira para inventários de ciclo de vida. Durante o Seminário Diálogos Setoriais em ACV, ocorrido em 7 de novembro de 2014, foi firmado o projeto de continuidade no desenvolvimento de inventários brasileiros. No seminário também foi ratificado que o formato para o banco de dados de ACV brasileiro é o ILCD - Rede Internacional de Ciclo de Vida, coordenado pela JRC Comissão Europeia (IBICT, 2014).

Enquanto não existe um inventário nacional consolidado para estudos de ACV, se faz necessário utilizar base de dados internacionais. Neste sentido, a base de dados utilizada para a realização das avaliações desta tese é a Ecoinvent.

A Ecoinvent é a base mais atualizada e de maior consistência e transparência em ICVs. A base é hospedada pelo *Swiss Centre for Life Cycle Inventories (Ecoinvent Centre)*, fornece os inventários internacionais mais completos, de alta qualidade, com dados coletados em indústrias e compilados por institutos de pesquisa renomados internacionalmente e consultores de ACV (ECOINVENT, 2014).

Pieragostini *et al.* (2012) afirmam que, certamente, a base de dados Ecoinvent disponibiliza acesso a várias unidades de processos, assim como, a inventários que contemplam variadas áreas industriais e atividades econômicas.

Existem dados das áreas de agricultura, fornecimento de energia, transportes, biocombustíveis e biomateriais, produtos químicos, materiais de construção e embalagem, metais básicos e preciosos, processamento de metais, tratamento de resíduos, entre outras. Os dados da base estão disponíveis no formato ecoSpold2 e apresentam-se disponíveis em todas as principais ferramentas computacionais de ACV e de *software* de *design* ecológico (ECOINVENT, 2014; WEIDEMA *et al.*, 2013).

Além da disponibilização dos inventários de ciclo de vida de diferentes processos e atividades, a base de dados Ecoinvent disponibiliza, também, os principais métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida. Neste sentido, a próxima seção aborda sobre os métodos de AICV.

4.3 MÉTODOS PARA AICV

Conforme abordado anteriormente, os métodos para avaliação de impacto do ciclo de vida são utilizados durante a terceira fase da ACV – a Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida. A seleção de um método está intimamente relacionada aos objetivos e ao escopo da ACV e é dependente de questões como: as categorias de impactos que devem ser analisadas, o tipo de abordagem na análise de impactos (*midpoint* ou *endpoint*), o método que possui a caracterização mais adequada para a realidade do estudo, entre outras. De modo a discorrer sobre tais características envolvidas na escolha dos métodos, esta seção aborda um panorama geral sobre os métodos de AICV e aprofunda-se no método utilizado para a realização das avaliações de impactos envolvidas na tese.

Os diferentes métodos de AICV apresentam características individuais e podem apresentar resultados de categorias de impacto classificadas em duas abordagens:

midpoint (ou ponto médio) e *endpoint* (ou ponto final). A categoria de impacto *midpoint* é também chamada de abordagem orientada ao problema, ao passo que, a categoria *endpoint* é conhecida como abordagem orientada ao dano.

Ao nível *midpoint* todas as entradas e saídas do inventário são adequadamente agregadas em categorias de impacto de acordo com uma característica comum na cadeia de causa-efeito do mecanismo ambiental. Tais características não representam as consequências/danos finais sobre o percurso ambiental, mas são indicadores de impacto em potencial como mudança climática, acidificação, toxicidade humana, etc. (CAVALETT *et al.*, 2012).

Por outro lado, a abordagem *endpoint* caracteriza a gravidade ou as consequências das categorias de impacto orientadas ao problema (*midpoint*) nas áreas de proteção orientadas ao dano final (*endpoint*). Como exemplos de categorias *endpoint* estão: a saúde humana, ambiente natural e os recursos naturais. Esta caracterização a nível *endpoint* exige que se modelem 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 relacionadas ao inventário (CAVALETT *et al.*, 2012).

Neste sentido, a Figura 9 ilustra os caminhos de impactos de uma ACV.

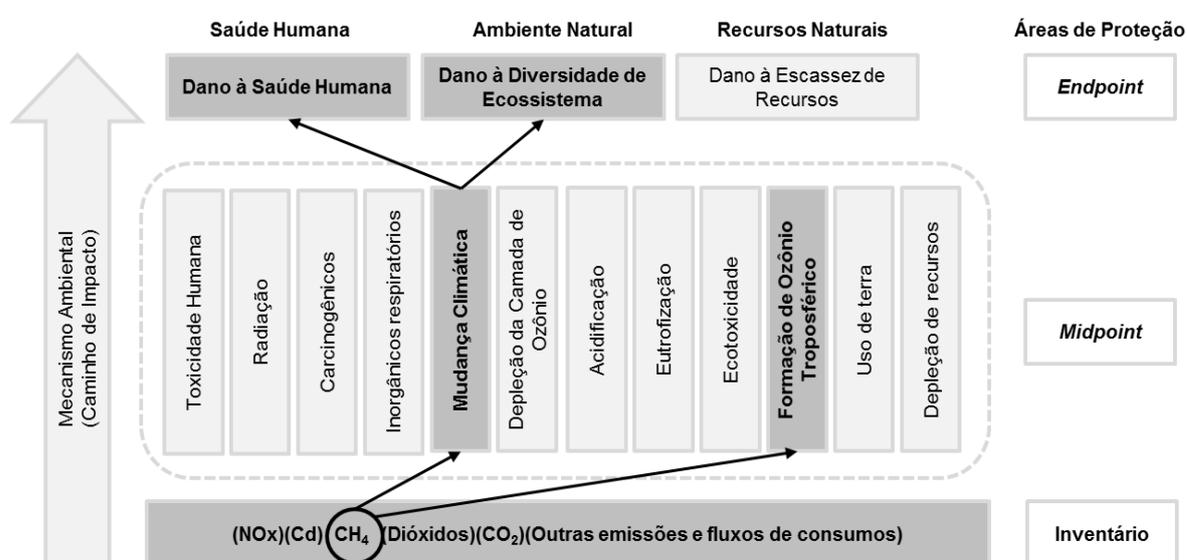


Figura 9 – Caminhos ilustrativos de impactos na ACV
 Fonte: Adaptado de ILCD (2010b) e Souza *et al.* (2014)

A representação gráfica da Figura 9 estabelece a hierarquia de causa e efeito

de inventários de ciclo de vida. Por exemplo, se existe um aumento na emissão de CH₄, esse aumento em uma emissão do inventário irá contribuir para a mudança climática, que gerará efeitos negativos para a saúde humana e para o ambiente natural (SOUZA *et al.*, 2014).

As áreas de proteção envolvidas na ACV com abordagem *endpoint* dependem do contexto da decisão e são definidas pelo objetivo e escopo do estudo. Para um determinado estudo, pode ser importante conhecer os danos apenas à saúde humana, por exemplo. Baseado na interligação dos caminhos de impacto é possível observar um grupo específico de categorias de impacto que afeta cada uma das áreas de proteção analisadas no estudo (SOUZA *et al.*, 2014).

De todo modo, as categorias de impactos de *midpoint* irão provocar os efeitos descritos nos impactos *endpoints*. Esse é o motivo pelo qual em um estudo de ACV não é possível combinar impactos de *midpoint* e *endpoint*, essa prática geraria redundância na avaliação de impactos (SOUZA *et al.*, 2014).

Na prática, quando se deseja avaliar um grande número de categorias de impactos diferenciadas, com acurácia e precisão no resultado de cada categoria, é preferível utilizar impactos *midpoints* (ILCD, 2010b; SOUZA *et al.*, 2014). Os impactos *midpoints* possuem relevância ambiental específica à determinada categoria de impacto, no entanto, os mesmos poderiam ser condensados utilizando métodos *endpoint* para gerar conhecimentos e referências a um tomador de decisão (BARE *et al.*, 2000).

A abordagem *endpoint* torna-se mais interessante sempre quando se deseja compactar os resultados da ACV em poucas categorias de impactos. Neste caso, não há a necessidade de trabalhar separadamente com a relevância ambiental de cada indicador de categoria, já que os indicadores *endpoint* são mais amplos, genéricos e compreensíveis aos tomadores de decisão (BARE *et al.*, 2000). Além de que, como comentado anteriormente, os impactos *endpoints* são derivados dos impactos *midpoint*.

De forma a ilustrar os principais métodos de AICV que possuem abordagens *midpoint*, *endpoint*, e ambas, é apresentado o Quadro 5. Mundialmente, os métodos apresentados no quadro são os mais citados e aplicados em estudos de ACV (ILCD, 2010a).

		Método	Características básicas	Referências do método
Abordagens	Midpoint	CML 2002	É o método mais utilizado em abordagens <i>midpoints</i> e apresenta uma ampla lista de categorias de avaliação de impactos.	Guinée <i>et al.</i> , 2002
		EDIP 1997	Abordagem típica midpoint, abrange a maioria dos impactos relacionados a emissões, uso de recursos e impactos no meio ambiente de trabalho.	Wenzel <i>et al.</i> (1997)
		EDIP 2003	É uma evolução do EDIP 97, entretanto não o substitui. A versão 2003 apresenta um modelo de caracterização diferenciado espacialmente. Recomenda-se que seja usado como uma alternativa para ao EDIP97 em uma caracterização local.	Hauschild e Potting (2005)
		LUCAS	Fornece uma metodologia para AICV adaptada ao contexto canadense	Toffoletto <i>et al.</i> (2007).
		MEEuP	Permite avaliar produtos que consomem energia e cumprem critérios que os tornam elegíveis para implementação de medidas de concepção ecológica.	Kemna <i>et al.</i> (2005).
		TRACI	É um método de avaliação de impacto que representa as condições dos EUA/EPA.	Bare <i>et al.</i> (2003)
		USEtox	Fornece fatores de caracterização para toxicidade humana e ecotoxicidade na AICV. É o método mais completo em termos de requisitos toxicológicos.	Rosenbaum <i>et al.</i> (2008).
	Endpoint	Eco-Indicador 99	É o mais utilizado em abordagens <i>endpoints</i> . Realiza caracterização e avaliação dos danos sobre saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos; possui normalização e valoração dos impactos.	Goedkoop <i>et al.</i> (1998); Goedkoop; Efftig; Collignon, (2000)
		Ecopoints	Fornece caracterização e fatores de ponderação de várias emissões e extrações com base em metas de políticas públicas e objetivas. É sueco.	Brand <i>et al.</i> (1998), Frischknecht <i>et al.</i> (2009).
		EPS	Ajuda designers e desenvolvedores de produtos em apoio à decisão.	Steen (1999); Steen (2001)
		Pegada Ecológica	Fornece um indicador da área biológica produtiva para fatores de demanda humana.	Wackernagel (2005)
	Midpoint/Endpoint	Impact 2002+	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 <i>et al.</i> (2003)
		LIME	Desenvolve listas de <i>midpoint</i> (caracterização), <i>endpoint</i> (avaliação de danos) e a ponderação que reflete as condições ambientais do Japão.	Itsubo <i>et al.</i> (2004)
		ReCiPe 2008	A metodologia é harmonizada em termos de princípios de modelagem e escolhas, oferecendo resultados orientados a problemas e a danos.	Goedkoop <i>et al.</i> (2009)

Quadro 5 – Abordagens e métodos para AICV
Fonte: Adaptado de ILCD (2010a) e ECOINVENT (2010)

Dentre os métodos apresentados no Quadro 5, destaque para o que se refere à abordagem *midpoint*, o método holandês CML 2002. O método fornece as melhores

práticas para operacionalização de indicadores *midpoint* seguindo a série de normas ISO 14040 (ILCD, 2010a).

No que se refere à abordagem *endpoint*, o mais renomado dos métodos é o Eco-indicator 99. Este foi o primeiro método de AICV que permitiu a alocação de toda a carga ambiental do ciclo de vida de um produto em uma pontuação única (GOEDKOOPE; EFFTING; COLLIGNON, 2000). O Eco-indicator 99 foi desenvolvido com objetivo de simplificar a interpretação e a ponderação dos resultados. Uma das intenções no desenvolvimento do método foi a necessidade de calcular uma pontuação de eco indicador única para ser utilizada por profissionais no cotidiano de tomada de decisões (ILCD, 2010a).

Os métodos EPS e Eco-indicator 95 (seus precursores) foram importantes fontes de informações e conhecimentos para o desenvolvimento do Eco-indicator 99 que, por sua vez, foi ponto de partida para o desenvolvimento de métodos como o LIME (no Japão), Impact 2002+ e o ReCiPe 2008 (ILCD, 2010a). Tais métodos trabalham com implementação combinada entre as abordagens *midpoint* e *endpoint*.

Os métodos de abordagem combinada realizam a tradução dos dados inventariados em categorias de impacto orientadas ao problema ou em categorias de impacto orientadas ao dano. O LIME, o Impact 2002+ e o ReCiPe 2008 são métodos mais recentes e foram adaptados dos modelos de caracterização do CML 2002 (para *midpoint*) e do Eco-indicator 99 (para *endpoint*) (ILCD, 2010a).

Apesar da data de concepção e de seus aspectos construtivos, cada método desenvolvido possui suas particularidades e singularidades. O Eco-indicator 99, por exemplo, considera onze (11) categorias de impactos que são agregadas em três categorias de *endpoint*: saúde humana, qualidade de ecossistema e recursos (GOEDKOOPE; EFFTING; COLLIGNON, 2000). Já o método ReCiPe considera 18 categorias de impacto que são agrupadas e convertidas nas mesmas três categorias *endpoint*. Independente de possuir abordagem *midpoint* ou *endpoint*, a escolha do método para a ACV depende, exclusivamente, dos objetivos e das premissas delineadas para o estudo.

Neste trabalho, como os resultados gerados na ACV são qualificados como critérios de apoio à tomada de decisão no modelo desenvolvido, torna-se conveniente a utilização da abordagem *endpoint* para o método de AICV.

4.3.1 Métodos com abordagem endpoint

Os indicadores de categorias de impacto *endpoint*, quando comparados aos *midpoint*, possuem relativamente maior relevância ambiental, pois são mais amplos, permitem agregação de diferentes efeitos e são mais compreensíveis aos tomadores de decisões. Entretanto, possuem maior incerteza inerente aos resultados dos indicadores (BARE *et al.*, 2000; JOLLIET *et al.*, 2004; REAP *et al.*, 2008; BARE, 2010; ILCD, 2010a; SCHRYVER, 2010).

Devido a não convergência para um método ideal, diversos estudos de ACV têm realizado a avaliação utilizando mais de um método de AICV para interpretações mais consistentes dos resultados da ACV. Especificamente na abordagem *endpoint*, estudos (WERNET *et al.*, 2000; FANTOZZI e BURATTI, 2010; PIERAGOSTINI; AGUIRRE; MUSSATI, 2014; LUCAS; BEZZO; CARVALO, 2014) têm utilizado e comparado os resultados entre os três principais métodos discutidos na literatura: Eco-indicator 99, IMPACT2002+ e ReCiPe.

O Quadro 6 apresenta os princípios gerais desses três métodos de AICV. Inicialmente, quanto aos propósitos dos métodos apresentados no Quadro 6, os métodos Impact 2002+ e o ReCiPe objetivam combinar as abordagens *mid/endpoint* no mesmo método, ao passo que, o Eco-indicator 99 objetiva trabalhar como *endpoint*, facilitando trabalhar com painéis de ponderação.

Quanto à validade geográfica, os métodos possuem categorias de impacto com validade global e outras com validades europeias. Como não existem modelos genéricos de caracterizações de impactos no Brasil, é uma prática assumir fatores de caracterização internacionais para viabilizar a ACV. Quanto à validade temporal, o método Eco-Indicator 99 e o ReCiPe expõem os resultados no tempo presente, ao passo que o Impact 2002+ não considera aspectos temporais na caracterização.

No que se refere aos impactos *midpoint* (que irão compor as categorias de impacto *endpoint*), o Eco-Indicator 99 é composto por 11 categorias, o Impact 2002+ por 14, e o ReCiPe possui 18 categorias envolvidas. Entre as categorias de impacto *midpoint* destacam-se algumas particularidades como: o impacto de potencial carcinogênico (abordado apenas pelo Eco-Indicator 99), energia de fonte não renovável (abordado apenas pelo Impact 2002+) e formação de material particulado (abordado apenas pelo ReCiPe 2002+).

	Métodos Endpoint		
Princípios Gerais	Eco-Indicator 99	Impact 2002+	ReCiPe
Propósito da metodologia	Desenvolver um método endpoint que pode ser utilizado em qualquer ACV, com atenção especial à facilitação de painéis de ponderação.	Fornecer uma abordagem combinada de midpoint/endpoint, agrupando todos os resultados de ICV.	Combinar metodologias midpoint e endpoint em um meio consistente
Validade geográfica	Categorias de impacto globais para mudança climática, depleção do ozônio e recursos. Modelo europeu para demais categorias de impacto	Europeia para versão básica. Versão multicontinental disponibilizada por Rochat <i>et al.</i> (2006).	Categorias de impacto globais para mudança climática, depleção do ozônio e recursos. Modelo europeu para outras categorias de impacto.
Validade temporal	Presente	Modelo Linear independente de constantes temporais.	Presente
Impactos midpoint englobados	Mudança Climática, depleção da camada de ozônio, acidificação/eutrofização (combinados); potencial carcinogênico; efeitos respiratórios orgânicos; efeitos respiratórios inorgânicos; radiação inorgânica; ecotoxicidade; uso do solo; recursos minerais; recursos fósseis.	Toxicidade Humana, efeitos respiratórios, radiação iônica, depleção da camada de ozônio, formação fotoquímica oxidante, ecotoxicidade aquática, ecotoxicidade terrestre, eutrofização aquática, acidificação e eutrofização terrestre, uso do solo, aquecimento global, energia de fonte não renovável, extração mineral.	Mudança climática, depleção da camada de ozônio, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, eutrofização marinha, toxicidade humana, formação fotoquímica oxidante, formação de material particulado, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, radiação iônica, ocupação de solo para agricultura, ocupação de solo para área urbana, transformação de solo natural, depleção de recursos fósseis, depleção de recursos minerais, depleção de recursos de água doce.
Impactos endpoint englobados	Saúde humana, Qualidade de ecossistema e depleção de recursos	Saúde Humana, Qualidade de ecossistema, mudança climática e recursos	Saúde humana, Qualidade de ecossistema e depleção de recursos

Quadro 6 – Princípios Gerais dos principais métodos *endpoint*

Fonte: Adaptado de ILCD (2010a)

A respeito dos impactos *endpoint* do Quadro 6, as categorias dos três métodos são derivadas do Eco-indicator 99. Portanto, todos os métodos convergem os impactos orientados ao problema para as categorias de danos à saúde humana, qualidade de ecossistema e depleção de recursos. Apenas o método Impact 2002+ possui uma quarta categoria *endpoint*, a mudança climática.

Vale ressaltar que, por mais que o Impact 2002+ e o ReCiPe sejam métodos mais atuais e que envolvem mais informações no modelo, o Eco-Indicator 99 é o mais aplicado aos estudos de ACV de diferentes áreas (PIERAGOSTINI *et al.*, 2012; MARTINÉZ *et al.*, 2015) e é, também, considerado o método mais compreensível para a abordagem orientada ao dano (*endpoint*) (PIERAGOSTINI *et al.*, 2012).

O fato de ser o mais aplicado também está relacionado à facilidade que o método objetiva perante a necessidade de se trabalhar com os painéis de ponderação. Painéis de ponderação são matrizes elaboradas para constituir os pesos e normalizar diferentes categorias de impacto de acordo com opiniões de pessoas sobre o que é mais importante (HUPPES; VAN OERS, 2011). Brilhuis-Meijer (2014) afirma que os painéis de ponderação sejam, possivelmente, a forma mais simples de determinar fatores de ponderação. Um ponto sensível desse tipo de análise é a singularidade nas opiniões, os resultados podem ser facilmente controversos pelas características pessoais dos envolvidos no painel.

Neste enlace, Soares *et al.* (2006) enfoca que o Eco-Indicator 99 é, de fato, um método que utiliza a abordagem de painel para ponderação das categorias de impacto e, por isso, existem várias possibilidades para gerar as ponderações. No entanto, devido à subjetividade no processo de julgamento de valor (ponderação) entre diferentes pessoas, empresas, organizações e comunidades e, devido à utilização de pressupostos cientificamente discutíveis, o autor afirma que continuará existindo a dificuldade de criação de um modelo de aplicação universal.

Diante do exposto e perante um cenário de necessidade de compactação de resultados de impactos em uma abordagem *endpoint* para apoiar e facilitar decisões baseadas em ACVs, diferentes pesquisadores e estudiosos estão permeando conhecimentos de áreas distintas para propor alternativas, modelos e ferramentas facilitadoras às decisões. Neste âmbito, o próximo capítulo apresenta interseções de conhecimentos e pesquisas entre a ACV e tomadas de decisão que envolvem uma gama de critérios fundamentais no processo decisório.

5 ACV E A PERSPECTIVA MULTICRITÉRIO PARA DECISÕES

Este capítulo objetiva contextualizar a ACV juntamente com a temática de tomadas de decisões com abordagem multicriterial e seus métodos. As possibilidades provenientes dos resultados da ACV são inúmeras, principalmente, quando a ACV é consequencial e de caráter comparativo. A análise entre diferentes cenários permite identificar os pontos potenciais (*hotspots*) de impacto e a eficiência das ações para a melhora do desempenho ambiental do produto.

Neste sentido, a ACV no ambiente corporativo pode ser amplamente utilizada como uma ferramenta de tomada de decisão na seleção, no *design* e na otimização de processos com o objetivo de identificar tecnologias e produções mais limpas (DEL BORGHI *et al.*, 2007). A busca por um objetivo de minimização de impactos ambientais de um produto está atrelada a uma infinidade de outros fatores corporativos, tais como: restrições econômicas, sociais, técnicas, tecnológicas, etc.

De modo a exemplificar tal fato, pode-se considerar que os resultados de uma ACV revelam que a principal matéria-prima de um produto (que representa, hipoteticamente, 30% de todo o custo de fabricação do produto) é a que mais contribui para o aquecimento global no ciclo de vida. Existe uma possibilidade para a empresa que é substituir tal matéria-prima por outra considerada “verde”, entretanto, o custo da nova matéria-prima será o dobro da atual e aumentará o impacto na categoria de uso de solo. Neste caso, surgem dois *trade-offs*: desempenho ambiental *versus* custo do produto, e impacto de aquecimento global *versus* impacto no uso de solo.

Se a empresa optar pela substituição de sua principal matéria-prima, ela irá melhorar seu desempenho ambiental na categoria de aquecimento global, mas também, irá elevar consideravelmente seu custo de fabricação e o impacto no uso de solo. O aumento no custo de fabricação poderá refletir diretamente no percentual de vendas do produto, na parcela de mercado que a empresa atualmente possui e, conseqüentemente, na competitividade da empresa.

Ao que se refere, estreitamente, aos *trade-offs* entre categorias de impactos ambientais, pode-se afirmar que é um fato corrente quando se utilizam abordagens *midpoint*. O uso de abordagens *endpoint*, como visto anteriormente, facilita o processo de tomada de decisão pelo fato da condensação dos resultados em indicadores e/ou índices, devido à possibilidade de incluir a subjetividade e a singularidade do(s)

decisor(es) como fatores de ponderação entre as categorias de impactos da ACV (SOARES *et al.*, 2006).

A definição de fatores de ponderação na ACV pode ser realizada pela prática de painéis de ponderação (ou painéis de especialistas), que são procedimentos baseados em valores que retomam preferências de um ou mais decisores perante as categorias de impacto ambiental (VOLKWEIN *et al.*, 1996). Neste sentido, por existirem diversos fatores e critérios a serem considerados neste processo decisivo, Soares *et al.* (2006) e Boivonsin (2014) valorizam a consideração dos impactos ambientais perante uma perspectiva multicritério para a formação de relações de troca em um modelo decisório, por exemplo, a utilização do procedimento trade-off, swing weights e MACBETH.

A perspectiva multicritério para apoio à decisão, geralmente, envolve mais de um único decisor. Ensslin, Montibeller Neto e Noronha (2001) afirmam que os atores (*stakeholders*) do processo decisório multicritério são aquelas pessoas, grupos e instituições que têm uma posição perante as decisões a serem tomadas. Os autores classificam os atores em dois grandes grupos: os intervenientes e os agidos.

Segundo Ensslin, Montibeller Neto e Noronha (2001), os intervenientes são aqueles atores que, por ações intervencionais, participam diretamente do processo decisório de modo a fazer prevalecer seus sistemas de valores. Os intervenientes podem ser classificados em três grupos de atores:

- a) Decisores: São aqueles a quem foi formalmente ou moralmente delegado o poder da decisão. Normalmente é a pessoa com maior responsabilidade pelos resultados (bons ou ruins) que envolvem a decisão tomada.
- b) Representantes: São os atores incumbidos pelo decisor para representá-lo e auxiliá-lo no processo de apoio à decisão.
- c) Facilitador: É o ator responsável por facilitar e apoiar o processo de decisão através da construção de modelos construídos com tal finalidade. O facilitador é considerado um ator do processo decisório, pois ele nunca será neutro no processo, influenciando os demais intervenientes na construção e condução do modelo.

Por sua vez, os agidos são aqueles atores que sofrem as consequências da decisão tomada de forma passiva. Por mais que não se envolvam diretamente no

processo decisório, os mesmos podem exercer pressões sobre os intervenientes e seus juízos de valor (ENSSLIN, MONTIBELLER NETO e NORONHA, 2001).

Soares *et al.* (2006) afirmam que as principais práticas ou referências para se trabalhar com julgamento de valores (ponderações) em ACVs são fornecidos por métodos multicritérios bem conhecidos, como o AHP (*Analytic Hierarchy Process*), MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique*) ou MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*), e podem inclusive, ser trabalhados com o método Eco-Indicator 99. Tais métodos são os mais observados em casos de ponderação de impactos da ACV, pois possuem elementos precisos de auxílio à decisão e possibilitam avaliar a importância relativa das categorias de impacto.

Os métodos multicritérios podem ser classificados de diversos modos. De acordo com a abordagem, o AHP, o MACBETH e o MAUT são classificados como métodos de critério único de síntese. Neste tipo de classificação, os métodos reúnem diferentes pontos de vista em uma única função de síntese, em um modelo aditivo, e quando os critérios são compensatórios. Ou seja, quando a desvantagem de um critério é suprida pela vantagem de outro critério (*trade-offs*) (ROY, 1996).

Em geral, os modelos aditivos são os mais utilizados entre os métodos multicritérios. Vale ressaltar que, nos modelos aditivos, o significado do grau de importância para a obtenção dos “pesos” associa-se à “taxa de substituição” que traduz uma ideia de compensação de ganho em um critério, quando acaba se perdendo em outro (ALMEIDA, 2011). Portanto, para o modelo desenvolvido neste trabalho é utilizado o termo “taxa de substituição” ao invés de “peso”.

Estudos têm sido desenvolvidos e publicados em periódicos de alto impacto com análises e discussões sobre a aplicação de métodos multicritérios juntamente à metodologia da ACV. Entre eles, destacam-se os trabalhos de Soares *et al.* (2006); Rowley *et al.* (2012); Herva e Roca (2013); Cinelli, Coles e Kirwan (2014); e Wang, Chan e Li (2015). Observa-se que as particularidades do objetivo e escopo de cada estudo de ACV influenciam diretamente na adoção do(s) método(s) multicritério que podem ser utilizados para ponderação na AICV.

O método AHP é, em geral, o mais utilizado para soluções de problemas com priorização de alternativas em diversas áreas. O método requer do avaliador, quando xPy , um juízo cardinal, qualitativo ou quantitativo, sobre o número de vezes que x é preferível a y (um *ratio judgement*) (BANA E COSTA, 2013). O AHP possui uma

metodologia baseada em hierarquia de processos, onde o problema é decomposto hierarquicamente em níveis diferentes que compõem objetivos, critérios, subcritérios e alternativas. Os elementos de um dado nível hierárquico são comparados em pares para avaliar suas preferências relativas perante elementos do próximo nível superior da hierarquia. A intensidade das preferências entre dois elementos é estabelecida na escala Saaty de 1 a 9, onde 1 indica igual preferência e 9 indica preferência absoluta. Ao final, o método fornece um valor entre 0 e 1 onde as taxas de substituição indicam os *trades-off* entre os critérios (POHEKAR E RAMACHANDRAN, 2004; HERVA; ROCA, 2013)

Por sua vez, o MAUT é um método que objetiva determinar as preferências do decisor na forma de funções de utilidade. A função utilidade é determinada por meio de uma metodologia estruturada e fundamentada na estrutura axiomática da teoria da utilidade. O decisor especifica parâmetros ou condições que influenciam o processo de decisão por meio de dedução (edução). A função utilidade pode ser obtida por meio da dedução direta com perguntas feitas pelo analista sobre as preferências do gestor. O método é indicado para problemas com poucas consequências já que o grau de subjetividade envolvido é bastante alto (GOMES *et al.*, 2006).

O terceiro método discutido é o MACBETH. Acrônimo de *Measuring Attractiveness by a Category Based Evaluation Technique*, o MACBETH é um método de apoio à decisão que permite avaliar opções levando em conta múltiplos critérios. Distingue-se de outros métodos multicritérios por basear a ponderação dos critérios e a avaliação de diferentes opções em julgamentos qualitativos sobre diferenças de atratividade entre eles (BANA E COSTA; ÂNGULO-MEZA; OLIVEIRA, 2013).

A seção seguinte apresenta, de modo mais detalhado, as características do MACBETH.

5.1 MÉTODO MULTICRITÉRIO: MACBETH

O objetivo envolvido na conceituação do MACBETH é permitir mensurar atratividade ou valores de diferentes opções através de um modelo de questionamento par-a-par não numérico, baseado em sete categorias qualitativas de juízo para diferenças entre atratividades: indiferente, muito fraca, fraca, moderada,

forte, muito forte, ou extrema. A distinção chave do MACBETH perante outros métodos de mensuração de valor numérico é que o mesmo utiliza apenas julgamentos qualitativos para diferenciar atratividades e gerar, através de programação matemática, pontuações para as opções e ponderações de critérios (BANA E COSTA *et al.*, 2012).

Chaves e Gomes (2014) afirmam que outra diferença entre o MACBETH e outros métodos multicritério é que o MACBETH requer apenas julgamentos qualitativo-verbais sobre as diferenças de atratividade entre elementos para, desta forma, fornecer pontuações para as opções em cada critério e ponderar os critérios através das chamadas taxas de substituição.

Neste sentido, Hurson e Siskos (2014) apresentam outra grande justificativa que confirma a utilização do método neste trabalho através da afirmação que o MACBETH é uma técnica promissora para superar dificuldades em decisões que envolvem *trade-offs* entres critérios econômicos, políticos e sociais em ambientes reais de decisão, onde normalmente esforços cognitivos são necessários.

Ensslin *et al.* (2010) afirmam que o MACBETH é unicamente um método que pode ser utilizado mediante uma necessidade de transformar escalas ordinais em cardinais, a partir de juízos absolutos sobre a diferença de atratividade entre duas alternativas e não é caracterizado como uma metodologia sistemática de apoio à decisão como AHP, MCDA, MAUT, MAVT, SMART. Neste caso, os autores revelam que o MACBETH é utilizado em consonância com outras metodologias para que se possam conhecer as diferenças de atratividade entre níveis de escala.

Neste enlace, destaca-se o uso do MACBETH aliado ao MCDA-C (Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão Construtivista) (ENSSLIN *et al.*, 2010). Bana e Costa *et al.* (2013) e Bana e Costa *et al.* (2012) apresentam diversos artigos científicos e teses de doutorado que utilizam do MACBETH juntamente a MCDA-C para avaliação de desempenhos. Bana e Costa *et al.* (2013) afirmam ainda que no Brasil, o MACBETH tem sido aplicado nos setores de agricultura, manufatura, meio ambiente, saúde e serviços; em problemas de priorização, seleção, alocação de recursos, avaliação de desempenho e gestão de conflitos.

Especificamente com a metodologia ACV, as principais discussões são dadas pelo uso do MACBETH para fins de ponderação dos resultados da AICV (SOARES *et al.*, 2006). Não foram encontrados estudos científicos já publicados que utilizam o

MACBETH para conhecer diferenças de atratividades entre os resultados da AICV e outros indicadores, por exemplo. Ainda assim, os estudos de Burton e Hubacek (2006), Rowley *et al.* (2012), e Herva e Roca (2013) discutem tópicos isolados da utilização do MACBETH e da metodologia de ACV.

No intuito de convergir o uso do MACBETH junto a um procedimento metodológico, que facilite a aplicação do método, existe o *software* M-MACBETH (BANA E COSTA; DE CORTE; VANSNICK, 2005).

O *software* M-MACBETH é classificado como um sistema multicritério de apoio à decisão, através do método MACBETH, e foi concebido para ser usado por um consultor (facilitador ou analista de decisão), de modo interativo e seguindo o princípio construtivista segundo o qual o problema e a solução pertencem ao decisor e não ao facilitador (BANA E COSTA *et al.*, 2013). Bana e Costa, De Corte & Vansnick, (2005) complementam afirmando que a abordagem MACBETH e o *software* M-MACBETH têm sido utilizados para obter escalas de preferências ou funções de valor e constantes de escala em diversas aplicações que envolvem decisões multicritério.

Para a obtenção das escalas de valores (preferências) através da atribuição de notas às opções disponíveis para cada critério, o M-MACBETH utiliza o módulo *scores*, permitindo fazer as comparações par a par, de cada alternativa e, por programação linear, sugerir uma escala de notas, verificando também, os intervalos de variação sem tornar o problema inconsistente. Para a definição de diferença de atratividade entre as alternativas, o *software* utiliza uma escala semântica que se compõe de sete categorias: nula, muito fraca, fraca, moderada, forte, muito forte e extrema (BANA E COSTA; DE CORTE; VANSNICK, 2005).

À medida que os julgamentos qualitativos são emitidos pelo avaliador e introduzidos no M-MACBETH (ver exemplo na Figura 10), o *software* verifica, automaticamente, a sua consistência e indica onde está ocorrendo a inconsistência para que possa ser corrigido.

	op 1	op 2	op 3	op 4	op 5
op 1	nula	fraca	moderada	forte	mt. forte
op 2		nula	mt. fraca	forte	forte
op 3			nula	moderada	moderada
op 4				nula	mt. fraca
op 5					nula

Julgamentos consistentes

Figura 10 - Matriz de julgamento consistente
Fonte: Bana e Costa *et al.* (2013)

É recomendável que sejam feitos todos os julgamentos par a par (BANA E COSTA *et al.*, 2013), conforme o exemplo Figura 10. A matriz de julgamento exemplificada é interpretada de forma que, em um processo de avaliação de cinco opções (*op 1* a *op 5*), segundo um determinado critério, o avaliador emita os seguintes julgamentos: a *op1* é fracamente mais atrativa que a *op2*; a *op2* é muito fracamente atrativa que a *op3*, a *op3* é moderadamente mais atrativa que a *op4* e, assim por diante, para cada uma das dez análises par a par.

Após o preenchimento da matriz de julgamento consistente, o *software* M-MACBETH implementa computacionalmente o método MACBETH, e é sugerida, através de programação linear, uma escala numérica MACBETH de base. Bana e Costa, De Corte e Vansnick (2012) declaram que, seja A um conjunto finito de $n > 2$ opções, em que a opção a^+ é tão ou mais atrativa que qualquer outra opção e a^- é tão ou menor atrativa que qualquer outra opção. Designa-se por C_k , $k = 0, \dots, 6$, às categorias MACBETH de diferença de atratividade, sendo “nula” (C_0), “muito fraca” (C_1), “fraca” (C_2), “moderada” (C_3), “forte” (C_4), “muito forte” (C_5), e “extrema” (C_6). Neste sentido, a escala MACBETH de base associa a cada julgamento mais do que uma categoria, ou seja, sempre a menor categoria possível.

Desta forma, segundo os autores, a resolução do seguinte modelo de programação linear fornece a escala MACBETH de base respectiva, onde:

$MIN [v(a^+) - v(a^-)]$ (Minimizar a maior diferença de pontuação entre as duas opções é minimizar a soma de todas as diferenças de pontuação, para que os julgamentos das categorias individuais sejam tão próximos uns dos outros quanto possível)

Sujeito a:

1. $v(a^-) = 0$
2. $\forall (a,b) \in C_0: v(a) - v(b) = 0$
3. $\forall (a,b) \in C_i \cup \dots \cup C_s$ com $i, s \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ e $i \leq s: v(a) - v(b) \geq i$
4. $\forall (a,b) \in C_i \cup \dots \cup C_i$ e $\forall (c,d) \in C_{i'} \cup \dots \cup C_{s'}$, com $i, s, i', s' \in [1, 2, 3, 4, 5, 6]$, $i \leq s, i' \leq s': [v(a) - v(b)] - [v(c) - v(d)] \geq i - s'$

A solução ótima da programação linear do MACBETH não é necessariamente única e, portanto, qualquer escala pré-cardinal obtida por uma transformação afim é “ancorada” na escala MACBETH (BANA E COSTA; DE CORTE; VANSNICK, 2012). Neste sentido, para construir, a partir da escala MACBETH de base, uma escala de pontuação que seja uma escala numérica de intervalos, o avaliador (também chamado de facilitador, que conduz a construção do modelo para o decisor) deve validar as pontuações de base, comparando, graficamente, os tamanhos de intervalos entre pontuações e ajustando-as, se necessário, para validar as proporções entre eles (BANA E COSTA *et al.*, 2013).

Na Figura 11, a *op3* tem um intervalo aberto entre 4,01 e 5,99; sendo 6 e 4 os limites possíveis sem violar restrições do modelo de programação linear.



Figura 11 - Violação das relações da ordem entre diferenças de atratividade
Fonte: Bana e Costa *et al.* (2013)

No caso da Figura 11, se, por exemplo, pontuação de *op3* fosse alterada para 6, como na Figura 11, as diferenças de atratividade entre *op3* e *op5* e entre *op2* e *op4*, moderada e forte, respectivamente, resultariam iguais, o que viola a condição de preservação da ordem. O M-MACBETH apresenta todas as pontuações numa escala ancorada nas pontuações de referência 100 e 0, obtidas, inicialmente, por transformação linear das pontuações de base (BANA E COSTA *et al.*, 2013). Vale

ressaltar que as escalas de diferenças de atratividade têm sua primeira categoria C1, limitada pela esquerda pelo valor zero, porém, não é limitada à direita, na sua categoria C₆. A escala obtida é, portanto, normalizada e gera os valores dos pesos para as alternativas em avaliação, o que possibilita o uso de um modelo de agregação, em geral, aditivo (GOMES; MELLO; MANGABEIRA, 2008).

A avaliação intercritério é feita de forma indireta através da comparação de alternativas extremas definidas pelo decisor. Neste sentido, o decisor deve construir $n+1$ alternativas fictícias (n critérios), onde as n primeiras representam a melhor avaliação observada no critério j e a pior observada em todos os outros critérios. A última alternativa fictícia tem as piores avaliações observadas em todos os critérios (GOMES; MELLO; MANGABEIRA, 2008).

Por fim, para a construção da escala cardinal é realizado o mesmo procedimento anteriormente descrito, apenas com a mudança do método de normalização (soma das avaliações deve ser igual a 1). A taxa de substituição para cada critério é dada pela avaliação da alternativa fictícia que apresenta o melhor desempenho nesse critério (GOMES; MELLO; MANGABEIRA, 2008).

Demais descrições acerca da operacionalização das funções de valores no M-MACBETH, com a definição de descritores e a respectivas escalas foram apresentadas na seção 6.2.2.

O próximo capítulo aborda os procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

6 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados, bem como as justificativas dos métodos adotados que compuseram o modelo desenvolvido. O capítulo é subdividido nas seções de pré-experimentação, experimentação e pós-experimentação.

Com base no marco teórico construído, a Figura 12 apresenta a estrutura metodológica para o desenvolvimento deste trabalho.

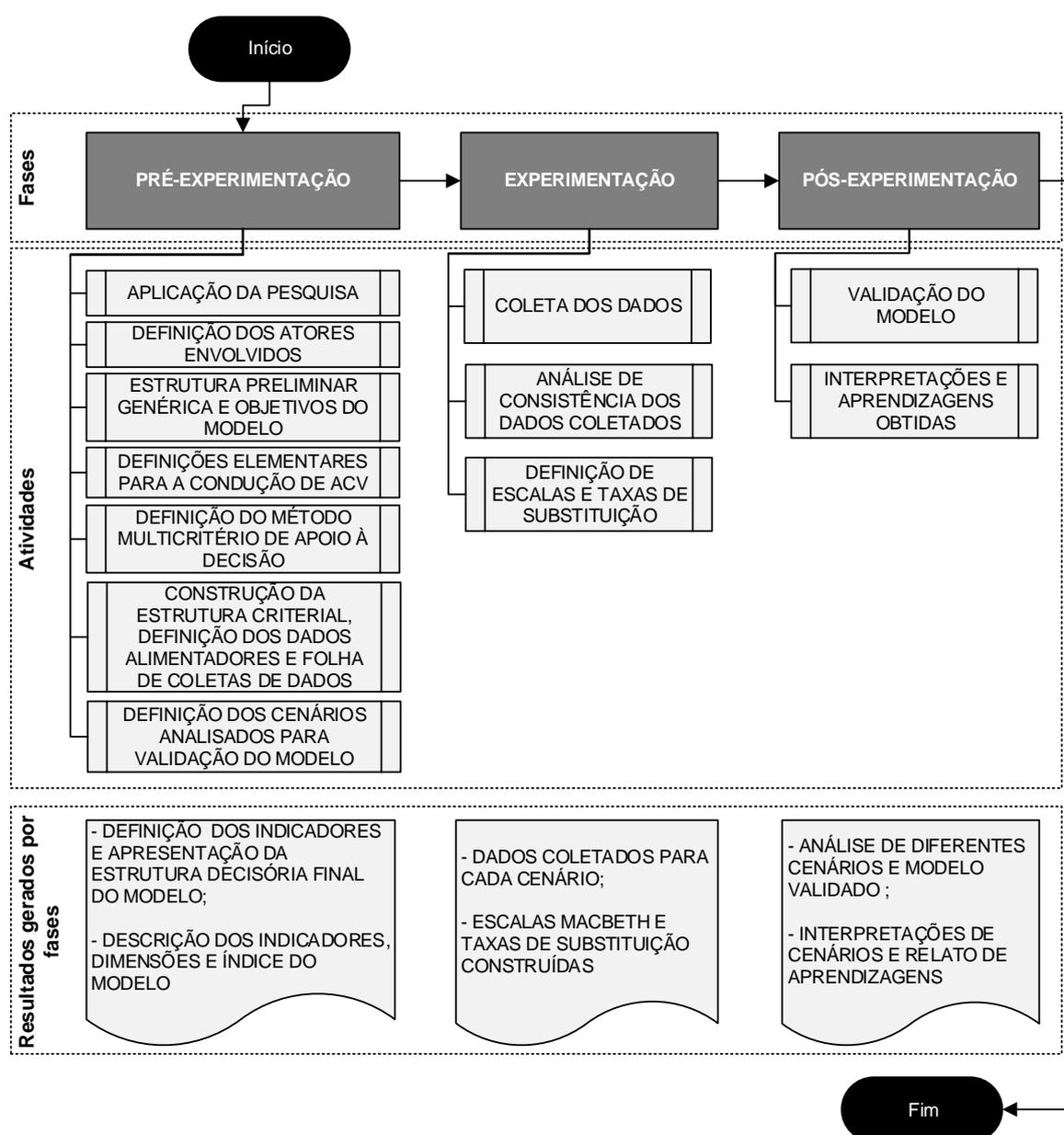


Figura 12 - Estrutura metodológica para desenvolvimento do modelo
Fonte: Autoria Própria

Cada uma das três fases do procedimento metodológico possui atividades que, por sua vez, geraram resultados específicos. Nas próximas três seções foram definidas as atividades e resultados oriundos de cada fase.

6.1 PRÉ-EXPERIMENTAÇÃO

A fase de pré-experimentação compreende as definições e caracterizações das atividades primordiais para o desenvolvimento da tese e do modelo por ela gerada. Ao todo, foram elencadas sete atividades na pré-experimentação, começando pela aplicação da pesquisa.

6.1.1 Aplicação da pesquisa

A aplicação da pesquisa foi dada em uma indústria produtora de painéis de madeira MDF, localizada no território nacional e consolidada no mercado. Seu sistema produtivo apresenta o estado da arte da tecnologia brasileira e mundial para a fabricação de painéis MDF.

Entre as condições básicas para a definição da empresa participante da pesquisa é que a mesma já houvesse realizado uma ACV em um de seus produtos, e que houvesse pré-disposição de gestores em contribuir com o desenvolvimento da pesquisa.

Neste sentido, a empresa selecionada já havia avaliado o ciclo de vida do painel MDF e, ainda, se mostrou disposta a contribuir com a construção do modelo multicritério de apoio à decisão desta tese.

6.1.2 Definição dos atores envolvidos

Para viabilizar a construção do modelo foi necessário caracterizar os atores (conforme conceituados na p. 62) envolvidos no processo decisório, que são:

- a) Facilitador: Pesquisador que conduz a construção do modelo. O facilitador tem como papel principal promover o aspecto interativo do modelo. A partir da proposta inicial do facilitador, a estrutura decisória é construída e

lapidada para envolver os pontos de vista, critérios de decisão e juízos de valor dos demais intervenientes.

- b) Decisor: Refere-se ao gestor com maior responsabilidade sobre as decisões relacionadas ao modelo multicritério desenvolvido. O decisor designa os indicadores corporativos que compõe o modelo, suas taxas de substituição e valida os resultados;
- c) Representantes: São os demais gestores, supervisores, analistas e colaboradores da empresa que auxiliam na construção do modelo.
- d) Agidos: São os clientes, fornecedores, demais colaboradores da empresa, comunidade acadêmica, governo, e a sociedade em geral. Decisões que tragam bons resultados fazem com que os agidos constatem uma consequência satisfatória vinculada à decisão tomada.

Com os atores (intervenientes e agidos) definidos na empresa pesquisada, foi realizada a definição básica da estrutura e dos objetivos do modelo.

6.1.3 Estrutura preliminar genérica e os objetivos do modelo

Para a construção e desenvolvimento do modelo multicritério, o pesquisador elaborou uma estrutura genérica inicial do modelo (apresentada na Figura 13, p.74). Para tanto, algumas premissas foram adotadas.

Primeiramente, optou-se por representar os resultados em um índice final, agrupando critérios para facilitar o processo de tomada de decisão. Observando na literatura outros modelos e ferramentas que abordam a mensuração de desempenho ambiental (baseadas no princípio de agrupamento de critérios para facilitar a decisão) foi constatada uma tendência ao uso de índices finais para compactação na mensuração de desempenhos. Este é o caso observado nos seguintes casos: BASF's AgBalance™ (SCHOENEBOOM; SALING; GIPMANS, 2012), o *Environmental Performance Index* (EPI) (HSU *et al.* 2014), e o Product Sustainability Index (ProdSI) (SCHUAIB *et al.*, 2014).

Diante da primeira premissa estabelecida para a construção do modelo, se fez necessário utilizar-se de um método multicritério que permita julgar e criar escalas, e taxas de substituição (pesos) para os resultados da ACV juntamente com os pontos

de vista do gestor com outros indicadores corporativos apreciados como importantes para o processo decisório.

Também se fez necessário criar uma escala genérica para traduzir os resultados de diferentes indicadores para uma escala comum, de 0 a 100 pontos, por exemplo. Neste sentido, a justificativa da escolha do método multicritério utilizado para a construção do modelo desta tese está descrito na seção 6.1.5, p.79.

Outra característica definida para o modelo foi a de comparação párea, onde são sempre analisados dois cenários diferentes, denominados de Cenário 1 e Cenário 2. Diante dos resultados da ACV, dos indicadores corporativos definidos e das taxas de substituição definidas pelo decisor, o modelo apresenta o cenário mais atrativo, ou seja, aquele que apresenta os melhores resultados para as singularidades julgadas pelo decisor.

Portanto, o modelo possui uma estrutura comparativa párea, onde dois diferentes cenários são comparados entre si, com abordagem multicriterial interativa baseada nas categorias de impacto reveladas em um método *endpoint* de ACV e em indicadores corporativos julgados essenciais para o processo decisório relacionado com a produção do painel de madeira MDF.

Os resultados obtidos para cada cenário são expressos em um índice final que é composto por diferentes dimensões. Foram estabelecidas três dimensões iniciais para o modelo: Ambiental, Social e Econômica. Não necessariamente as dimensões definidas do modelo final deveriam ser essas, poderiam existir novas dimensões “K”, ou ainda, poderiam ser compactados os resultados de duas ou mais dimensões, criando, por exemplo, uma dimensão socioambiental.

O processo de escolha e inclusão de diferentes dimensões reflete a abordagem interativa do modelo com o decisor, de modo a representar as suas singularidades decisórias na construção do modelo multicritério. Cada dimensão, por sua vez, poderia ser decomposta em conjuntos de indicadores corporativos ou em subdimensões (como ocorre com os indicadores de categoria de impacto *endpoint* na dimensão ambiental).

Neste sentido, a Figura 13 apresenta a estruturação inicial genérica do modelo.

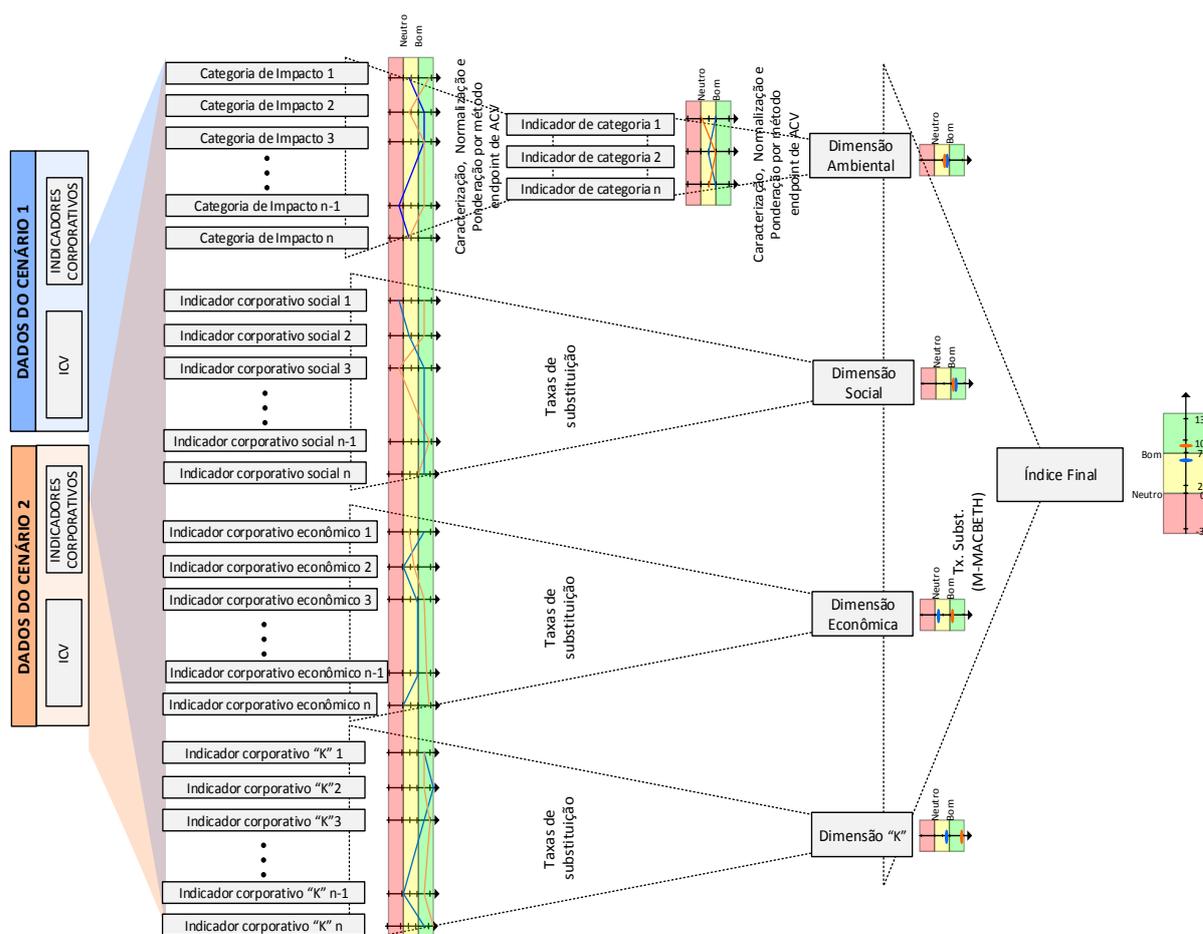


Figura 13 - Estrutura preliminar genérica do modelo
Fonte: Autoria Própria

A construção da estrutura preliminar genérica serve como ponto de partida ao aspecto interativo do modelo. Com base no modelo inicial, o decisor pôde moldar a estrutura decisória incluindo, excluindo e/ou agrupando os indicadores corporativos. A construção da estrutura preliminar também facilita o entendimento dos demais intervenientes para a modelagem e apresentação dos objetivos pretendidos.

A estrutura preliminar genérica do modelo (Figura 13) tem como base de entrada os dados do ICV e os indicadores corporativos referentes a dois cenários distintos (Cenário 1, em azul; e Cenário 2, em alaranjado). Observa-se, ainda, que apesar do desempenho ser mensurado em um índice final, os resultados de todos os indicadores corporativos e categorias de impacto que compõem o modelo são apresentados individualmente. Isso permite maior entendimento e aprendizagem com os resultados do modelo quando comparados apenas ao índice final. O desempenho dos cenários pode ser analisado para todos os indicadores e dimensões consideradas.

Os dados referentes ao ICV foram exclusivamente alocados para os critérios que compõem a Dimensão Ambiental. A utilização de um método de AICV (apresentado e justificado na seção 6.1.4) revela os resultados para categorias de impactos *midpoints* (representados nas categorias de impacto 1, 2, 3, ..., n-1, n) e o modelo de caracterização e normalização do método revela, também, os indicadores de categoria de impacto *endpoint* (representados em indicadores de categoria de impacto 1, 2, ..., n). O agrupamento dos indicadores *midpoints* em indicadores *endpoint* e, depois, em um indicador final (Dimensão Ambiental) ocorre pelo modelo de caracterização, normalização e ponderação do próprio método de AICV, não foram construídas taxas de substituição para isso.

Por sua vez, os indicadores corporativos alimentam o modelo fora da dimensão ambiental. Observa-se que na estrutura preliminar, houve uma sugestão de agrupamento entre indicadores corporativos singulares formando as dimensões “social”, “econômica”, e “K” (para outras possíveis dimensões julgadas importantes no processo decisório e para a composição do índice final).

Ressalta-se que o intuito da criação da estrutura preliminar genérica na fase metodológica de pré-experimentação é promover o processo de estruturação livre, reflexivo e contínuo, com os pontos de vista do decisor. Os indicadores corporativos julgados importantes pelo decisor são compostos e alocados no modelo com uma abordagem interativa. Os detalhes e resultados desta etapa foram explanados na seção 7.1. Já os detalhes específicos da dimensão ambiental, que envolve a ACV, são descritos na seção a seguir.

6.1.4 Definições elementares para a condução de ACV

Esta seção objetiva expor as definições elementares para a condução de estudos de ACV compreendidos no modelo. Os estudos foram conduzidos atendendo à metodologia e os requisitos normativos apresentados pelas normas NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT, 2009a, ABNT 2009b).

Foi realizada a ACV do painel de madeira MDF produzido em uma indústria brasileira para diferentes cenários de produção. Os cenários analisados foram especificados e descritos na seção 6.1.7 (p.81). O cenário de referência para o ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF é apresentado na Figura 14.

A Figura 14 ilustra o sistema do produto, as fases do processo produtivo, e a fronteira definida para o ciclo de vida da produção do MDF (*cradle-to-gate*).

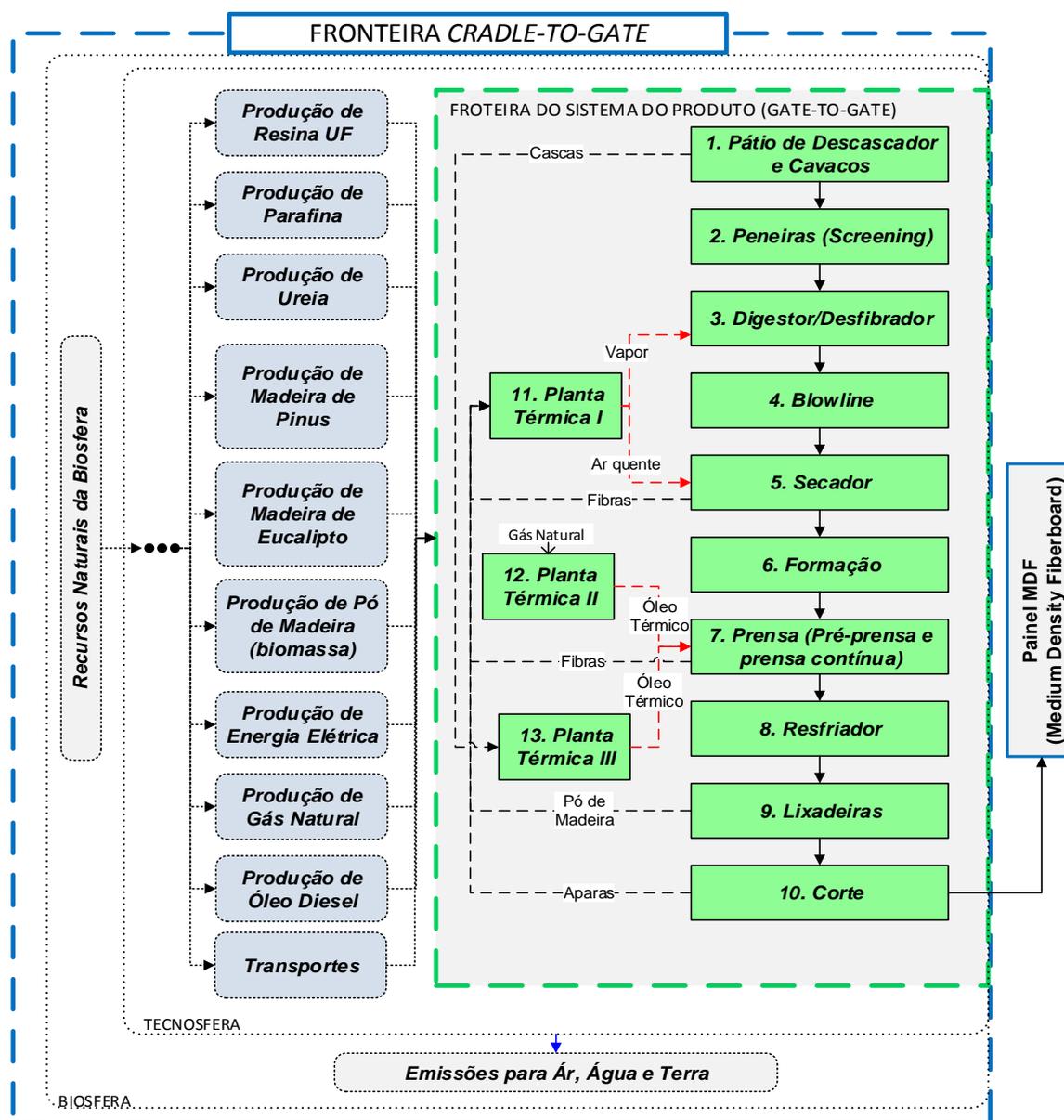


Figura 14 - Sistema de produto de referência e fronteiras definidas para a produção do MDF
Fonte: Autoria Própria

Nota-se que no cenário de referência para o ciclo de vida da produção de painel MDF existem treze unidades de processo (em verde) na fronteira do sistema do produto (*gate-to-gate*), iniciando na etapa “1. Pátio de Descascador e Cavacos” e finalizando na etapa “13. Planta Térmica III”. 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.

O Quadro 7 apresenta os dez subsistemas que estão inclusos (e as referências de dados secundários utilizados) e os sistemas que foram excluídos das fronteiras do estudo (e suas justificativas).

Subsistemas Incluídos	Referência de Dados Secundários utilizados
Produção de resina UF	Dados do Apêndice D adaptados em Silva (2012)
Produção de parafina	Zah and Hischer (2007)
Produção de ureia	Ribeiro (2009)
Produção de madeira de pinus	Werner <i>et al.</i> (2007)
Produção de madeira de eucalipto	Silva (2012) and Werner <i>et al.</i> (2007)
Produção de Sulfato de Amônia	Nemecek <i>et al.</i> (2007)
Produção de energia elétrica	Frischknecht <i>et al.</i> (2007)
Produção de gás natural	Faist Emmenegger <i>et al.</i> (2007)
Produção de óleo diesel	Kellenberger <i>et al.</i> (2007)
Transportes	Spielmann <i>et al.</i> (2007)
Sistemas Não Considerados	Justificativas
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	A 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 funcionários não abrangem o escopo do estudo.
Insumos periódicos e/ou auxiliares	Não foram considerados insumos como embalagens de produtos, capas, caibros, filtros, mangueiras, solventes para limpeza, tintas, lixas, fitas, componentes químicos utilizados no tratamento de água e esgoto, etc.
Fase de uso e destinação final do produto	Devido ao objetivo traçado para a ACV e pela dificuldade de rastrear o uso e o destino final do MDF, as fases posteriores à produção foram desconsideradas.

Quadro 7 - Considerações sobre sistemas incluídos e excluídos da ACV do painel MDF
Fonte: Autoria Própria.

Para os dados referentes aos dez subsistemas da fronteira *cradle-to-gate*, que fornecem recursos e matérias-primas para o sistema do produto do painel MDF, recorreu-se a dados de fontes secundárias (Inventários de Ciclo de Vida (ICV)). Foram utilizados inventários brasileiros existentes para os subsistemas de produção de resina UF, produção de ureia, produção de cavacos de eucalipto e produção de energia elétrica. Por não existirem outros ICVs para condições brasileiras, utilizou-se

ICVs internacionais com maiores proximidades e afinidades possíveis.

Outros estudos de ACV de painéis de madeira encontrados na literatura (ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE, 2009; WRAP, 2009; WILSON, 2010; SILVA, 2012) citam que alguns sistemas podem ser excluídos da fronteira do estudo por não apresentarem contribuições significativas ou relevantes para o objetivo delineado no estudo ACV. Entre eles estão: produção e manutenção de bens de capital, produção e manutenção de bens pessoais, produção de insumos auxiliares, materiais com baixa representatividade relativa em balanços de massa e energia. Neste sentido, pode-se constatar que a exclusão dos sistemas apresentados no Quadro 7 são justificáveis.

Para fins de fluxo de referência, bem como os fluxos de materiais, energias e emissões deste estudo foram expressos em função da unidade funcional adotada: 1,0 m³ de MDF, 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 15316-2:2015 (Painéis de fibras de média densidade, Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio) (ABNT, 2015).

Para a realização da modelagem e implementação de ACV foi utilizado o *software* Umberto v.5.6. Os dados necessários para a modelagem da ACV no *software* foram coletados através do questionário apresentado no Apêndice A. As características do Umberto foram julgadas como adequadas e suficientes para as demandas do estudo. A escolha se justifica, também, pelo *software* ser referência em estudos de ACV e disponibilizar acesso à base de dados utilizada neste estudo, a Ecoinvent v.2.2.

Quanto à definição do método de AICV, foi utilizado o Eco-Indicator 99 por possuir uma abordagem *endpoint* que, de acordo com a teoria previamente apresentada, é o mais indicado quando a ACV está relacionada a processos de tomada de decisão. A escolha do Eco-Indicator 99 se justifica, também, por ser o método mais utilizado em estudos com abordagem *endpoint* no mundo e, no Brasil, é o método *endpoint* mais utilizado em teses e dissertações (CHERUBINI e RIBEIRO, 2015). O Eco-Indicator 99 possui, ainda, características favoráveis para a agregação de valores dos resultados de impacto utilizando-se das taxas de substituição construídas pelo método multicritério adotado e descrito na seção seguinte.

6.1.5 Definição do método multicritério de apoio à decisão

Considerando a base teórica apresentada no capítulo anterior, foi definido o método MACBETH, junto ao *software* M-MACBETH, como o método multicritério construtivista e interativo para a construção de escalas cardinais e, posteriormente, viabilizar a determinação das taxas de substituição. O método foi considerado apropriado para a presente pesquisa devido aos seguintes fatores:

- (i) Tipo de problemática interativa/construtivista e suas vantagens em relação ao julgamento: utilização de julgamentos qualitativos para diferenciar atratividades e geração de pontuações para as opções e ponderações (taxas de substituição) de diferentes critérios, através de programação matemática;
- (ii) Caráter compensatório: auxilia em decisões que envolvem *trade-offs*; o mau desempenho de um cenário em um dado indicador/critério pode ser compensado pelo seu bom desempenho em outro critério e/ou vice-versa;
- (iii) Verificação de inconsistência de forma automática e instantânea junto ao julgamento do decisor envolvido: evita a construção de juízos de valores inconsistentes e taxas de substituições errôneas na percepção do decisor;
- (iv) *Software* é de fácil uso e de fácil compreensão ao decisor: facilita o processo de construção das taxas de substituição;
- (v) Método em consonância com modelos decisórios interativos: O MACBETH não se configura como uma metodologia sistemática de apoio à decisão e permite a utilização do método para representar singularidades e pontos de vista específicos de um gestor. O método integra-se como componente estrutural de modelos decisórios multicriteriais singulares.
- (vi) Escalas de diferenças de atratividade não são limitadas: as escalas construídas não são fixas e limitadas a um limite inferior e superior. O desempenho de um determinado cenário para um critério pode ser abaixo ou acima das pontuações de referências mínimas e máximas estabelecidas, respectivamente.

A operacionalização do método multicritério MACBETH como componente estrutural do modelo desenvolvido é descrita e detalhada na seção 6.2.3 (Definição de escalas e taxas de substituição).

6.1.6 Construção da estrutura criterial, definição dos dados alimentadores e folha de coletas de dados para o modelo

A definição da estrutura dos critérios que compõe o modelo foi alocada durante a fase metodológica de pré-experimentação pelo fato de que a construção da estrutura do modelo, com a definição dos indicadores corporativos e categorias de impacto da ACV, são necessárias para a elaboração da folha de coleta de dados.

A construção da estrutura decisória foi conduzida através de um processo de elicitação, de abordagem interativa, e de estruturação livre e contínua, tomando como ponto de partida, a estrutura genérica preliminar criada. Neste cenário, o papel do facilitador foi estimular e explicar aos intervenientes os objetivos do modelo e as possibilidades de criação, organização e junção dos indicadores corporativos vitais para o processo decisório junto à ACV.

Para esta etapa, foram realizadas sessões de entrevistas para apresentar os objetivos almejados com o modelo, sua estrutura genérica preliminar e os passos necessários para a estruturação decisória. Para as sessões, foi utilizado um roteiro de questionamentos de modo a estimular o decisor na lapidação da estrutura decisória. O decisor definiu as dimensões, as quais foram detalhadas na seção 7.1. “Estrutura Decisória Final do Modelo”.

Durante as sessões o facilitador salientou, também, que os indicadores deveriam estar intimamente relacionados e apresentar notórias influências em decisões relacionadas ao ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. Neste sentido, os questionamentos delineados para a condução das entrevistas foram:

- i. Quais são os indicadores corporativos vitais em um processo decisório na produção do painel MDF? Liste-os. (Durante a listagem, o facilitador questionou sobre cada indicador listado, de modo a estimular a inclusão de mais indicadores).
- ii. Entre os indicadores levantados anteriormente, quais são os principais e mais influentes indicadores para a empresa?

- iii. Há algum destes indicadores que poderiam ser eliminados por não possuir influência na produção do painel MDF e em seu ciclo de vida?
- iv. Entre os indicadores levantados, há indicadores duplicados ou que representem os mesmos resultados?
- v. Quais são as principais dimensões em que a empresa gerencia os resultados de seus negócios? Por exemplo, econômicos, sociais, ambientais, mercadológicos, etc.
- vi. Em quais dimensões os indicadores listados poderiam ser agrupados?
- vii. Na visão da empresa, quais dimensões são vitais para compor o índice final do modelo multicritério?

Com base nestes questionamentos, foram listados e organizados os indicadores corporativos na estrutura decisória do modelo. A utilização de indicadores triviais e do cotidiano da empresa, conforme sugerido pelo decisor, auxiliam na garantia da consistência do modelo, e facilita o entendimento e a aprendizagem com sua aplicação. Os resultados desta etapa da fase de pré-experimentação definiram a estrutura decisória final do modelo, os indicadores, dimensões e relato dos detalhes construtivos (ver seção 7.1. “Estrutura Decisória Final do Modelo”).

Diante do exposto, foi possível definir todos os dados que alimentam o modelo e construir o formulário de coleta de dados com todas as informações necessárias para viabilizá-lo. O Apêndice B apresenta a folha de coleta de dados para alimentação do modelo.

Para a coleta de dados foi necessário, também, definir e descrever quais seriam os pares de cenários a ser comparados no modelo multicritério de apoio à decisão.

A seção a seguir apresenta os procedimentos metodológicos adotados para a definição dos cenários selecionados.

6.1.7 Definição dos cenários analisados para validação do modelo

Embora o processo de validação do modelo multicritério seja uma atividade da fase de pós-experimentação, foi necessário definir quais seriam os cenários analisados na validação para que pudessem ser coletados os dados referentes a tais cenários.

Foram definidos três tipos de cenários que resumem comuns processos de tomadas de decisões ao que tange à produção do painel de madeira MDF. São eles:

- i. Decisões que envolvem escolhas entre mudanças na tecnologia de processos da produção do painel MDF: para esta análise foi definido que o modelo iria analisar um cenário da produção do painel MDF sem descascador de madeira na fábrica e com aquecimento de óleo térmico via gás natural *versus* um processo produtivo com descascador de madeira e com aquecimento de óleo térmico via biomassa gerada internamente.
- ii. Decisões que envolvem escolhas entre variações de parâmetros técnicos de um painel MDF específico: para esta análise foi definido que o modelo iria analisar a produção do MDF de mesma espessura, entretanto com variações na composição da resina. A Produção 1 (P1) refere-se a um painel produzido com resina de menor razão molar *versus* a Produção 2 (P2) que refere-se a um painel produzido com resina de maior razão molar;
- iii. Decisões que envolvem escolhas entre a produção de painéis MDF com espessuras diferentes: para esta análise foi definido que o modelo iria analisar a produção de um painel de madeira MDF de aproximadamente 5,5 mm de espessura *versus* a produção de um painel de madeira MDF de aproximadamente 25 mm de espessura.

No que se refere especificamente a segunda análise, foi necessário coletar dados referentes a um inventário específico do ciclo de vida da resina ureia formaldeído, com razões molares diferentes.

Diante deste cenário, se fez necessário levantar dados específicos da produção das resinas UF com diferentes razões molares, para compor o inventário do ciclo de vida do subsistema de produção de resina UF. Para tanto, o Apêndice D apresenta a folha de coleta dos dados relativos ao inventário do ciclo de vida das resinas ureia-formaldeído de diferentes razões molares de uma indústria produtora de resinas. Em respeito a confidencialidade dos dados da empresa, os mesmos não puderam ser apresentados nesta tese. Os dados coletados de resina foram adaptados no ICV utilizado para a resina UF, de Silva (2012).

Por fim, diante da definição dos três cenários decisórios característicos enfrentados por gestores, foi possível iniciar a coleta de dados. A próxima seção retrata a etapa de experimentação dos procedimentos metodológicos. A primeira atividade da experimentação compreende a coleta de dados para o modelo.

6.2 EXPERIMENTAÇÃO

A etapa de experimentação compreendeu a coleta de dados, análise de consistência de dados, e definição de escalas e taxas de substituição.

6.2.1 Coleta dos dados

Para a coleta dos dados alimentadores do modelo foi utilizada a Folha de Coletas apresentada no Apêndice B. Tal folha foi subdividida de acordo com as quatro dimensões que compõe o modelo multicritério construído (como descrito nos resultados na seção 7.1).

Para a coleta dos dados referentes à dimensão ambiental, que trata do ICV, foram coletados os dados de ICV de entrada para a produção de 1,0 m³ de MDF no cenário analisado e identificado como Cenário 1 (C1) ou Cenário 2 (C2), dados referentes aos transportes realizados, dados referentes às emissões geradas pela fábrica, e os dados de saída referentes àquele cenário. No que se refere às dimensões Social, Econômica e Técnica, os dados de entrada são os indicadores corporativos utilizados pela empresa e julgados como importantes para compor o modelo, conforme descrito nos resultados da seção 7.1, p.91.

A folha de coleta dos dados alimentadores ainda conta com um campo para a informação de dados referentes às características do painel MDF *in natura* (sem revestimentos) produzidos nos cenários analisados.

A coleta de dados foi realizada *in loco* pelo pesquisador (facilitador) na empresa participante da pesquisa. A primeira coleta realizada foi referente aos dados para definição de valores de referência para o modelo multicritério. Foram coletados dados para dois cenários de referência de produção: um considerado bom (para referência superior) e um considerado neutro (para referência inferior). Os dados são avaliados e validados pelo decisor.

A condução básica seguida na definição das referências foram: valores acima da referência superior para um indicador é considerado um bom resultado, valores que se encontrem entre as referências superiores e inferiores são considerados resultados satisfatórios, e os valores abaixo da referência inferior de um indicador são considerados resultados ruins.

Diante da coleta dos dados de valores de referência, foram coletados os dados dos outros seis cenários analisados para a validação do modelo. Os dados coletados passaram por análise de consistência.

6.2.2 Análise de consistência dos dados

Os dados coletados foram analisados pelo pesquisador ao mesmo tempo em que as coletas aconteciam. Qualquer inconsistência, inconformidade ou questionamento existente foi sanado durante o processo de coleta de dados, com os respectivos representantes.

Ao final das coletas de dados, o decisor realizou uma análise da consistência, veracidade e validação dos dados coletados. Por fim, o facilitador, também avaliou e confirmou a completeza dos dados coletados.

Após a coleta dos dados e da análise de consistência, foi realizada a última atividade da fase de experimentação, que compreende a definição de escalas cardinais utilizando o método MACBETH, no *software* M-MACBETH, e a definição dos valores das taxas de substituição para o modelo.

6.2.3 Definição de escalas e taxas de substituição

Como comentando anteriormente, para a construção das escalas cardinais dos indicadores corporativos foi utilizado o *software* M-MACBETH, com o método MACBETH. Os julgamentos par a par foram respondidos diretamente no *software*, com a condução do facilitador, para a construção e validação das escalas junto ao decisor.

As escalas revelam os resultados dos indicadores, das dimensões e do índice final dentro de uma escala construída pelo método MACBETH. O esquema de representação dos resultados do modelo aparece de acordo com a Figura 15.

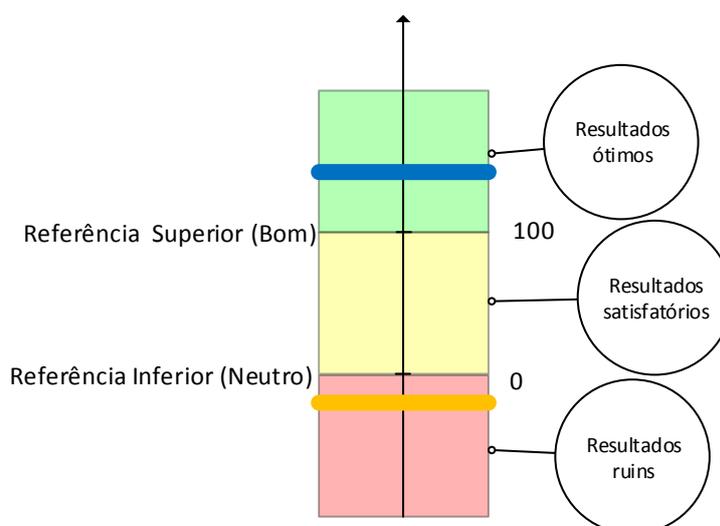


Figura 15 – Escala genérica de representação de resultados
Fonte: Autoria Própria

A escala genérica de representação dos resultados do modelo foi construída com duas referências básicas:

- Referência Superior: o valor de referência superior é um resultado tido como “bom” para a empresa. Valores maiores são considerados como ótimos resultados, ao passo que, valores menores são considerados como resultados satisfatórios. O valor definido para um resultado “bom” foi de 100 (cem) pontos na escala cardinal.

- Referência inferior: o valor de referência inferior é um resultado tido como “neutro” para a empresa. Valores maiores são considerados como resultados satisfatórios, ao passo que, valores menores são considerados como resultados ruins. O valor definido para um resultado “neutro” foi de 0 (zero) pontos na escala cardinal.

Ainda observando a Figura 15 e considerando α uma pontuação obtida por um cenário qualquer em um indicador qualquer, nota-se que os resultados ruins ($\alpha < 0$) são demarcados na área de cor vermelha; os resultados satisfatórios ($0 < \alpha < 100$) são demarcados pela área amarela; enquanto os resultados ótimos ($\alpha > 100$) são representados na área de cor verde.

Como anteriormente comentado nas justificativas da escolha do método MACBETH, o modelo multicritério apresenta um valor de referência inferior e um superior, entretanto, é possível obter resultados abaixo ou acima dos mesmos, respectivamente. Isso depende dos resultados de um dado cenário para um indicador

analisado. O resultado do cenário 1 (marcador azul), para o indicador representado na Figura 15, apresentou-se como ótimo, com aproximadamente 140 pontos, já o Cenário 2 (alaranjado) apresentou um resultado ruim, ficando na área vermelho (abaixo de zero).

Para cada indicador corporativo foi construída uma escala cardinal utilizando-se a programação matemática do método MACBETH descrita no Capítulo 5. Para tanto, foi necessário coletar os dados de referência (inferior e superior) para todos os indicadores.

Para os indicadores de AICV relacionados à dimensão ambiental, foi considerado um cenário tido como neutro e um tido como bom, para as entradas e saídas do ICV. Os dados que definem os cenários “neutro” e “bom” foram coletados no folha de coletas de dados no Apêndice C. Por respeito a confidencialidade dos dados da empresa participante da pesquisa, os mesmos não puderam ser apresentados nesta tese.

Os dados do ICV de ambos os cenários de referência alimentaram a modelagem de ciclo de vida realizada no *software* Umberto e, através da AICV utilizando o método Eco-Indicator 99 foram reveladas pontuações para os indicadores da dimensão ambiental.

Com o objetivo de transformar as pontuações geradas pelo Eco-Indicator 99 para a escala cardinal utilizada no MACBETH foi realizada a normalização de cada categoria através da criação de uma função de valor, representada pela equação de reta do tipo $y = ax + b$. Onde x representa a pontuação obtida pelo método Eco-indicator 99 e y o valor obtido na escala cardinal MACBETH. As pontuações obtidas para cada indicador de impacto no cenário “neutro” foram atribuídas com a pontuação de referência inferior da escala cardinal MACBETH, ou seja, zero (0). Já as pontuações obtidas na AICV do cenário “bom” foram atribuídas com a pontuação de referência superior da escala MACBETH, ou seja, 100 (cem) pontos.

Quanto à operacionalização do método MACBETH, foi definido que todos os indicadores utilizados possuem a base de comparação em níveis quantitativos de performance (pelo fato de todos os indicadores apresentarem-se em valores quantitativos), com a determinação de cinco diferentes níveis.

Como exemplificação, a Figura 16 apresenta as propriedades de um possível indicador de Custos Fixos, com suas informações. Os dados da Figura 16 são fictícios.

Propriedades de Custos Fixos

Nome: Custos Fixos Nome abreviado: Custos Fixos

Comentários:

Base de comparação:

as opções
 as opções + 2 referências
 níveis qualitativos de performance:
 níveis quantitativos de performance:

critério

Níveis de performance:

-	+	Nível quantitativo
		10
		20
		30
		40
		50

Indicador: Custos Fixos
Abreviado: CF Unidade: R\$/m³

Figura 16 – Propriedades do Indicador Custos Fixos
Fonte: Autoria Própria

Observa-se na Figura 16 que o indicador foi definido com a base de comparação de níveis quantitativos de performance e é um critério para a tomada de decisão. Foram incluídas cinco diferentes opções de níveis (10, 20, 30, 40, 50; em R\$/m³). Os valores são fictícios. É necessário também definir quais são as referências superiores e inferiores para o indicador. Neste sentido, o nível quantitativo igual a 20 (em verde) foi definido como a referência superior, ao passo que, a referência inferior é dada em 40 (em azul). Os dados de referência para cada indicador foram coletados com base nos dados dos cenários "neutro" e "bom" (Apêndice C).

O próximo passo para a construção do indicador no modelo é formular a função de valor com base na atratividade julgada pelo decisor perante as opções de níveis de performance.

A Figura 17 ilustra a matriz de julgamento entre as opções no indicador de custos fixos:

	10	20	30	40	50	
10	nula	?	?	?	?	extrema
20	?	nula	?	positiva	?	mt. forte
30	?	?	nula	?	?	forte
40	?	?	?	nula	?	moderada
50	?	?	?	?	nula	fraca
						mt. fraca
						nula

Julgamentos consistentes

Figura 17 - Matriz de julgamento para indicador de custo fixo no M-MACBETH.
Fonte: Autoria Própria

Com base na matriz de julgamento, o facilitador questiona o decisor sobre a mensuração de atratividade entre as opções. Por exemplo, para a célula circunscrita em vermelho, é questionado sobre quão mais atrativo é possuir um custo fixo de R\$10,00/m³ perante um custo fixo de R\$20,00/m³ na produção?

Diante deste questionamento, o decisor avalia o grau de atratividade considerando a escala semântica composta de sete categorias: nula, muito fraca, fraca, moderada, forte, muito forte e extrema. Neste caso, observando a Figura 18, tal atratividade foi julgada como como forte. Ou seja, seria fortemente mais atrativo possuir um custo fixo de R\$10,00/m³ perante um custo fixo de R\$20,00/m³ na produção.

A Figura 18 apresenta este e os outros julgamentos de valores dados por um decisor.

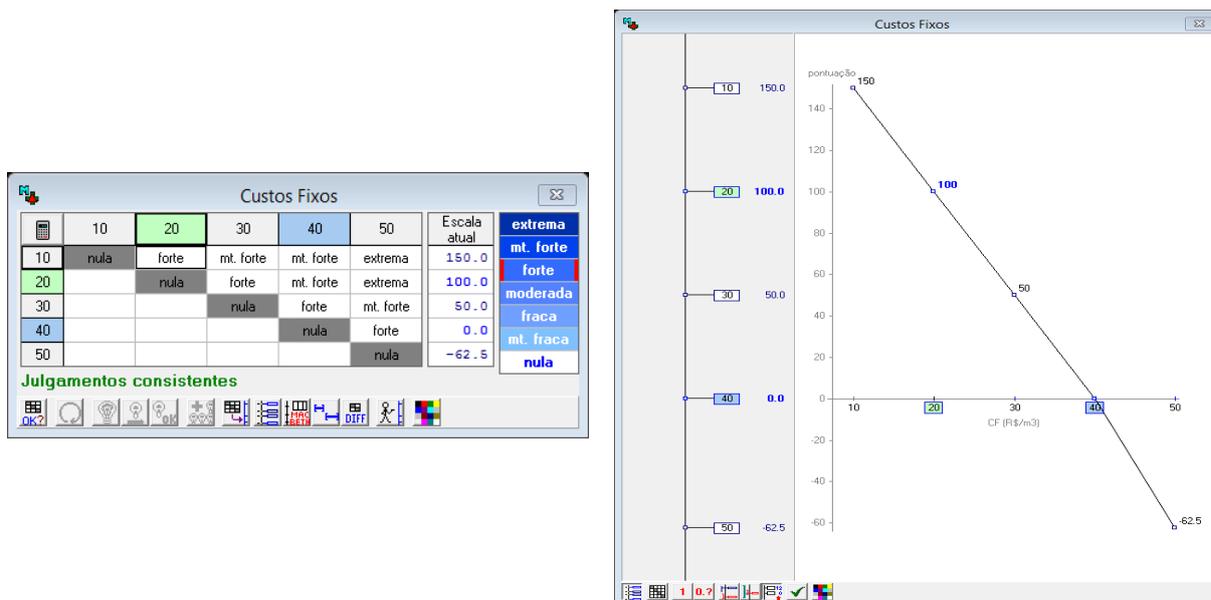


Figura 18 - Matriz de julgamento para indicador de custo fixo no M-MACBETH
Fonte: Autoria Própria

Diante do preenchimento da matriz de julgamento de atratividade, o *software* M-MACBETH avalia a consistência e os valida como “Julgamentos consistentes” para o caso. Neste enlace, o *software* constrói a escala MACBETH, como é possível observar no gráfico à direita da Figura 18. Qualquer valor dado para o indicador de custo fixo terá sua representação na escala cardinal construída no MACBETH.

A condução para a construção das escalas MACBETH dos indicadores corporativos selecionados para compor o modelo multicritério desta tese seguiram o mesmo procedimento aqui descrito.

A definição das taxas de substituição (pesos) para composição do índice final e das dimensões foi realizada de acordo com a percepção de importância do decisor para cada indicador durante a estruturação da decisão. Ao que se refere a generalização do modelo multicritério construído, cabe-se ressaltar que em outras aplicações podem ser utilizados procedimentos para a determinação das taxas de substituição, tais como: Trade-off, Swing Weights e o MACBETH. As justificativas das escolhas de valores das taxas de substituições que compõe o modelo apresentado nesta tese foram apresentadas nos resultados.

Por fim, após a determinação e verificação de consistência de todas as escalas e taxas de substituição construídas, foram alimentados os dados para cada cenário, para que ela pudesse ser validada na fase de pós-experimentação.

A seção seguinte apresenta os requisitos metodológicos para a fase de pós-experimentação.

6.3 PÓS-EXPERIMENTAÇÃO

A fase de pós-experimentação compreendeu a validação do modelo multicritério construído, as interpretações e a geração de aprendizagem sobre o modelo e o sistema analisado.

6.3.1 Validação do modelo

Para a validação, foram definidas anteriormente três análises decisórias que irão envolver processos de decisão de seis diferentes cenários.

Para a validação do modelo, foi suposto que os resultados gerados pelo modelo deveriam satisfazer as percepções de juízo de valor do decisor. Portanto, para cada análise decisória foi questionado (antes da apresentação dos resultados) qual seria o resultado esperado pelo decisor para aquela análise, considerando todos os indicadores selecionados e todos os julgamentos de juízos baseados em atratividade que foram realizados. O modelo deveria estar consistente quanto a isso para poder ser validado. A seção 7.4 discute os resultados obtidos com as percepções de resultados previamente esperados pelo decisor.

6.3.2 Interpretações e aprendizagens obtidas

Com as análises descritas no processo de validação, os resultados foram interpretados e buscaram-se justificativas para indicadores que se destacaram. Foi também possível gerar aprendizagem científica sobre os resultados e interpretações do modelo, sobre os métodos utilizados e sobre os sistemas analisados.

Este foi configurado como o ápice do modelo multicritério baseado em ACV e indicadores corporativos: a geração de aprendizagem e a discussão científica, a fim de aprimorar e compreender os resultados do ciclo de vida da produção do painel MDF, os indicadores corporativos, e as inovações e derivações de ferramentas baseadas na metodologia ACV para auxílio à tomada de decisão e melhorias de desempenho corporativo.

7 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados alcançados para as atividades traçadas nas três fases metodológicas descritas no capítulo anterior: pré-experimentação, experimentação e pós-experimentação. O primeiro resultado gerado pela fase de pré-experimentação é a apresentação da estrutura decisória final do modelo com a descrição dos indicadores que o compõem.

7.1 ESTRUTURA DECISÓRIA FINAL DO MODELO

Com base na característica interativa delineada para esta pesquisa, a Figura 19 ilustra a estruturação final do modelo que reflete os pontos de vista e indicadores selecionados pelo decisor para sua composição.

As entrevistas conduzidas com vista a construção da estrutura do modelo e a inclusão de multicritérios aos resultados da ACV promoveram a inclusão de oito indicadores corporativos, tidos como vitais para um processo de tomada de decisão consistente na empresa pesquisada. Os critérios básicos adotados pelo decisor para a inclusão de indicadores foram: usar indicadores já existentes e com históricos, ou seja, não era conveniente utilizar novos indicadores que não faziam parte da gestão da empresa; e, utilizar indicadores que interferissem diretamente na produção do painel, ou seja, aqueles indicadores que não afetam a produção foram suprimidos da estrutura do modelo.

Além dos oito indicadores corporativos, a estrutura decisória final contempla dez indicadores de categoria de impacto de ciclo de vida do tipo *midpoint*, e três indicadores de categoria de impacto de ciclo de vida do tipo *endpoint*. As categorias de impacto (*midpoint* e *endpoint*) relacionadas ao ciclo de vida do MDF foram selecionadas pelo facilitador através da opção de adoção do método Eco-Indicator 99, para a AICV.

Tais indicadores foram modelados e alocados em quatro dimensões específicas definidas pelo decisor para compor o índice final. As dimensões definidas foram: Dimensão Ambiental, Dimensão Social, Dimensão Econômica e Dimensão Técnica.

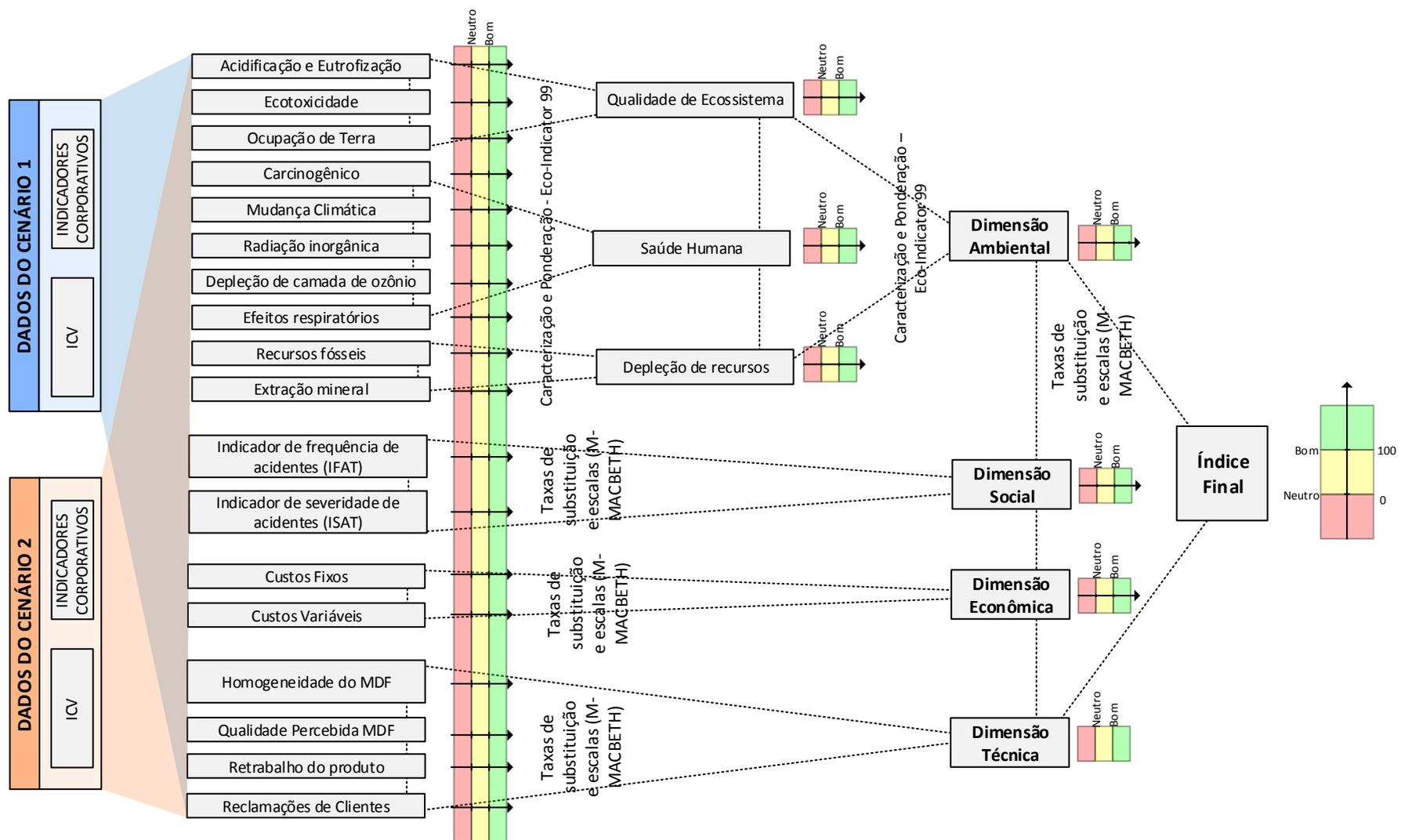


Figura 19 - Estrutura decisória final do modelo multicritério construído
 Fonte: Autoria Própria

Quanto à definição das dimensões, optou-se por adotar as três dimensões previamente sugeridas (Ambiental, Social e Econômica) devido ao fato da política corporativa da empresa pesquisada reportar seus resultados sob a égide do triplo resultado de sustentabilidade (Ambiental, Social e Econômica). Houve, também, a necessidade por parte do gestor de inclusão de uma quarta dimensão composta por indicadores que representam aspectos e requisitos técnicos importantes para a produção dos painéis MDF.

Observando o lado esquerdo da Figura 19, nota-se que foi adotada uma cor característica para aos dados de entrada e resultados de cada cenário (Cenário 1 em azul, e o Cenário em alaranjado). Os dados de entrada necessários (ICV e Indicadores Corporativos) para alimentar cada cenário foram expostos no Apêndice B (Folha de coleta de dados). Os resultados obtidos para os indicadores, as dimensões e o índice final obedecem, também, a representação gráfica para a escala criada e apresentada anteriormente na Figura 15 (p. 85).

O segundo resultado obtido na fase de pré-experimentação e apresentado na seção seguinte é a descrição dos indicadores, dimensões e índice final do modelo multicritério.

7.2 DESCRITORES DO MODELO MULTICRITÉRIO E TAXAS DE SUBSTITUIÇÃO

Diante da estrutura decisória do modelo apresentado, esta etapa revela a descrição do índice do modelo, das dimensões e seus respectivos indicadores.

7.2.1 Índice Final

O índice final do modelo apresenta, em um número, a pontuação resultante obtida para os cenários analisados, considerando os resultados da ACV juntamente com outros indicadores corporativos selecionados. Os resultados obtidos no índice estão atrelados a um sistema de taxas de substituição baseados em atratividade, onde a percepção de juízo do decisor é refletida em uma escala cardinal.

O índice final, bem como todas as outras dimensões e indicadores que foram contemplados no modelo e são apresentado a seguir, são mensurados em uma pontuação referenciada, mas não limitada, entre 0 e 100 pontos. O valor de referência

0 (zero) representa um resultado jugado neutro, e o valor de referência 100 (cem) representa um resultado jugado como bom. Valores acima de 100 (cem) são tidos como resultados ótimos e valores abaixo de 0 (zero) são tidos como resultados ruins. Pontuações entre 0 e 100 pontos representam resultados satisfatórios para um cenário qualquer. Neste sentido, quanto maior for a pontuação obtida no índice final (ou indicador ou dimensão) do modelo para um cenário qualquer, melhor.

Vale afirmar, ainda, que a pontuação do índice final é uma composição ponderada das dimensões que estruturam o modelo. No caso, o gestor definiu níveis de importância igualitários para as quatro dimensões (Ambiental, Social, Econômica e Técnica). Sendo assim, a pontuação obtida em cada uma das dimensões contribuiu com 25% da composição do índice final.

Cabe uma reflexão quanto à divisão igualitária das taxas: o modelo acabou apresentando um perfil voltado à produção. Por mais que o decisor tenha atribuído taxas igualitárias para as dimensões, a soma dos indicadores técnicos e econômicos (que estão intimamente ligados à produção) representam 50% do índice final.

As descrições das dimensões são apresentadas nas seções seguintes.

7.2.2 Dimensão Ambiental

A dimensão ambiental retrata os resultados de uma Avaliação de Ciclo de Vida em uma pontuação final. A composição da pontuação final da dimensão ambiental é uma soma das categorias de impacto orientadas ao dano (*endpoint*), de acordo com a versão hierárquica (versão *default*) do método Eco-Indicator 99. A implementação deste método de avaliação de impacto é normalizada e ponderada com fatores padrões de ponderação de danos de 40% para saúde humana, 40% para qualidade de ecossistema, e 20% para recursos (GOEDKOOOP *et al.*, 2000).

Neste sentido, optou-se por trabalhar com o modelo de caracterização, normalização e ponderação padrão do método, chamado de versão hierárquica do Eco-Indicator 99. O valor final da dimensão ambiental é baseado na pontuação total obtida na AICV do método aplicado.

Diante do exposto, os indicadores orientados ao dano (*endpoint*) que estão compostos no modelo são: Qualidade de Ecossistema, Saúde Humana e Depleção de Recursos. Tais indicadores são descritos nas seções seguintes.

7.2.2.1 Qualidade de Ecossistema

De acordo com a metodologia do método Eco-Indicator 99 (GOEDKOOOP *et al.*, 2000) o indicador de qualidade de Ecossistema utiliza a diversidade de espécies para mensurar a qualidade de ecossistema. O método expressa o percentual de espécies que são afetadas ou desaparecem de uma área em certo tempo.

Tais modelos são determinados por duas unidades básicas: PAF (*Potentially Affected Fraction*) e PDF (*Potentially Disappeared Factor*). O PAF é a fração potencialmente afetada, determinada com base de dados de toxicidade em organismos terrestres e aquáticos como micro-organismos, plantas, algas, anfíbios, moluscos, crustáceos e peixes; quanto maior a concentração maior o número de espécies afetadas. Já o fator de desaparecimento potencial, o PDF, é uma unidade definida para avaliar o impacto sobre o ecossistema. É expresso um percentual de dano ou de espécies que estão ameaçadas ou em extinção, em uma área específica durante um tempo determinado (GOEDKOOOP *et al.*, 2000).

Neste sentido, o Eco-Indicator 99 avalia a qualidade de ecossistema, em três indicadores: Acidificação e Eutrofização; Ecotoxicidade; Ocupação de Terra. Tais indicadores de impacto *midpoint* complementam o modelo e formam o indicador de qualidade de ecossistema.

O Quadro 8 apresenta as categorias de impacto que compõem a qualidade de ecossistema e descreve tais categorias.

Categorias de Impacto		Descrição de Indicadores relacionados à Qualidade de Ecossistema
Qualidade de Ecossistema	Acidificação e Eutrofização	A Acidificação reflete o efeito relativo das emissões totais de gases acidificantes (SO _x , NO _x , HCl, HF, NH ₄) para o ar durante o ciclo de vida. A deposição destas emissões pode acidificar a água e o solo. A Eutrofização reflete o crescimento excessivo de algas causado por emissões de nutrientes limitantes (compostos contendo fósforo ou nitrogênio), direta ou indiretamente aos corpos hídricos e ao solo no ciclo de vida do produto.
	Ecotoxicidade	Expressa os danos causados em espécies expostas à concentração de substâncias tóxicas. Os efeitos são calculados em PAF, com base em dados de toxicidade para organismos terrestres e aquáticos.
	Ocupação de Terra	Avalia o impacto da ocupação de terra sobre o decréscimo de espécies. São utilizados modelos distintos que visam calcular os efeitos da ocupação e conversão do solo de uma área natural em um complexo industrial, assim como os efeitos regionais da ocupação e conversão do solo.

Quadro 8 – Descrição de Indicadores derivados da qualidade de ecossistema

Fonte: Goedkoop *et al.* (2000) e ICCA (2013)

A caracterização, normalização e a ponderação para as categorias seguiram a metodologia do método Eco-Indicator 99. O próximo indicador que compõe a dimensão ambiental é Saúde Humana. Sua descrição e os indicadores de impacto *midpoint* que a compõem são descritos na seção seguinte.

7.2.2.2 Saúde Humana

A categoria de impacto orientada à saúde humana refere-se à saúde de qualquer indivíduo humano, seja ele membro desta ou das futuras gerações, que pode sofrer danos e causar a redução de duração de vida com morte prematura, ou causar disfunções corporais temporárias ou permanentes (GOEDKOOOP *et al.*, 2000).

O modelo de avaliação adotado pelo Eco-Indicator 99 envolve a escala DALY (*Disability Adjusted Life Year*). Esta escala representa uma escala de pesos para diversas disfunções causadas por doenças. As pontuações da escala variam de zero a um, o valor zero indica uma saúde perfeita, já o valor 1 (um) significa a morte (GOEDKOOOP *et al.*, 2000).

A utilização deste indicador é dado através da caracterização, normalização e ponderação do método Eco-Indicator 99. Neste sentido, o indicador Saúde Humana é composto por outros cinco indicadores *midpoint*, que estão representados e descritos no Quadro 9.

Categorias de Impacto		Descrição de Indicadores relacionados à saúde humana
Saúde Humana	Carcinogênico	São os danos à saúde humana resultantes de uma emissão de substâncias classificadas nos grupos 1, 2A, 2B e 3 da IARC (<i>International Agency for Research on Cancer</i>).
	Mudança Climática	São doenças infecciosas, cardiovasculares e respiratórias ocasionadas por mudanças climáticas.
	Radiação inorgânica	São cânceres resultantes de radiação iônica.
	Depleção da camada de ozônio	São cânceres e danos aos olhos resultantes da depleção da camada de ozônio.
	Efeitos respiratórios	São doenças respiratórias e câncer, doenças causadas por químicos tóxicos no ar, água potável e alimentos.

Quadro 9 - Descrição de Indicadores derivados da saúde humana
Fonte: Goedkoop *et al.* (2000)

Por fim, o terceiro componente da dimensão ambiental é o indicador de depleção de recursos. A descrição do indicador, bem como sua composição são descritos na próxima seção.

7.2.2.3 Depleção de Recursos

Esta categoria de impacto abordada pelo método Eco-Indicator 99, e que compõe um indicador orientado ao dano (*endpoint*) na dimensão ambiental, refere-se ao esgotamento de recursos fósseis e minerais na biosfera.

A depleção de recursos avalia, através de um modelo teórico, o dano através da energia (em MJ) necessária para extrair um kg do mineral ou recurso fóssil no futuro.

Neste sentido, o Quadro 10, apresenta a descrição dos indicadores relacionados à depleção de tais recursos não renováveis (GOEDKOOP *et al.*, 2000).

Categorias de Impacto		Descrição de Indicadores relacionados à depleção de recursos
Depleção de Recursos	Recursos fósseis	Refere-se à energia adicional exigida no futuro (em MJ) para compensar a menor disponibilidade do recurso fóssil utilizado.
	Extração mineral	Refere-se à energia adicional exigida no futuro (em MJ) para compensar a menor disponibilidade do recurso mineral utilizado.

Quadro 10 - Descrição de Indicadores derivados da depleção de recursos
Fonte: Goedkoop *et al.* (2000)

Neste âmbito, foram apresentados todos os indicadores *midpoints* e *endpoints* que compõem a dimensão ambiental. Em resumo, pode-se afirmar que os indicadores, bem como os modelos de caracterização e ponderação utilizados, são aqueles gerados pela versão Hierárquica do método Eco-Indicator 99.

Para a possibilidade de utilização dos indicadores no modelo, foi necessária a normalização das pontuações obtidas no método para a escala cardinal do modelo de apoio à tomada de decisão na produção do painel de madeira MDF. As normalizações de tais indicadores estão apresentadas na seção 7.3.1, p.101.

Dando continuidade aos descritores do modelo multicritério, a próxima seção apresenta dimensão social.

7.2.3 Dimensão Social

A dimensão social foi definida para compor a estrutura decisória do modelo com o objetivo de representar indicadores sociais da empresa junto à área produtiva do painel MDF.

Neste sentido, a condução das entrevistas para a inclusão dos indicadores corporativos sociais na estrutura decisória resultou na definição de dois indicadores, relacionados à segurança do trabalho e saúde ocupacional da produção do painel MDF:

- a) IFAT (Índice de Frequência de Acidentes de Trabalho): Baseado na norma ANSI 16.4 1977 – *American National Standards Institute*, o IFAT é determinado pelo número total de acidentes com dias de afastamento em certo período de tempo.
- b) ISAT (Índice de Severidade de Acidentes de Trabalho): Baseado na norma ANSI 16.4 1977 – *American National Standards Institute*, é a taxa baseada no total de dias perdidos devido a acidentes de trabalho em certo período de tempo.

A empresa pesquisada possui outros indicadores na esfera corporativa social, entretanto, por escolha do decisor, os mesmos foram suprimidos do modelo multicritério. No refinamento da escolha das alternativas, o gestor expôs, ainda, o interesse em incluir, em outra oportunidade, outro indicador social que mede o engajamento de colaboradores e teria importância no processo decisório. Devido ao fato do indicador ser incipiente, o mesmo foi suprimido.

A próxima dimensão que compõe a estrutura decisória multicritério é a Econômica. A seção seguinte apresenta os descritores e indicadores desta dimensão.

7.2.4 Dimensão Econômica

A Dimensão Econômica representa os resultados monetários atrelados à produção do painel de madeira MDF.

O facilitador instigou a busca por indicadores que refletissem o maior número possível de variáveis relacionadas aos aspectos econômicos da produção do painel MDF. Se a empresa pesquisada possuísse um indicador, um índice ou fator de lucratividade por produto específico, por exemplo, seria uma boa opção. Neste caso, haveria uma conjuntura de fatores de preço de venda, custos fixos, custos variáveis,

investimentos e tributações em um mesmo indicador, que poderia ser estratificado para diferentes produtos.

Diante do exposto, os indicadores identificados pelo gestor que permitiram obter dados relativos a cenários produtivos específicos foram:

- a) Custos Fixos: expressos em R\$/m³ de painel MDF produzido, são os custos que se mantêm estáticos (que não se alteram) independente do volume de painel MDF produzido pela empresa;
- b) Custos Variáveis: expressos em R\$/m³ de painel MDF produzido, são os custos que se alteram em função do volume produzido de painel MDF.

Como os dois indicadores que compõem a dimensão econômica são baseados em valores monetários, ambos possuem um pré-requisito para a utilização, ou seja, na regra básica da matemática financeira e engenharia econômica: Não se pode comparar, somar ou subtrair valores que se encontrem em datas diferentes (PILÃO e HUMMEL, 2006). Diante do exposto, é obrigatória a correção monetária desses valores.

Foi estipulado que a correção de valores que se encontram em datas diferentes, por exemplo, a análise dos resultados de um ano comparado ao outro, sejam corrigidos pelo Índice de Preços do Consumidor Amplo (IPC-A/IBGE), o índice oficial do governo brasileiro que mede a inflação acumulada entre períodos.

Por fim, a quarta e última dimensão que compõe o modelo (Dimensão Técnica) é apresentada na seção seguinte.

7.2.5 Dimensão Técnica

A dimensão técnica foi desejada pelo decisor com o objetivo de incluir requisitos relacionados à gestão da qualidade do produto e o atendimento a requisitos normativos e corporativos ao que se refere aos requisitos técnicos e propriedades físico-mecânicas do painel de madeira MDF.

Neste sentido, inicialmente, foram elencados os indicadores relacionados aos requisitos técnicos e métodos de ensaio exigidos para a produção do painel MDF, descritos na norma NBR 15316-2: 2015 - Painéis de fibras de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio (ABNT, 2015).

Ao conduzir as entrevistas para a construção da estrutura decisória do modelo, o facilitador instigou o gestor a utilizar indicadores de maiores amplitudes que refletissem o maior número possível de aspectos técnicos do produto.

Neste sentido, alguns indicadores relativos aos requisitos técnicos normativos previamente listados foram suprimidos, pois estavam englobados em, ao menos um, dos indicadores que compõem a dimensão técnica. São eles:

- a) Homogeneidade do MDF: mede, em percentual (%), o quão homogênea foi a produção de uma determinada classe de produto, lote, produção mensal, etc. considerando os diversos requisitos de métodos de ensaio da norma NBR 15316-2: 2015 (ABNT, 2015). Quanto maior for o indicador de homogeneidade, melhor.
- b) Qualidade Percebida: O indicador de qualidade percebida mede, em percentual (%), o nível de qualidade observada visualmente nos painéis de madeira MDF produzidos. Quanto maior for o valor do percentual, melhor.
- c) Retrabalho: O indicador de retrabalho mede o percentual (%) de material que precisou ser reprocessado devido a defeitos no painel. Quanto menor for o indicador, melhor.
- d) Reclamações de clientes: O indicador de reclamação de clientes mede o número de reclamações de clientes externos que determinado produto obteve. Quanto menor for o indicador, melhor.

Diante dos descritores acima apresentados, encerram-se os resultados delineados durante a fase de pré-experimentação. Com todos os indicadores, dimensões e índice definidos foi possível coletar os dados para os cenários de referência inferior e superior, bem como para os cenários que foram analisados durante o processo de validação.

A coleta dos dados para cada cenário, juntamente com a construção das escalas MACBETH e das taxas de substituição, constituem os resultados da fase de experimentação. Neste sentido, a próxima seção apresenta os resultados da construção de tais escalas e taxas de substituição dos dados coletados para os cenários analisados.

7.3 NORMALIZAÇÕES, ESCALAS MACBETH E TAXAS DE SUBSTITUIÇÃO

Esta seção apresenta as normalizações construídas para indicadores da dimensão ambiental, e as singularidades resultantes de juízos de valor para construção das escalas MACBETH e taxas de substituição que compõe o modelo multicritério.

A dimensão ambiental retrata os resultados obtidos na ACV pelo método Eco-Indicator 99, portanto, diferentemente dos demais indicadores corporativos englobados no modelo, os indicadores da dimensão ambiental não contam com o preenchimento da matriz de julgamento baseada em atratividade realizada no *software* M-MACBETH. Neste sentido, os primeiros indicadores tratados nesta seção referem-se à dimensão ambiental.

7.3.1 Valores de referência e normalização de indicadores da dimensão ambiental

Para a avaliação dos impactos ambientais do ciclo de vida de diferentes cenários do ciclo de vida da produção do painel MDF, foram coletados os dados referentes aos dois cenários produtivos tidos como “neutro” e “bom”.

Os dados coletados (Inventário do Ciclo de Vida e Indicadores Corporativos) para ambos os cenários na folha de coleta de dados (Apêndice C) alimentaram a modelagem do ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF. A modelagem construída, no *software* Umberto, conforme delineamentos da seção 6.1.4, está ilustrada no Apêndice E.

Diante dos dados coletados para cenários “neutro” e “bom”, avaliou-se o ciclo de vida da produção do painel MDF. A Tabela 1 revela os resultados (pontuações) obtidos para a avaliação de impactos do ciclo de vida e as funções de valores definidas para cada indicador envolvido no método.

Os resultados apresentados na Tabela 1 ilustram as pontuações obtidas nos indicadores da dimensão ambiental para um cenário definido como “neutro” (pontuação de referência igual a 0 (zero) na escala cardinal MACBETH) e para um cenário definido como “bom” (pontuação de referência igual a 100 (cem) na escala cardinal MACBETH).

INDICADORES DE IMPACTO	CENÁRIO "NEUTRO" Referência Inf.		CENÁRIO "BOM" Referência Sup.		Funções de valores para normalização na escala cardinal MACBETH
	Qtde.	Unidade	Qtde.	Unidade	
Qualidade de Ecossistema					
Acidificação e Eutrofização	0,26	pontos	0,19	pontos	$y = -1295,5x + 341,74$
Ecotoxicidades	0,11	pontos	0,08	pontos	$y = -2907,1x + 321,64$
Ocupação de Terra	2,45	pontos	1,93	pontos	$y = -192,52x + 471,34$
TOTAL	2,82	pontos	2,19	pontos	$y = -158,47x + 447,33$
Saúde Humana					
Carcinogênicos	0,4167	pontos	0,3262	pontos	$y = -1105,4x + 460,59$
Mudança Climática	0,8994	pontos	0,6685	pontos	$y = -433,05x + 389,48$
Radiação Iônica	0,0073	pontos	0,0057	pontos	$y = -62883x + 461,34$
Depleção da Camada de Ozônio	0,0004	pontos	0,0003	pontos	$y = -809969x + 347,86$
Efeitos Respiratórios	2,9651	pontos	2,1936	pontos	$y = -129,61x + 384,32$
TOTAL	4,29	pontos	3,19	pontos	$y = -91,355x + 391,82$
Recursos					
Recursos fósseis	7,92	pontos	5,60	pontos	$y = -43,099x + 341,31$
Extração Mineral	0,0026	pontos	0,0021	pontos	$y = -188975x + 496,91$
TOTAL	7,92	pontos	5,60	pontos	$y = -43,089x + 341,34$
PONTUAÇÃO TOTAL	15,03	pontos	10,99	pontos	$y = -24,713x + 371,52$

Tabela 1 – Resultados da Avaliação de Impactos para cenários de referência
Fonte: Autoria Própria

Todos os indicadores da dimensão ambiental foram normalizados para a escala cardinal MACBETH com equações de retas ($y = ax + b$), conforme descrito na seção 6.2.3.

Diante do exposto, a dimensão ambiental do modelo apresenta seus resultados conforme a normalização apresentada na Figura 20.

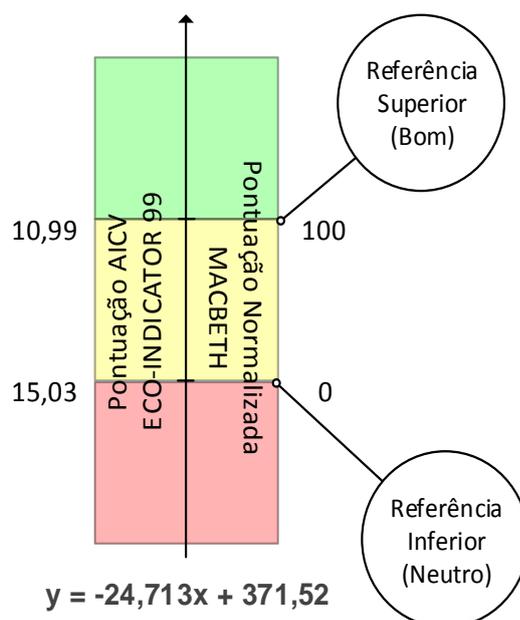


Figura 20 - Normalização e função de valor para dimensão ambiental
Fonte: Autoria própria

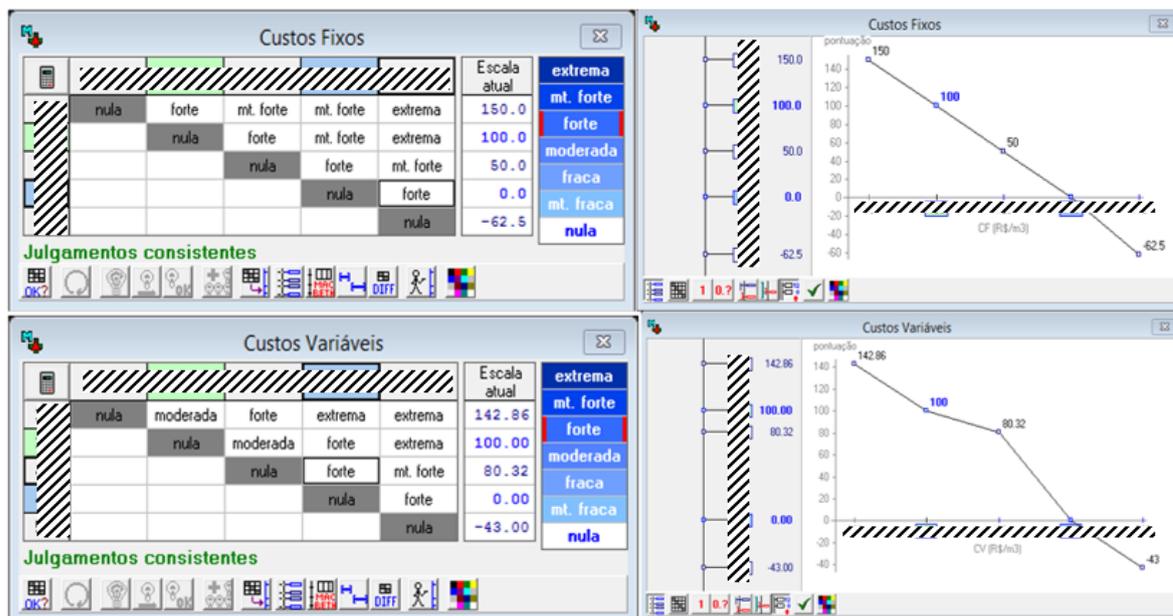
Analisando a Figura 20, pode-se afirmar que: se o resultado final da ACV de um cenário qualquer de produção de painéis de madeira MDF utilizando a versão padrão do método Eco-Indicator 99, for menor que 10,99, é considerado um ótimo resultado para a empresa. Se o resultado for entre 10,99 e 15,03 é considerado satisfatório, e se for maior que 15,03 é considerado um resultado ruim.

A seção seguinte apresenta a construção das taxas de substituição e valores de referência para os indicadores corporativos envolvidos na dimensão econômica do modelo multicritério.

7.3.2 Valores de referência, escala MACBETH e taxas de substituição da dimensão econômica

A partir desta seção, os indicadores do modelo multicritério foram construídos utilizando a escala MACBETH para julgamento de valores baseados em atratividade. Portanto, foram aqui apresentadas as matrizes de julgamento para os indicadores e as respectivas escalas MACBETH, obtidas.

A Figura 21 ilustra a matriz de julgamento e a escala MACBETH obtida para cada um dos indicadores da dimensão econômica.



*Os dados não puderam ser divulgados por serem confidenciais

Figura 21 - Matrizes de julgamento e escalas MACBETH para indicadores da dimensão econômica

Fonte: Autoria Própria

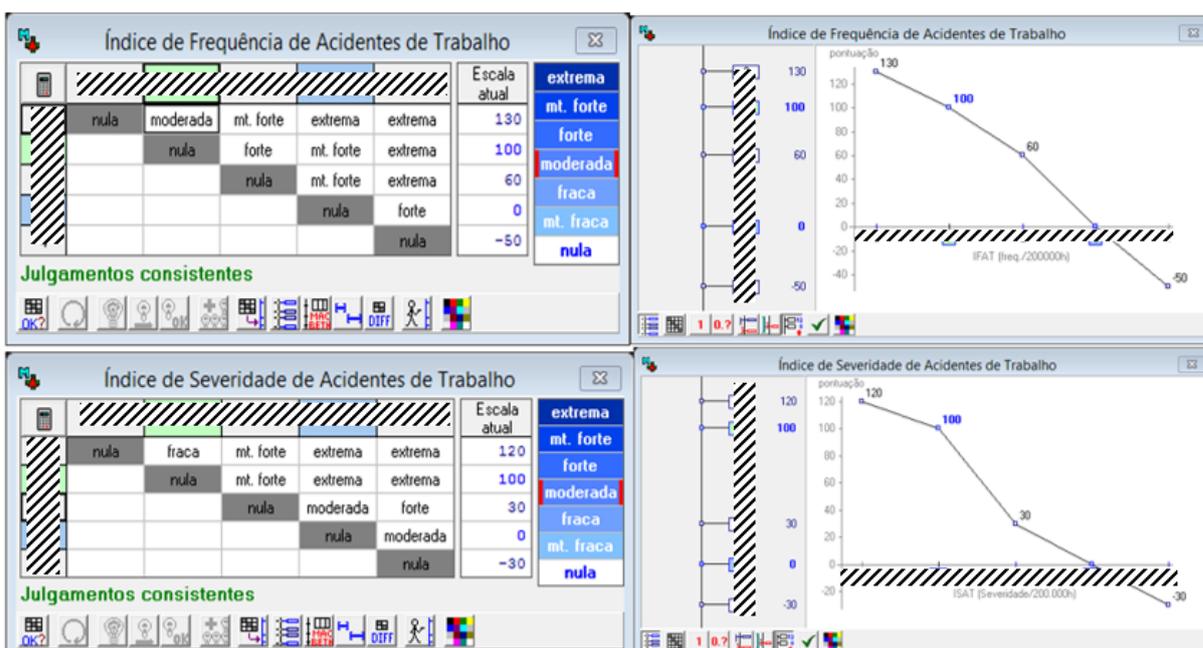
A definição dos limites inferiores (em azul) e dos limites superiores (em verde) deu-se com base nos dados coletados para cenários de referência. De acordo com o julgamento de atratividade entre as opções, puderam-se construir as escalas MACBETH. Ao término de cada construção, as escalas puderam ser ajustadas (dentro dos limites permitidos pelo MACBETH) para retratar e legitimar a percepção de juízo de valor e atratividade entre opções do respectivo decisor. Porém, o decisor optou por não realizar ajustes nas escalas fornecidas pelo MACBETH.

Definidos os valores de referência e a escala MACBETH, foram definidas as taxas de substituição para a dimensão econômica. A composição da dimensão econômica foi definida com a parcela de 25% relativa aos resultados do indicador de custos fixos e 75% relativo aos resultados do indicador de custos variáveis.

Segundo a percepção do gestor, a importância dos custos variáveis necessitou ser retratada no modelo decisório devido à participação que o mesmo apresenta para a composição do custo final do produto. O critério adotado para as taxas de substituição foi baseado na contribuição de cada indicador para o custo final do painel MDF. A próxima seção apresenta os valores de referência, a construção da escala MACBETH e as taxas de substituição para a dimensão econômica.

7.3.3 Valores de referência, escala MACBETH e taxas de substituição da dimensão social

As métricas dos próximos indicadores, apresentados na Figura 22, referem-se à dimensão social do modelo desenvolvido.



*Os dados não puderam ser divulgados por serem confidenciais

Figura 22 - Matrizes de julgamento e escalas MACBETH para indicadores da dimensão social
Fonte: Autoria Própria

Como é possível observar na Figura 22, as matrizes de julgamento para os indicadores da dimensão social foram julgados como consistentes e a escala MACBETH foi construída de acordo com a definição dos valores de referência inferiores e superiores.

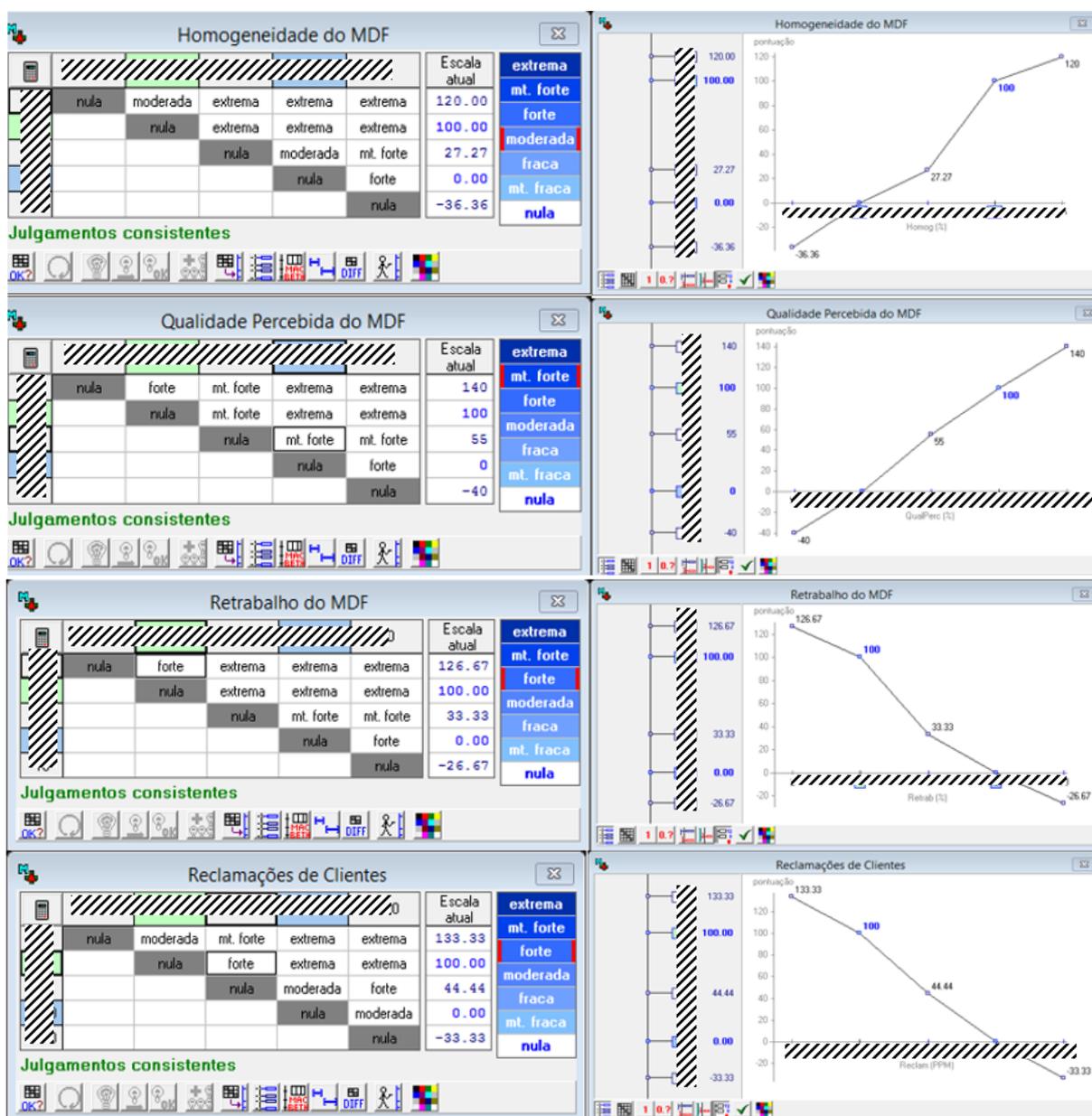
Da mesma forma, ao término dos julgamentos de atratividade, o decisor ficou livre para ajustar os valores de escala (dentro dos limites permitidos pelo MACBETH) para representar singularidades de cada indicador no contexto analisado, mas optou, novamente, em não ajustar a escala proposta pelo MACBETH.

A definição das taxas de substituição para a dimensão social ocorreu de maneira igualitária, ambos os indicadores (IFAT e ISAT) contribuem com 50%, cada, para a composição da dimensão social. Por fim, as métricas da quarta dimensão (Técnica) são apresentadas na seção seguinte.

7.3.4 Valores de referência, escala MACBETH e taxas de substituição da dimensão técnica

A Figura 23 apresenta as matrizes de julgamento preenchidas e as escalas

MACBETH, construídas, pelos julgamentos apresentados.



*Os dados não puderam ser divulgados por serem confidenciais

Figura 23 - Matrizes de julgamento e escalas MACBETH para indicadores da dimensão técnica
Fonte: Autoria Própria

Observa-se que, após o processo de avaliação de consistência nos julgamentos apresentados no *software* M-MACBETH, todos os julgamentos apresentados foram consistentes. O decisor ficou livre para realizar ajustes nas escalas construídas, dentro dos limites oferecidos pelo *software* para cada valor de referência dos indicadores. O decisor optou por também não realizar ajustes para tais indicadores.

Quanto à construção das taxas de substituição para composição da

pontuação da dimensão técnica, o decisor trabalhou com as seguintes taxas: Homogeneidade (40%), Qualidade percebida (20%), Retrabalho (20%) e Reclamações de clientes (20%). O critério utilizado para maior destaque no indicador de homogeneidade é dado pelo fato de ser um indicador composto por todos os requisitos normativos de especificação técnica do painel MDF.

As métricas e especificações de todos os indicadores que compõem o índice final foram definidas. Neste enlace, a seção seguinte apresenta a composição das taxas de substituição para a composição do índice final.

7.3.5 Taxas de substituição para composição do índice final

Pelo fato da empresa pesquisada possuir uma política corporativa baseada nas três esferas da sustentabilidade, o decisor optou por atribuir taxas de substituição igualitárias para cada uma das dimensões do modelo, incluindo a dimensão técnica. Diante disso, cada dimensão contribui com uma taxa de substituição de 25% na composição final do índice.

A Figura 24 apresenta todas as taxas de substituição (em vermelho) definidas para o modelo multicritério.

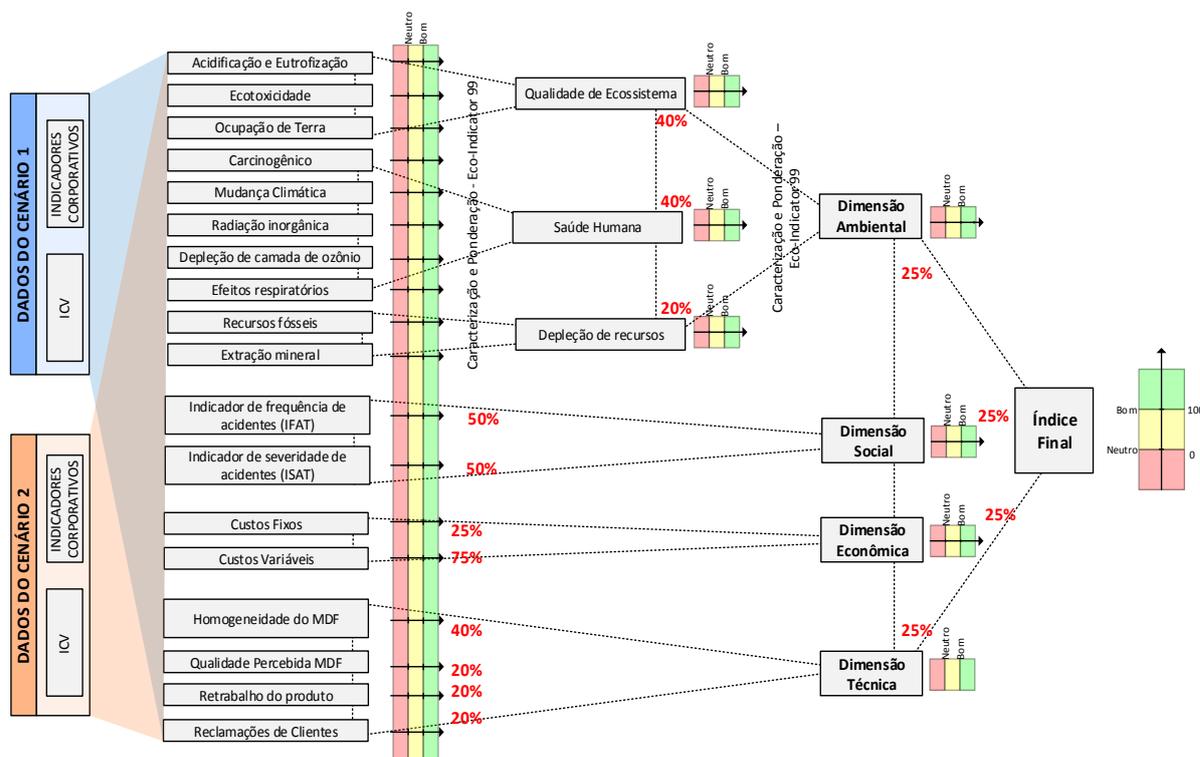


Figura 24 - Identificação de taxas de substituições no modelo multicritério
Fonte: Autoria Própria

Com a definição das taxas de substituição e com a coleta de dados realizada (Apêndice C), os resultados delineados na fase de experimentação, foram alcançados. Neste sentido, a seção seguinte dá início à apresentação dos resultados que envolvem da pós-experimentação (validação do modelo, interpretações de cenários e aprendizagens).

7.4 VALIDAÇÃO DO MODELO, INTERPRETAÇÃO DE CENÁRIOS E APRENDIZAGENS OBTIDAS

Esta seção objetiva relatar a atividade de validação do modelo, a interpretação dos cenários analisados e as aprendizagens obtidas com base nos resultados alcançados.

A primeira análise definida para a validação envolveu um processo decisório de escolha entre variações na tecnologia do processo produtivo da produção do painel MDF. Neste sentido, foram coletados dados para dois diferentes cenários:

- Cenário 1 – O processo produtivo não contava com o descascador de madeira operando na fábrica e o aquecimento do óleo térmico utilizado na prensa contínua era realizado via combustão de gás natural.

- Cenário 2 – O processo produtivo conta com o uso do descascador de madeira na fábrica e o aquecimento do óleo térmico utilizado na prensa contínua é realizado via biomassa (cascas de madeira provenientes do descascador).

Os dados (ICV e indicadores corporativos) que alimentam o modelo multicritério e que são referentes aos dois cenários foram coletados no campo “Análise 1”, Apêndice C. Os resultados obtidos na AICV, bem como os valores dos indicadores da dimensão ambiental na escala MACBETH apresentam-se no Apêndice F.

A Figura 25, apresenta os resultados encontrados pelo modelo multicritério para a Análise 1 (Cenário 1 *versus* Cenário 2). Considerando um processo decisório que envolve a escolha de um processo produtivo com ou sem descascador de madeira, e com a utilização de gás natural ou biomassa para o aquecimento de óleo térmico, pode-se afirmar que, de acordo com a estrutura decisória construída pela empresa, o cenário 2 mostra-se mais atrativo que o cenário 1, com índice final de 85,43 *versus* 14,23.

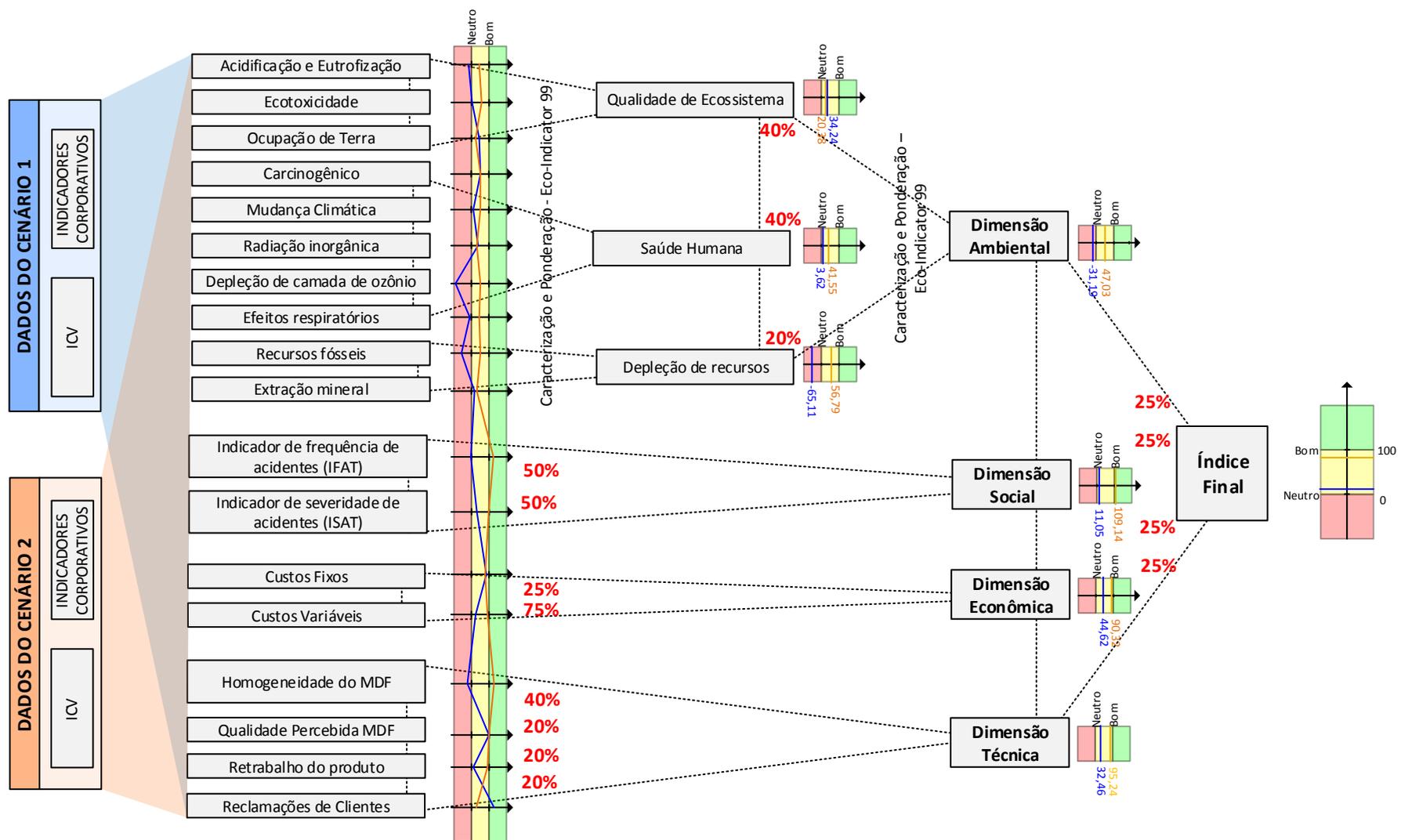


Figura 25 - Resultados do modelo multicritério para análise decisória 1
 Fonte: Autoria Própria

Para efeitos de validação dos resultados apresentados pelo modelo, foi consultada a opinião do decisor acerca dos resultados esperados para os dois cenários. Esperava-se que o Cenário 2 fosse mais atrativo. Neste sentido, o modelo retratou a percepção de juízo de valor esperada pelo decisor.

O Cenário 2 apresentou melhores resultados nas quatro dimensões analisadas. Na dimensão ambiental, o Cenário 2 mostrou-se mais atrativo nos indicadores *endpoint* de saúde humana e recursos. O cenário 1 mostrou-se mais atrativo para a qualidade de ecossistema devido ao menor consumo de madeira pela diferença de densidade do painel. Isso gerou menor impacto na ocupação de terra.

Interpretando a ACV, nota-se que o Cenário 1, por utilizar apenas gás natural para o aquecimento de óleo térmico da prensa, perdeu notória atratividade em categorias de impacto de depleção da camada de ozônio e recursos fósseis, ficando na zona de resultados ruins para tais categorias. Consequentemente, apresentou resultados ruins para depleção de recursos e para a dimensão ambiental.

Para a dimensão social, os maus resultados operacionais do Cenário 1 para os indicadores IFAT e ISAT atrelados com os bons resultados do Cenário 2 para os indicadores sociais do modelo, garantiram para este, maior atratividade.

Na dimensão econômica, foi utilizado o índice de correção IPC-A (IBGE) para corrigir os valores de custos, conforme orientado nos procedimentos metodológicos. A grande diferença entre os resultados desta dimensão está relacionada ao custo variável referente ao consumo de gás natural do Cenário 1. Isso resultou em maior atratividade do cenário 2 (90,32 *versus* 44,62).

Por fim, a dimensão técnica também revelou maior atratividade para o Cenário 2. Tal fato se deu, principalmente, pelos resultados obtidos nos cenários para o indicador de homogeneidade do painel. A tendência esperada para a reclamação dos clientes era que o cenário 1 apresentasse piores resultados, o que não ocorreu. O decisor foi questionado, e afirmou que, houve uma mudança no perfil do consumidor durante os períodos analisados, o que interferiu no número de reclamações e na forma de gestão deste indicador pela empresa. Durante a próxima seção (aprendizagens geradas) é discutido tal fato.

A segunda análise decisória realizada para situações que envolvem a escolha de variações de parâmetros técnicos do produto foi realizada e a Figura 26 ilustra os resultados alcançados pelo modelo. De acordo com as métricas definidas pela empresa, o cenário 2 mostrou-se mais atrativo que o primeiro.

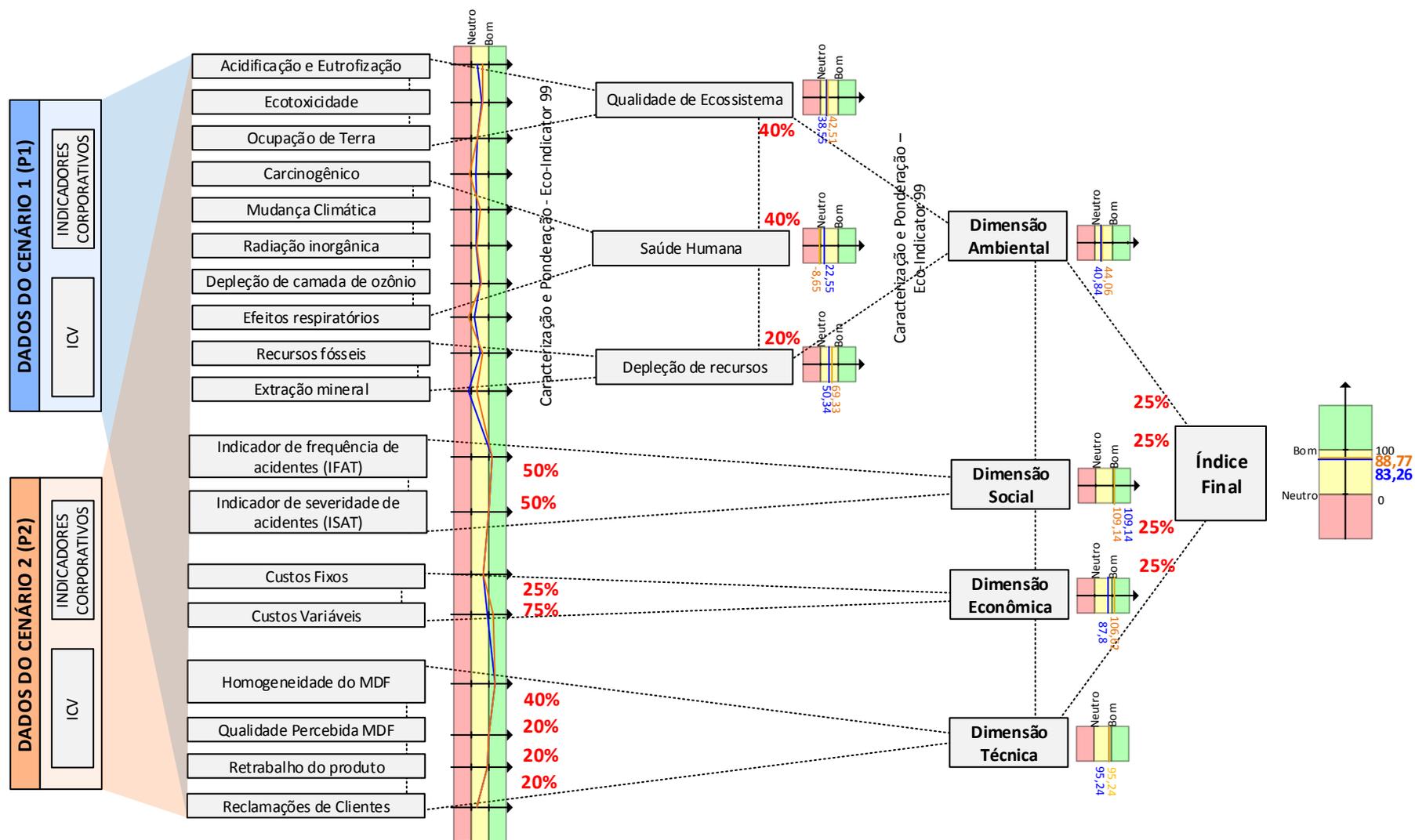


Figura 26 - Resultados do modelo multicritério para análise decisória 2
 Fonte: Autoria Própria

Os resultados obtidos na segunda análise decisória envolveram o Cenário 1 produtivo de painel (P1) de madeira MDF com resina de baixa razão molar *versus* o Cenário 2 com o painel (P2) produzido com uma resina de maior razão molar. Quanto menor é a razão molar da resina, maior é o consumo de resina na produção de painel. Entretanto, quanto maior for a razão molar, maior será a emissão de formaldeído livre do painel.

De acordo com a percepção esperada pelo gestor, acreditava-se que os resultados fossem próximos, com variações, principalmente, na dimensão econômica por conta do maior custo produtivo do P1 pelo maior consumo de resina. Os resultados da ACV para os dois painéis eram desconhecidos, visto que o P1 consome mais resina, com menor razão molar e menor emissão de formaldeído.

Os resultados apresentados na dimensão ambiental foram bastante próximos. O maior consumo de resina no Cenário 1, resultou em resultados ruins para a ACV, em especial na extração mineral. Já a maior razão molar e a maior emissão de formaldeído livre nas fronteiras *cradle-to-gate* do painel MDF resultam em um pior desempenho para a categoria de impacto de saúde humana, no Cenário 2. Em resumo, a ACV realizada mostrou que o Cenário 1 apresentou melhores resultados apenas em carcinogênicos e efeitos respiratórios, e no dano para a saúde humana.

Para as dimensões, social e técnica, os resultados foram similares pelo fato dos dados serem os mesmos. Como os dados do cenário 2 referem-se a uma simulação de produção, não havia dados reais relacionados especificamente a cada tipo de painel MDF nestes cenários. Os dados coletados para tais indicadores referem-se ao último dado disponível da empresa.

Por fim, a dimensão econômica do modelo multicritério revelou a percepção esperada pelo decisor. O maior consumo de resina resulta no aumento dos custos variáveis (que representam 75% da dimensão econômica) para o cenário 1. Neste sentido, O Cenário 2 apresentou-se mais atrativo perante o Cenário 1, na dimensão econômica.

O fato dos resultados obtidos no índice final serem muito próximos e devido aos pressupostos e incertezas assumidas na ACV pelo uso de ICVs secundários, pode-se afirmar que os resultados do modelo podem ser utilizados como auxílio à tomada de decisão, mas apresentam limitações quanto às conclusões científicas absolutas sobre o desempenho da ACV destes dois produtos analisados.

A Figura 27 apresenta os resultados da terceira análise de validação:

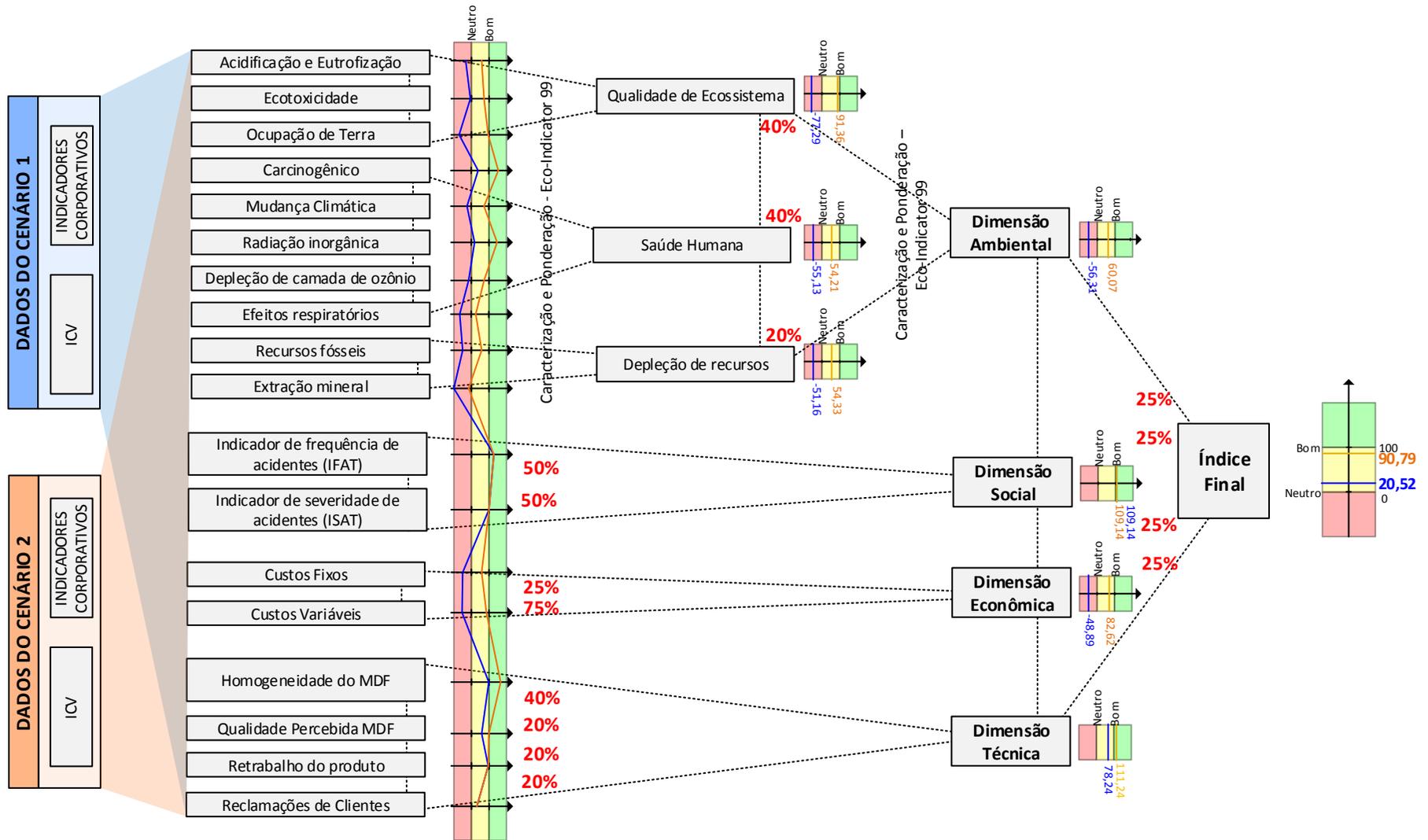


Figura 27 - Resultados do modelo multicritério para análise decisória 3
 Fonte: Autoria Própria

A terceira análise realizada para a validação do modelo compreendeu um processo decisório que envolve escolhas entre a produção de painéis MDF com espessuras diferentes. Para tanto, foi analisado o Cenário 1 com a produção de um painel de madeira MDF de 5,5 mm de espessura *versus* o Cenário 2 com a produção de um painel de madeira MDF de 25 mm de espessura. Os resultados indicam que a produção de 1,0 m³ de painel 25 mm é muito mais atrativa que a produção dos mesmos 1,0 m³ do painel de 5,5 mm. (90,79 *versus* 20,52, para o índice final).

Para a validação, a percepção do gestor previa melhores resultados para a produção do painel de 25 mm de espessura, pelo fato da produção do painel 5,5 mm necessitar uma densidade maior do painel, gerando maior consumo de madeira e resina, e apresentar menores taxas de volume de produção (em m³ de painel) por hora.

Os dados indicam que para todas as dimensões o painel 25 mm é mais atrativo, com exceção da dimensão social, onde os dados alimentadores são iguais pelo fato de não existir disponibilidade de dados IFAT e ISAT para uma espessura específica.

Observam-se na dimensão ambiental, que os resultados da ACV revelam uma simetria entre os resultados. O Cenário 1 (painel 5,5 mm) apresentou, em sua maioria, resultados ruins para os indicadores, devido aos altos valores de consumo na produção. Já o cenário 2, apresentou resultados satisfatórios e bons para tais indicadores, devido ao menor consumo de insumos de madeira, resina e parafina.

A dimensão econômica revelou maior atratividade para a escolha do painel 25mm pelo fato dos custos produtivos fixos e variáveis serem menores. Pelo fato da produção ser contínua e linear, o volume de produção (em m³ de painéis MDF) por hora, que é determinado pelo processo de prensa contínua, é maior para o 25 mm, o que faz com que os custos fixos se diluam.

Por fim, para a dimensão técnica, os resultados indicam maior atratividade para a escolha de produção do painel 25 mm (111,24 *versus* 78,24). Tais resultados são provenientes do melhor desempenho deste painel na homogeneidade e na qualidade percebida do produto. A produção do painel 5,5 mm é mais vulnerável às não conformidades durante o processo produtivo, ocasionando piores resultados na dimensão técnica para o Cenário 1.

Diante do exposto, a seção seguinte relata as principais aprendizagens científicas que puderam ser observadas durante a construção do modelo multicritério e sua validação.

7.4.1 Principais aprendizagens científicas obtidas no desenvolvimento e validação do modelo

O suporte à tomada de decisão do modelo multicritério se fortalece através da aprendizagem que a mesma proporciona. Com o desenvolvimento e validação do modelo foi possível avaliar elementos de aprendizagem e discussões científicas geradas pelo modelo construído.

A interpretação dos dados e resultados da ACV proporcionaram aprendizagens que contribuem para a comunidade científica, governamental, empresarial e consumidora do produto. Entre as principais aprendizagens resultantes da análise dos resultados da ACV na modelagem do *software* Umberto, estão:

- i. O consumo de resina UF, por ser um material de origem fóssil, mostrou-se representativo para a categoria de impacto de extração mineral. O aumento no consumo de resina gera maior impacto na extração mineral, enquanto o aumento na razão molar gera maiores impactos para as categorias de saúde humana, tais como carcinogênicos e respiratórios (pela emissão de formaldeído livre);
- ii. O aumento no consumo de madeira nos painéis de madeira MDF provoca o aumento no indicador de ocupação de terra. A expansão no consumo de madeira é dada pelo aumento da densidade do painel MDF;
- iii. O aumento de consumo do gás natural no processo produtivo reflete no incremento de impacto em categorias de depleção de recursos, camada de ozônio e recursos fósseis;
- iv. A espessura final do painel reflete diretamente em consumo e na densidade do mesmo. Quanto mais fino é o painel (5,5 mm, por exemplo) maior é a densidade e o consumo de químicos. Neste sentido, os impactos potenciais nos indicadores da ACV sofrem notáveis aumentos.
- v. Devido à mínima diferença entre os resultados da ACV para o painel produzido com resinas de razões molares diferentes, toma-se como lição aprendida que é válido levantar dados primários no Brasil, com relação às emissões geradas pela diferença de razão molar na fabricação das resinas e na fábrica de MDF, de modo a aumentar a

confiabilidade nos resultados da análise. Outro fato que permitiria maior conhecimento agregado à análise seria investigar as emissões geradas pelo painel durante a fase de uso.

Ao que se refere a outras aprendizagens obtidas com a construção, validação e interpretação do modelo multicritério, é válido expor:

- i. A opção de utilização de indicadores robustos que envolvem uma série de dados em sua composição, como é o caso dos indicadores de custos fixos, custos variáveis, homogeneidade, resultaram em uma compactação estrutural e limitação numérica de indicadores corporativos no modelo.
- ii. Por outro lado, a opção de utilizar indicadores que já existissem na empresa fez com que o acesso aos dados fosse facilitado, não sendo necessário construir e/ou levantar novas informações para alimentar o modelo.
- iii. Os resultados gerados pelo modelo multicritério permitiram uma reflexão ao gestor acerca dos indicadores utilizados. O caso específico retratado na Análise 1 da validação, onde se teve um resultado considerado ruim para a homogeneidade do painel para o Cenário 1, apresentou contradição com o indicador de reclamações de clientes. A tendência é que quanto menor for a homogeneidade do painel, maior seja o número de reclamações de clientes. Esse fato forneceu uma reflexão sobre a gestão dos indicadores: o indicador de reclamações de clientes era gerido da mesma forma durante os períodos analisados? Os clientes não reclamavam? Ou, a exigência do mercado aumentou? Enfim, foram identificadas aprendizagens proporcionadas pelo modelo que permitem ao decisor refletir e analisar o sistema de gestão.
- iv. O modelo multicritério construído apresentou um perfil de direcionamento à produção. As taxas de substituição construídas evidenciam que, apesar de uma distribuição igualitária (25%) entre as dimensões, a área de produção fabril (que reflete indicadores da dimensão técnica mais a dimensão econômica) possui 50% de representação no índice final. Diante disso, nota-se ainda que a

categoria custos variáveis e a categoria de homogeneidade possuem maiores sensibilidades de interferência no valor obtido no índice final.

- v. Outro aprendizado gerado pelo modelo consiste na sugestão de inserção de um indicador relacionado à lucratividade específica de cada produto. O custo de produção de 1m³ do painel de 5,5 mm, por exemplo, foi bastante alto, entretanto, isso não significa que, necessariamente, seja um resultado ruim. Depende da agregação de valor e lucratividade que o produto possa gerar.

Tais pontos de aprendizagem permitiram aprimorar e compreender causas e efeitos no ciclo de vida da produção do painel MDF; compreender resultados e aprimorar a gestão corporativa; inovar e oferecer derivações em modelos baseados em ACV para auxílio à tomada de decisão e melhorias de desempenho.

Diante do exposto, encerram-se os resultados apresentados pela tese e o capítulo seguinte apresenta as considerações finais e sugestões para estudos futuros.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo geral desenvolver um modelo multicritério amparado na metodologia de avaliação do ciclo de vida do produto e em indicadores corporativos, apoiando, de forma integrada, a tomada de decisões no ambiente industrial pesquisado. Para que este objetivo pudesse ser atingido, foi necessário alcançar e responder aos objetivos específicos traçados na introdução deste trabalho.

Em resposta ao objetivo específico vinculado à modelagem do sistema do ciclo de vida do painel MDF pesquisado em um *software* de ACV, foi desenvolvido e apresentado o ICV de diferentes cenários da produção do painel MDF, através de dados primários coletados na fábrica pesquisada. A modelagem do ciclo de vida foi realizada no *software* Umberto com a base de dados Ecoinvent v.2.2. O ICV e os resultados da ACV para diferentes cenários produtivos do MDF contribuem para o cenário científico no que se refere ao avanço e construção de base de dados de ICVs nacionais.

Quanto ao segundo objetivo específico que tratou da identificação do método para Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV), com suas respectivas categorias de impacto que compuseram o modelo, pôde-se concluir que a escolha do método Eco-Indicator 99 foi adequada e condizente para os resultados esperados nesta tese. O uso dos fatores de caracterização, normalização e ponderação do método revelaram o desempenho através dos indicadores de categorias de impacto originais do método (*midpoint* e *endpoint*) e, em um índice final (referente à dimensão ambiental do modelo).

O terceiro objetivo específico envolveu a identificação dos indicadores corporativos que, junto com os indicadores da AICV, estruturaram o modelo. Neste aspecto, o modelo multicritério construído baseou-se em um aspecto interativo, onde os julgamentos, os pontos de vista e as singularidades do gestor definiram a estrutura e os indicadores compreendidos pelo modelo multicritério.

Ao todo, foram identificados oito indicadores corporativos no modelo. O decisor optou por utilizar indicadores do cotidiano da empresa, de modo a não ter que criar novos indicadores de gestão exclusivos. Foram incluídos no modelo apenas os indicadores relacionados e que possuem influência na produção do painel MDF.

Outros indicadores corporativos da empresa que não interferem nas decisões da produção do painel foram suprimidos do modelo.

O próximo objetivo específico compreendeu a estruturação do modelo com base nos indicadores previamente selecionados. A estrutura decisória foi dada através de um índice final, quatro dimensões, três subdimensões ambientais e dezoito indicadores. A utilização de um índice final mostrou-se interessante ao apoio da decisão, pois se tem um resultado imediato sobre a atratividade relativa a cada opção. O uso de dimensões facilita o entendimento dos resultados em esferas específicas, e os indicadores possibilitaram visualizar e estratificar os resultados em cada critério.

Para que o índice final, as dimensões e os indicadores estivessem em uma mesma escala e pudessem ser julgados de acordo com os multicritérios, foi utilizado o método MACBETH para criação das escalas e julgamentos de valores. A escolha do referido método para a estruturação e normalização mostrou-se pertinente e pôde-se perceber, através dos resultados preenchidos nas matrizes de julgamento do método, que o perfil decisor mostrou-se em busca das metas e de bons resultados. Apesar do preenchimento das matrizes ter sido compreendido facilmente pelo gestor, foi um processo cauteloso para evitar inconsistências de juízo de valor.

Quanto a resposta ao último objetivo específico que se refere à validação do modelo, foram definidas três situações características que envolvem a tomada de decisão na produção do painel MDF: Decisões envolvendo escolha de variações de processo; variações de parâmetros técnicos de um produto; e, variações de espessuras do painel MDF. Com a validação do modelo foi possível alimentar, calcular e interpretar os resultados gerados pelo modelo para apoiar decisões nas três situações definidas.

O aspecto interativo do modelo era suposto a representar nos resultados o retrato das percepções, julgamentos e singularidades definidas pelo decisor. Neste sentido, o processo de validação do modelo foi efetivado com a concordância observada entre os resultados previamente esperados pelo decisor para cada análise, com os resultados efetivamente gerados pelo método. Os resultados gerados para cada análise apoiam processos de tomada decisão com a apresentação dos resultados quantificados no índice, dimensões e indicadores. No sentido de apoio à decisão, o modelo multicritério também gerou aprendizagens importantes referentes ao ciclo de vida do painel, aos resultados dos indicadores corporativos, e ao

desenvolvimento científico de novos modelos multicritérios de apoio à decisão baseados em ACV.

Neste enlace, as respostas dos objetivos específicos traçados para este trabalho remetem ao alcance do objetivo geral de “desenvolver um modelo multicritério amparado na metodologia de avaliação do ciclo de vida do produto e em indicadores corporativos, a fim de mensurar o desempenho da produção de painéis MDF em diferentes cenários, apoiando, de forma integrada, a tomada de decisões no ambiente industrial pesquisado”. Conclui-se que a construção do modelo multicritério deu condições de utilizar os resultados gerados por uma ACV juntamente com outros indicadores corporativos julgados importantes por uma empresa, para apoiar processos de tomada de decisão. Afirma-se, ainda, que o modelo multicritério desenvolvido apresenta característica generalista e pode ser replicado em outros processos e produtos, seguindo os procedimentos metodológicos elencados nesta tese.

Por fim, apresentam-se algumas sugestões de trabalhos futuros.

8.1 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

No decorrer do desenvolvimento deste estudo foram identificadas algumas oportunidades para o desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados ao tema deste trabalho. São elas:

- Aplicar o modelo construído em outras empresas e em outros produtos, seguindo os passos metodológicos definidos da mesma;
- Incorporar métodos específicos para determinação de taxas de substituição no modelo construído, tais como: *trade-off*, *swing weights* e MACBETH.
- Implementar o modelo construído em *software*;
- Realizar análises de sensibilidade e interpretar resultados gerados pelo uso de outros métodos de AICV no método multicritério;
- Construir outros inventários de ciclo de vida que representem as características brasileiras das matérias-primas do painel de madeira MDF.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15316-2: 2015**: Painéis de fibras de média densidade. Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, ABNT: 2015.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040:2009 Versão Corrigida: 2014**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, 2009a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14044:2009 Versão Corrigida: 2014**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e Orientações. Brasil, 2009b.

ALMEIDA, A. T. **O Conhecimento e o Uso de Métodos Multicritério de Apoio à Decisão**, 2ª Edição, Editora Universitária, Recife, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). **Estudo setorial 2009**: Ano base 2008. Curitiba, 2009. Disponível em: <<http://www.abimci.com.br/wp-content/uploads/2014/02/2009.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PAINÉIS DE MADEIRA (ABIPA). 2014. **Números**. Disponível em: <<http://www.abipa.org.br/numeros.php>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário Estatístico da ABRAF 2013**: Ano base 2012. Brasília, 2013.

ATHENA SUSTAINABLE MATERIALS INSTITUTE. **A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Medium Density Fibreboard (MDF) – 2013 Update**. Preparado por Canadian Wood Council. Ottawa, ON, 2013.

BANA E COSTA, C. A.; ÂNGULO-MEZA, L.; OLIVEIRA, M. D. O método MACBETH e a aplicação no Brasil. **Engevista**, v. 15, nº 1. p. 3-27, 2013.

BANA E COSTA, C. A.; DE CORTE, J.-M.; VANSNICK, J.-C. MACBETH. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, v.11, p.359-387, 2012.

BANA E COSTA, C.A.; DE CORTE, J.M. & VANSNICK, J.C. **On the mathematical foundations of MACBETH**. In: Multicriteria Decision Analysis: state of the art survey [editado por: J.F Greco and S.M. Ehrgott], Springer Verlag, Boston, Dordrecht, Londres, p. 409-442, 2005.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Área de Setores Produtivos 1. **Painéis de Madeira Reconstituída**. Brasília, 2002, 22 p.

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, nº 3–4, 2003.

BARE, J. *et al.* Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 5, nº 6, p. 319-326, 2000

BARE, J. Life cycle impact assessment research developments and needs. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 12, nº 4, p. 341-351, 2010.

BENADUCE, C. **Fabricação de painéis de média densidade (MDF) a partir de fibras de *Eucalyptus Grandis W. Hill ex Maiden e pinus caribara var. hondurensis***. 1998. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

BIAZUS, A.; HORA, A. B.; LEITE, B. G. P. **Panorama de mercado: painéis de madeira**. (BNDES Setorial). 32ª 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: 11 abr. 2014.

BLANCO-DAVIS, E.; ZHOU, P. LCA as a tool to aid in the selection of retrofitting alternatives. **Ocean Engineering**, v. 77, p. 33-41, 2014.

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

BRANCO, David A. C. **Avaliação do real potencial de redução das emissões de CO₂ equivalente com uso da captura em uma UTE a carvão.** 2012. 173f. Tese (Doutorado / Planejamento Energético) - Programa de Planejamento Energético, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 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.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm> Acesso em: 17 fev. 2015.

BRILHUIS-MEIJER, Ellen. **Weighting: Applying a Value Judgement to LCA Results.** 2014. Disponível em: <<http://www.pre-sustainability.com/weighting-applying-a-value-judgement-to-lca-results>>. Acesso em: 25 out. 2014.

BURTON, J.; HUBACEK, K. Is small beautiful? A multicriteria assessment of small-scale energy technology applications in local governments. **Energy Policy**, v. 35, n. 12, p. 6402-6412, 2007.

CHAVES, Maria Cecília de Carvalho; GOMES, Carlos Francisco Simões. **Avaliação de biocombustíveis utilizando o apoio multicritério à decisão.** Produção, v. 24, nº 3, p. 495-507, 2014.

CHERUBINI, Edivan; RIBEIRO, Paulo Trigo. **Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil.** Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia - IBICT, 2015.

CINELLI, M.; COLES, S. R.; KIRWAN, K. Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. **Ecological Indicators**, v. 46, p. 138-148, 2014.

COM - COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. **Integrated Product Policy: Building on Environmental Life-Cycle Thinking.** Brussels, 2003.

DEL BORGHI, A. *et al.* The application of the environmental product declaration to waste disposal in a sanitary landfill: Four case studies. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, nº 1, p. 40-49, 2007.

ECOINVENT. **The ecoinvent Database**. 2014. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/database>>. Acesso em: 27 out. 2014.

ELEOTÉRIO, J. R.; TOMAZELLO FILHO, M.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Propriedades físicas e mecânicas de painéis MDF de diferentes massas específicas e teores de resina. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 10, nº 2, 2000.

ENSSLIN, L.; MONTIBELLER NETO, G.; NORONHA, S. M. **Apoio à decisão: metodologia para estruturação de problemas e avaliação multicritério de alternativas**. Florianópolis: Insular, 2001.

ENSSLIN, Leonardo *et al.* Avaliação do desempenho de empresas terceirizadas com o uso da metodologia multicritério de apoio à decisão - construtivista. **Pesquisa Operacional**, v.30, nº 1, p. 125-152, 2010.

FAIST EMMENEGGER, M., HECK, T., JUNGBLUTH, N. **Sachbilanzen von Energiesystemen**. Ecoinvent report version 2.0. v. 6. Dübendorf and Villigen: Swiss Centre for LCI and PSI, 2007.

FANTOZZI, F.; BURATTI, C. Life cycle assessment of biomass chains: Wood pellet from short rotation coppice using data measured on a real plant. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, nº 12, p. 1796-1804, 2010.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - STATISTICS DIVISION (FAOSTAT). **Forestry database**: Forestry Production and Trade. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/download/F/FO/E>>. Acesso em: 28 jun. 2014.

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.

FRISCHKNECHT, R., TUCHSCHMID, M., FAIST EMMENEGGER, M., BAUER, C., DONES, R. **Strommix und Stromnetz**. Ecoinvent report version 2.0. v. 6. Dübendorf and Villigen: Swiss Centre for LCI and PSI, 2007.

GHG PROTOCOL – GREENHOUSE GAS PROTOCOL. **Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard**. 148 p. World Resources Institute and Business Council for Sustainable Development, 2011.

GLORIA, Thomas. **Softwares**: Links to LCA topics found on the web. 2014. Disponível em: <http://www.life-cycle.org/?page_id=125>. Acesso em: 09 jul. 2014.

GOEDKOOP 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.

GOEDKOOP M.; HOFSTETTER P.; MÜLLER-WENK R.; SPRIENSMA R. The Eco-Indicator 98 Explained. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.3, nº 6, p.352-360, 1998.

GOEDKOOP, M.; EFFTING, S.; COLLIGNON M. **The Eco-indicator 99**. A damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment Manual for Designers. PRé Consultants B.V, Amersfoort, 2000.

GOMES, E. G.; MELLO, J. C. C. B. S.; MANGABEIRA, J. A. C.. Índice multicritério de bem-estar social rural em um município da Região Amazônica. **Pesquisa Operacional**, v.28, nº 1, pp. 141-160, 2008.

GOMES, L.F.A.M.; GOMES, C.F.S.; ALMEIDA, A.T. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. 2ª Ed. São Paulo: Atlas, 2006.

GUINÉE, J. (Ed.) *et al.* **Handbook on Life Cycle Assessment**: Operational Guide to the ISO Standards. Series: Eco-efficiency in industry and science. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.

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, nº 80, Copenhagen, Dinamarca, 2005.

HERVA, M.; ROCA, E. Review of combined approaches and multi-criteria analysis for corporate environmental evaluation. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, nº 0, p. 355-371, 2013.

HSU, A, *et al.* **The 2014 Environmental Performance Index**. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law & Policy, 2014.

HUPPES, Gjal; VAN OERS, Laurant. **Background Review of Existing Weighting Approaches in Life Cycle Impact Assessment (LCIA)**. Luxemburgo: Publications Office of The European Union, 2011. 88 p.

HURSON, C.; SISKOS, Y. A synergy of multicriteria techniques to assess additive value models. **European Journal of Operational Research**, v. 238, nº 2, p. 540-551, 2014.

IBICT (Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia). **IBICT fará inventário brasileiro em ACV**. 2014. Disponível em: <<http://www.ibict.br/ibict-fara-inventario-brasileiro-em-acv>>. Acesso em: 13 nov. 2014.

ICCA (International Council of Chemical Associations). **How to Know If and When it's Time to Commission a Life Cycle Assessment: An Executive Guide**. ICCA, 2008.

IFEU (INSTITUT FÜR ENERGIE- UND UMWELTFORSCHUNG HEIDELBERG GMBH) **Life Cycle Assessment Software**: Umberto. 2014. Disponível em: <<https://www.ifeu.de/english/index.php?bereich=oek&seite=umberto>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

ILCD (INTERNATIONAL REFERENCE LIFE CYCLE DATA SYSTEM). **ILCD Handbook: Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment**. 2010a. Disponível em: <<http://epca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2014.

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

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Fourth Assessment Report: Climate Change 2007**. Disponível em: <www.ipcc.ch>. Acesso em: 01 nov. 2014.

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, nº 3, 2004.

IWAKIRI, S. *et al.* **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

JOLLIET, O. *et al.* The LCIA midpoint-damage framework of the UNEP/SETAC life cycle initiative. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 9, nº 6, p. 394-404, 2004.

JOLLIET, O. *et al.* IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v.8, nº 6, p.324-330, 2003.

KELLENBERGER, D., ALTHAUS, H.J., JUNGBLUTH, N., KÜNNIGER, T. **Life Cycle Inventories of Building Products**. Ecoinvent report version 2.0. 17. Dübendorf: Swiss Centre for LCI and Empa - TSL, 2007.

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

LEVIN, Hal. **Life Cycle Assessment Software, Tools and Databases**. 2014. Disponível em: <<http://www.buildingecology.com/sustainability/life-cycle-assessment/life-cycle-assessment-software>>. Acesso em: 09 jul. 2014.

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

LUCAS, G.; BEZZO, F.; CARVALHO, A. Optimal design of a bioethanol supply chain considering different environmental impact assessment methods. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 33, p. 973-978, 2014.

MACEDO, L. B. **Painéis OSB de madeira Pinus sp. e adição de partículas de polipropileno biorientado (BOPP)**. 2014. Dissertação (Mestrado em Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

MARTÍNEZ, E. *et al.* Comparative evaluation of life cycle impact assessment *software* tools through a wind turbine case study. **Renewable Energy**, v. 74, nº 0, p. 237-246, 2015.

MATOS, L. G. M., GONÇALVES, R. M., CHAGAS, F. B. **Painéis de Madeira no Brasil: Panorama e Perspectivas**. (BNDES Setorial). 27ª 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: 11 abr. 2014.

MATTHEWS, H. S.; HENDRICKSON, C.T.; MATTHEWS, D. H. **Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter**. 2014. Disponível em: <www.lcatextbook.com>. Acesso em: 25 out. 2014.

MCDONOUGH; W.; BRAUNGART, M. **Cradle to cradle: remaking the way we do things**. New York: North Point Press, 2009.

METEYER, S. *et al.* Energy and material flow analysis of binder-jetting additive manufacturing processes. **Procedia CIRP**, 2014. p.19-25.

MORENO RUIZ, E. *et al.* **Documentation of changes implemented in ecoinvent Data 3.1**. Zurich: Ecoinvent, 2014. 70 p.

NASCIMENTO, M. F.; ROCCO LAHR, F. A.; CHRISTOFORO, A.L. Painéis tipo OSB fabricados com madeiras brasileiras: produção e avaliação de desempenho. In: CONGRESSO IBERO-LATINO DA MADEIRA NA CONSTRUÇÃO. **Anais...**Coinbra: Universidade de Coimbra, 2011.

NEMECEK, T., KÄGI, T., BLASER, S. **Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems**. Ecoinvent report version 2.0. 15. Dübendorf and Zurich: Swiss Centre for LCI, 2007.

PEREZ GALLARDO, Jorge Raúl. **Ecodesign of large-scale photovoltaic (PV) systems with multi-objective optimization and Life-Cycle Assessment (LCA)**. 2013. 233 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Energética, Civil e Processos, Laboratoire de Génie Chimique, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, 2013.

PEUTTMANN, M; ONEIL E.; WILSON, J. **Cradle to Gate Life Cycle Assessment of U.S. Medium Density Fiberboard Production**. CORRIM: Consortium for Research on Renewable Industrial Materials, Seattle, 2013.

PIEKARSKI, Cassiano Moro *et al.* Environmental profile analysis of MDF panels production: Study in a Brazilian technological condition. **CERNE**, vol.20, nº 3, p.409-418, 2014.

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.

PIERAGOSTINI, C.; AGUIRRE, P.; MUSSATI, M. C. Life cycle assessment of corn-based ethanol production in Argentina. **Science of the Total Environment**, v. 472, p. 212-225, 2014.

PIERAGOSTINI, C.; MUSSATI, M. C.; AGUIRRE, P. On process optimization considering LCA methodology. **Journal of Environmental Management**, v. 96, nº 1, p. 43-54, 2012.

PLEVIN, R. J.; DELUCCHI, M. A.; CREUTZIG, F. Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate-Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers. **Journal of Industrial Ecology**, v. 18, nº 1, p. 73-83, 2013.

POHEKAR, S. D.; RAMACHANDRAN, M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning — A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 8, nº 4, p. 365-381, 2004.

REAP, J. *et al.* A survey of unresolved problems in life cycle assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, nº 4, p. 290-300, 2008.

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.; MOREIRA, M.; FEIJOO, G. Life cycle inventory of medium density fiberboard. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Heidelberg, v. 12, nº 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.

ROWLEY, H. V. *et al.* Aggregating sustainability indicators: Beyond the weighted sum. **Journal of Environmental Management**, v. 111, nº 0, p. 24-33, 2012.

ROY, B. **Multicriteria for Decision Aiding**. London: Kluwer Academic Publisher, 1996.

ROY, P. O. *et al.* Characterization factors for terrestrial acidification at the global scale: A systematic analysis of spatial variability and uncertainty. **Science of The Total Environment**, v. 500–501, nº 0, p. 270-276, 2014.

SANCHEZ SANTIAGO, Francisco Luiz. **Estudo da viabilidade técnica e econômica para aproveitamento de cascas de eucalyptus gerados no processo de fabricação de painéis de madeira**. 2007. 89 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2007.

SCHOENEBOOM, J.; SALING, P; GIPMANS, M. **BASF'S AgBalance™ Methodology**. BASF SE: Ludwigshafen, Germany, 2012.

SCHRYVER, An Maria de. **Value choices in life cycle impact assessment**. 2010. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Matemática e Ciência da Computação, Radboud University, Nijmegen, 2011.

SHUAIB, M. *et al.* Product Sustainability Index (ProdSI). **Journal of Industrial Ecology**, v. 18, n. 4, p. 491-507, 2014.

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, 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, D.A.L., ROCCO LAHR, F.A., GARCIA, R.P., FREIRE, F.M.C.S., OMETTO, A.R. Life cycle assessment of medium density particleboard (MDP) produced in Brazil. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 18, 1404–1411, 2013.

SIMONEN, Kathrina. **Life Cycle Assessment**. New York: Routledge, 2014. 197 p.

SOARES, S. R.; TOFFOLETTO, L.; DESCHÊNES, L. Development of weighting factors in the context of LCIA. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 6–7, p. 649-660, 2006.

SOUZA, R. G. *et al.* Definition of sustainability impact categories based on stakeholder perspectives. **Journal of Cleaner Production**, *In press*, 2014.

SPIELMANN M., DONES R; BAUER C. **Life Cycle Inventories of Transport Services**. Ecoinvent report version 2.0. v. 14. Dübendorf: Swiss Centre for LCI and PSI, 2007.

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, 1999.

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

THOMASSEN, M.A.; DALGAARD, R.; HEIJUNGS, E.; BOER, I. Attributional and consequential LCA of milk production. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 13, p. 339-349, 2008.

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.

UMBERTO NXT. **Umberto: LCA data**. 2014. Disponível em: <<http://www.umberto.de/en/lca-data/>>. Acesso em: 26 out. 2014.

VOLKWEIN, S.; GIHR, R.; KLÖPFFER, W. The valuation step within LCA. The **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 1, n. 4, p. 182-192, 1996.

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.

WANG, X.; CHAN, H. K.; LI, D. A case study of an integrated fuzzy methodology for green product development. **European Journal of Operational Research**, v. 241, n. 1, p. 212-223, 2015

WEIDEMA B. P. *et al.* **Overview and methodology**: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1 (v3). St. Gallen: The ecoinvent Centre, 2013. 161 p.

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.

WERNER F., ALTHAUS H.J., KÜNNIGER T., RICHTER K., JUNGBLUTH N. **Life Cycle Inventories of Wood as Fuel and Construction Material**. Ecoinvent report version 2.0. 9. Dübendorf: Swiss Centre for LCI and Empa - TSL, 2007.

WERNET, G. *et al.* Life cycle assessment of fine chemical production: A case study of pharmaceutical synthesis. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 3, p. 294-303, 2010.

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

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

ZAH R., HISCHIER R. **Life Cycle Inventories of Detergents**. Ecoinvent report version 2.0. 12. Dübendorf: Swiss Centre for LCI and Empa - TSL, 2007.

APÊNDICE A - Folha de Coletas de Dados para ACV de painel MDF

QUESTIONÁRIO 1 (SISTEMA PRODUTIVO PRODUÇÃO MDF)				
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 opera por ano? _____			
3	Qual é a produção anual em m ³ de MDF na fábrica? _____ m ³ de MDF			
4	Na linha abaixo informe o valor mínimo, máximo e médio de espessura do MDF produzido:			
	Espessura Mínima: _____ mm	Espessura Média: _____ mm	Espessura Máxima: _____ mm	
5	Qual é a densidade média estimada dos painéis? _____ kg/m ³			
PARTE B - SISTEMA PRODUTIVO "A" DO MDF				
A Parte B do questionário divide-se em 5 seções:				
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				
Esta parte do questionário é baseado no fluxo genérico de processos elementares do processo produtivo do painel MDF. A figura abaixo ilustra o limite de fronteira do sistema de produção MDF.				
		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?			

(CONTINUA)

(CONTINUAÇÃO)

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 ACONTECEU 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 MEIOS)	(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, O 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			

Figura 28 – Folha para Coleta para ACV do sistema produtivo do painel MDF
Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE B - Folha para Coleta dos Dados Alimentadores do Modelo Desenvolvido

		ANÁLISE COMPARATIVA	
		Cenário 1	Cenário 2
		Descrição do Cenário 1	Descrição do Cenário 2
Dimensão Ambiental (ICV)			
Dados referentes ao inventário do ciclo de vida da produção do painel MDF			
Dados de Entradas	Unidade	Qtde.	Qtde.
Toras de Pinus	Kg/m ³		
Toras de Eucalipto	Kg/m ³		
Cavaco de Pinus gerado por descascador	Kg/m ³		
Cavaco de Eucalipto gerado por descascador	Kg/m ³		
Cavaco de Pinus comprado	Kg/m ³		
Cavaco de Eucalipto comprado	Kg/m ³		
Parafina	Kg.s/m ³		
Resina UF	Kg.s/m ³		
Sulfato de Amônio	Kg.s/m ³		
Ureia	Kg.s/m ³		
Energia Elétrica	KWh/m ³		
Gás Natural	m ³ /m ³		
Diesel consumido por tratores na movimentação de madeira	L/m ³		
Biomassa gerada por descascador de madeira	Kg/m ³		
Pó de Madeira Comprado	Kg/m ³		
Pó de Madeira Gerado na Indústria	Kg/m ³		
Água (Sistema Interno)	L/m ³		
Água Subterrânea	L/m ³		
Dados de Transportes	Unidade	Qtde.	Qtde.
Distância do Transporte de Toras de Pinus	Km		
Distância do Transporte de Toras de Eucalipto	Km		
Distância do Transporte de Cavacos	Km		
Distância do Transporte de Parafina	Km		
Distância do Transporte de Resina	Km		
Distância do Transporte de Sulfato de Amônio	Km		
Distância do Transporte de Ureia	Km		
Dados de Saída	Unidade	Qtde.	Qtde.
Painel MDF	Kg/m ³		
Cavaco de Madeira vendido	Kg/m ³		
Resíduos de Madeira/Biomassa	Kg/m ³		
Dimensão Social			
Indicadores e dados referentes a dimensão social			
Dados de Entradas	Unidade	Qtde.	Qtde.
Indicador de frequência de acidentes (IFAT)	Frequência por 200.000 hrs exposição		
Indicador de severidade de acidentes (ISAT)	Severidade por 200.000 hrs exposição		
Dimensão Econômico			
Indicadores e dados referentes a dimensão econômica			
Dados de Entradas	Unidade	Qtde.	Qtde.
Custos Fixos	R\$/m ³		
Custos Variáveis	R\$/m ³		
Custos Totais	R\$/m ³		
Dimensão Técnica			
Indicadores e dados referentes as características técnicas do painel MDF (Com base na norma ABNT NBR 15316-2:2015)			
Dados de Entradas	Unidade	Qtde.	Qtde.
Homogeneidade do MDF	%		
Qualidade Percebida MDF	%		
Retrabalho	%		
Reclamações de Clientes	PPM		
Dados complementares			
Dados referentes as características do painel MDF in natura (sem revestimentos) produzidos nos cenários analisados			
Produção Analisada	Informações		
Densidade (em base úmida)	Kg/m ³		
Umidade média do painel acabado	%		
Densidade (em base seca)	Kg/m ³		
Espessura Média Ponderada da produção	mm		

Figura 29 – Folha para Coleta dos Dados Alimentadores do Modelo Desenvolvido
Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE C - Resumo dos dados coletados na pesquisa por cenários

		CENÁRIOS DE REFERÊNCIA		ANÁLISE 1		ANÁLISE 2		ANÁLISE 3									
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2								
Dados de Entradas		[Dados não divulgados por serem confidenciais]															
	Unidade																
Toras de Pinus	Kg/m ³																
Toras de Eucalipto	Kg/m ³																
Cavaco de Pinus gerado por descasca dor	Kg/m ³																
Cavaco de Eucalipto gerado por descasca dor	Kg/m ³																
Para fina	Kg/m ³																
Resina UF	Kg/m ³																
Sulfato de Amônia	Kg/m ³																
Ureia	Kg/m ³																
Energia Elétrica	KWh/m ³																
Gás Natural	m ³ /m ³																
Diesel consumido por tratores na movimentação de madeira	L/m ³																
Biomassa gerada por descasca dor de madeira	Kg/m ³																
Pó de Madeira Comprada	Kg/m ³																
Pó de Madeira Gerado na Indústria	Kg/m ³																
Água Total (Sistema Interno)	L/m ³																
Água Subterrânea	L/m ³																
Dados de Transportes										[Dados não divulgados por serem confidenciais]							
	Unidade																
Distância do Transporte de Toras de Pinus	Km																
Distância do Transporte de Toras de Eucalipto	Km																
Distância do Transporte de Cavacos	Km																
Distância do Transporte de Para fina	Km																
Distância do Transporte de Resina	Km																
Distância do Transporte de Sulfato de Amônia	Km																
Distância do Transporte de Ureia	Km																
Dados de Saída		[Dados não divulgados por serem confidenciais]															
	Unidade																
Painel MDF	Kg/m ³																
Cavaco de Madeira vendido	Kg/m ³																
Resíduos de Madeira/Biomassa	Kg/m ³																
Dimensão Social																	
Indicadores e dados referentes a dimensão social																	
Dados de Entradas		[Dados não divulgados por serem confidenciais]															
	Unidade																
Indicador de frequência de acidentes (IFAT)	Frequência por 200.000 hrs exposição																
Indicador de severidade de acidentes (SAT)	Severidade por 200.000 hrs exposição																
Dimensão Econômica																	
Indicadores e dados referentes a dimensão econômica																	
Dados de Entradas		[Dados não divulgados por serem confidenciais]															
	Unidade																
Custos Fixos	R\$/m ³																
Custos Variáveis	R\$/m ³																
Custos Totais	R\$/m ³																
Dimensão Técnica																	
Indicadores e dados referentes as características técnicas do painel MDF (Com base na norma ABNT NBR 15316-2:2015)																	
Dados de Entradas		[Dados não divulgados por serem confidenciais]															
	Unidade																
Homo geneidade do MDF	%																
Qualidade Percebida MDF	%																
Retrabalho	%																
Reclamações de Clientes	PPM																
Dados complementares																	
Dados referentes as características do painel MDF in natura (sem revestimentos) produzidos nos cenários analisados																	
Dados de Entradas		[Dados não divulgados por serem confidenciais]															
	Unidade																
Produção Analisada	Informações																
Densidade (em base úmida)	Kg/m ³																
Umidade média do painel acabado	%																
Densidade (em base seca)	Kg/m ³																
Espessura Média Ponderada da produção	mm																

*Os dados não puderam ser divulgados por serem confidenciais

Tabela 2 - Resumo dos dados coletados na pesquisa por cenários
Fonte: Autoria Própria

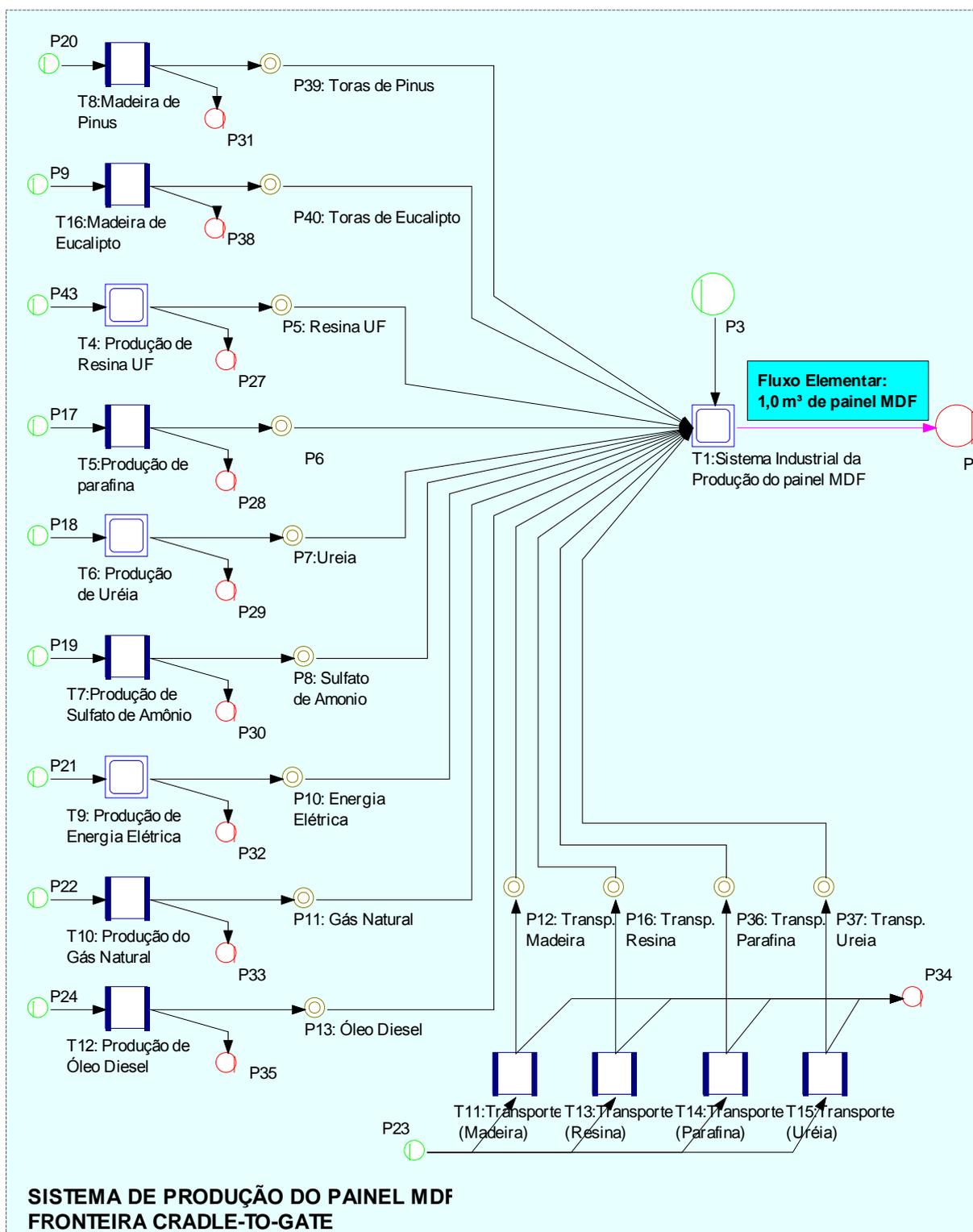
APÊNDICE D - Dados relativos ao Inventário do ciclo de vida das Resinas ureia-formaldeído (RUF) com razões molares diferentes

FLUXOS DE ENTRADA			
CONSUMO DE ENERGIA	RESINA UF		
	UNIDADE	QUANTIDADE	QUANTIDADE
////	KWh/Kg de RESINA UF		
CONSUMO DE MATERIAIS	RESINA UF		
	UNIDADE	QUANTIDADE	QUANTIDADE
////	Kg/Kg de RESINA UF		
////	Kg/Kg de RESINA UF		
////	Kg/Kg de RESINA UF		
////	Kg/Kg de RESINA UF		
////	Kg/Kg de RESINA UF		
////	Kg/Kg de RESINA UF		
////	Kg/Kg de RESINA UF		
////	Kg/Kg de RESINA UF		
////	Kg/Kg de RESINA UF		
FLUXOS DE SAÍDA			
SAÍDA PRINCIPAL	RESINA UF		
	UNIDADE	QUANTIDADE	QUANTIDADE
Resina Ureia Formaldeído	Kg/Kg de RESINA UF		

*Os dados não puderam ser divulgados por serem confidenciais

Tabela 3 – Dados para ICV de resinas ureia-formaldeído de razões molares diferentes
Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE E - Modelagem de ciclo de vida da produção do painel de madeira MDF no *software* Umberto



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

Figura 30 - Modelagem sistema de produção do painel MDF, fronteira *cradle-to-gate*
Fonte: Autoria Própria

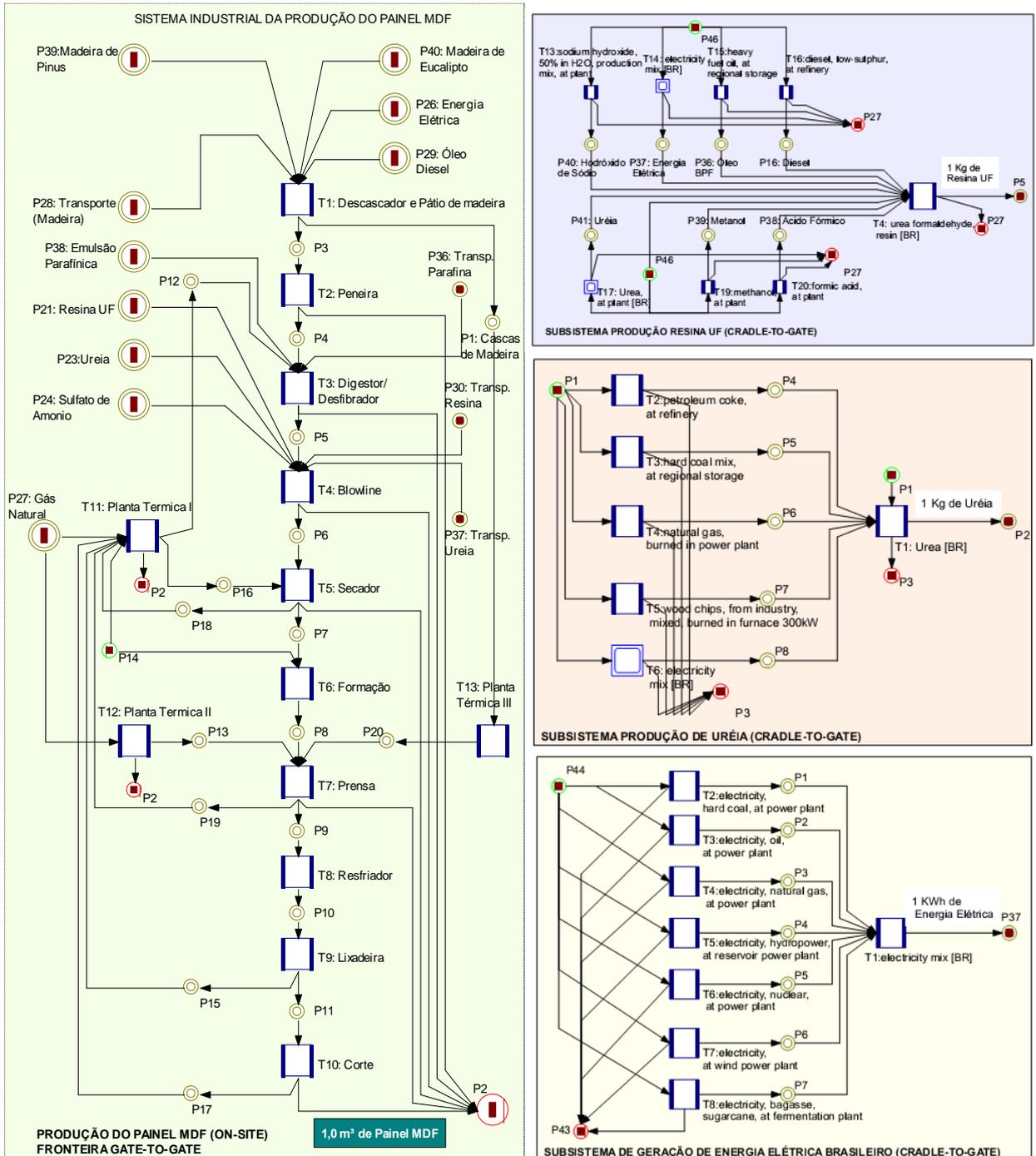


Figura 31 – Modelagem dos subsistemas sistema de produção do painel MDF, fronteira *cradle-to-gate*
 Fonte: Autoria Própria

APÊNDICE F - Resultados obtidos na AICV para os cenários analisados na validação do modelo, funções de valores e normalização

INDICADORES DE CATEGORIA DE IMPACTO	Análise de Referência				Funções de valores para normalização na escala cardinal MACBETH	Análise 1				Análise 2				Análise 3			
	Cenário 1 - Ref. Inferior (NEUTRO)		Cenário 2 - Ref. Superior (BOM)			Cenário 1		Cenário 2		Cenário 1		Cenário 2		Cenário 1		Cenário 2	
	Pontuação ECOINDICADOR	Pontuação MACBETH	Pontuação ECOINDICADOR	Pontuação MACBETH		Pontuação ECOINDICADOR	Pontuação MACBETH										
Qualidade de Ecossistema																	
Acidificação e Eutrofização	0,26	0	0,19	100	$y = -1295,5x + 341,74$	0,27	-10,63	0,23	44,24	0,24	36,19	0,22	58,10	0,29	-34,39	0,22	53,02
Eotoxidades	0,11	0	0,08	100	$y = -2907,1x + 321,64$	0,11	1,19	0,09	52,21	0,09	53,03	0,09	58,69	0,11	-2,19	0,08	78,37
Ocupação de Terra	2,45	0	1,93	100	$y = -192,52x + 471,34$	2,22	43,07	2,37	14,70	2,25	37,92	2,25	39,10	2,91	-88,67	1,94	97,90
TOTAL	2,82	0	2,19	100	$y = -158,47x + 447,33$	2,61	34,24	2,69	20,38	2,58	38,55	2,55	42,51	3,31	-77,29	2,25	91,36
Saúde Humana																	
Carcinogênicos	0,4167	0	0,3262	100	$y = -1105,4x + 460,59$	0,3751	45,92	0,3782	42,57	0,3922	27,06	0,4244	-8,50	0,3772	43,60	0,2786	152,63
Mudança Climática	0,8994	0	0,6685	100	$y = -433,05x + 389,48$	0,8823	7,41	0,7950	45,20	0,8317	29,32	0,7767	53,12	0,9634	-27,73	0,7155	79,64
Radiação Ionica	0,0073	0	0,0057	100	$y = -62883x + 461,34$	0,0066	44,86	0,0067	37,52	0,0069	26,82	0,0068	33,94	0,0070	21,00	0,0050	144,01
Depleção da Camada de Ozônio	0,0004	0	0,0003	100	$y = -809969x + 347,86$	0,0005	-94,14	0,0004	52,09	0,0004	50,09	0,0003	66,42	0,0004	-7,30	0,0003	71,80
Efeitos Respiratórios	2,9551	0	2,1936	100	$y = -129,61x + 384,32$	2,9848	-2,54	2,6539	40,35	2,8112	19,96	3,1754	-27,25	3,5444	-75,07	2,6961	34,88
TOTAL	4,29	0	3,19	100	$y = -91,355x + 391,82$	4,25	3,62	3,83	41,55	4,04	22,53	4,38	-8,65	4,89	-55,13	3,70	54,21
Recursos																	
Recursos físicos	7,92	0	5,60	100	$y = -43,099x + 341,31$	9,43	-65,13	6,60	56,80	6,75	50,36	6,31	69,34	9,11	-51,13	6,66	54,35
Extração Mineira	0,0026	0	0,0021	100	$y = -188975x + 496,91$	0,0025	15,89	0,0025	24,52	0,0028	-29,25	0,0024	34,89	0,0036	-178,97	0,0027	-12,01
TOTAL	7,92	0	5,60	100	$y = -43,089x + 341,34$	9,43	-65,11	6,60	56,79	6,75	50,34	6,31	69,33	9,11	-51,16	6,66	54,33
PONTUAÇÃO TOTAL	15,03	0	10,99	100	$y = -24,713x + 371,52$	16,29	-31,03	13,13	46,99	13,38	40,97	13,25	44,05	17,31	-56,31	12,60	60,07

Tabela 4 - Resultados obtidos na AICV para os cenários analisados na validação do modelo, funções de valores e normalização
Fonte: Autoria Própria