

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MÉTODO DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CONCEITOS DE PRODUTOS
BASEADO NAS ESTRATÉGIAS DO DFE E NO AHP

MARCELO RUY

SÃO CARLOS

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MÉTODO DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CONCEITOS DE PRODUTOS
BASEADO NAS ESTRATÉGIAS DO DFE E NO AHP

MARCELO RUY

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Produção.
Orientador:
Prof. Dr. Dário Henrique Alliprandini

SÃO CARLOS

2011

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

R985ma Ruy, Marcelo.
Método de avaliação ambiental de conceitos de produtos baseado nas estratégias do DFE e no AHP / Marcelo Ruy. -- São Carlos : UFSCar, 2011.
232 f.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.

1. Desenvolvimento de produtos. 2. Projeto conceitual. 3. Seleção de conceitos. 4. DfE. 5. Método de análise hierárquica. I. Título.

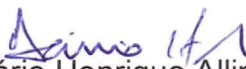
CDD: 658.575 (20^a)



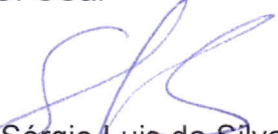
FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Marcelo Ruy

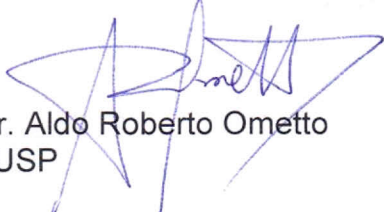
TESE DE DOUTORADO DEFENDIDA E APROVADA EM 26/9/2011 PELA
COMISSÃO JULGADORA:

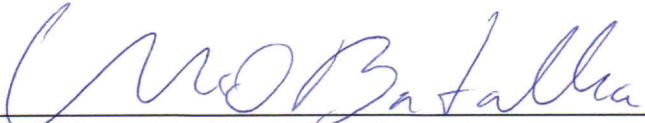

Prof. Dr. Dário Henrique Alliprandini
Orientador(a) PPGE/UFSCar


Prof. Dr. José Carlos de Toledo
PPGE/UFSCar


Prof. Dr. Sérgio Luis da Silva
DCI - PPGE/UFSCar


Prof. Dr. Daniel Capaldo Amaral
EESC/USP


Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto
EESC/USP


Prof. Dr. Mário Otávio Batalha
Coordenador do PPGE

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo conceber e estruturar um método de avaliação ambiental de conceitos de produtos baseado nas Estratégias do DfE e no AHP, com foco nos produtos físicos, principalmente os bens de consumo duráveis e os bens de capital. A justificativa por esta escolha se deve à atualidade da temática da sustentabilidade e, em particular: à premência do tratamento da questão ambiental; sua forte dependência do processo de desenvolvimento de produtos; e à necessidade de métodos e ferramentas apropriados para se incorporar as questões ambientais nas fases iniciais do projeto do produto, mais especificamente métodos adequados à avaliação ambiental de conceitos de produtos, devido a sua escassez na literatura. Este objetivo foi alcançado por meio de duas etapas. Inicialmente, o método foi estruturado em fases, etapas e atividades, todas dispostas em uma ordem lógica. O método foi construído a partir de estratégias de DfE relacionadas à dimensão física do produto e expressas pelo uso e consumo de recursos materiais. As estratégias de DfE foram condensadas em critérios de avaliação. Tais critérios foram posteriormente relacionados com uma tipologia ambiental de produtos e depois agrupados por grau de semelhança, formando uma hierarquia de critérios ambientais para uso com o AHP. Desta maneira, buscou-se criar um método aplicável a uma gama de produtos físicos, cujo objetivo é orientar o usuário, passo a passo, na avaliação do conceito que mais bem atenda aos critérios do DfE, dentro de uma perspectiva de ciclo de vida do produto. A segunda etapa da pesquisa consistiu na avaliação do potencial de utilização prática do método por meio de entrevistas e questionários com profissionais ligados ao desenvolvimento de produtos de três empresas e com um consultor em DfE. Como resultado concluiu-se que o método proposto se constitui em uma contribuição para o desenvolvimento de produtos ambientalmente responsáveis.

Palavras-chave: Desenvolvimento de Produto. Projeto Conceitual. Avaliação Ambiental de Conceitos. DfE. AHP.

ABSTRACT

The objective of the present thesis is to propose and structure a method for environmental evaluation of products concepts based on DfE Strategies and AHP. The focus is on physical products, mainly consumer durable goods and capital goods. The justification for this choice is that sustainability is a big issue today, and in particular: the urgency of approaching environmental problems; its strong relationship with product development; and the need of methods and tools for addressing environmental issues at the initial phases of product design, more specifically methods for environmental evaluation of product concepts, due to its scarcity in the literature. This objective was reached in two stages. Initially, the method was structured in phases, stages and activities arranged in an orderly manner. The method was built from DfE strategies related to the product physical dimensions and expressed by the use and consumption of material resources. DfE Strategies was condensed in evaluation criteria. These criteria was subsequently related to a products environmental typology and further grouped by degree of similarity, forming a hierarchy of environmental criteria to be used with AHP. Thus, we sought to create a method applicable to a wide range of physical products and whose aim is to guide the user, step by step, in the evaluation of the concept that better fulfills DfE criteria, taking the whole life cycle of the product into account. In the second stage, the practical utility potential of the method was assessed by means of interviews and questionnaires with product development practitioners from three companies and with one DfE consultant. As a result, it was concluded that the proposed method constitutes in a contribution to the development of environmental responsible products.

Key-words: Product Development. Conceptual Design. Environmental Evaluation of Concepts. DfE. AHP.

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Matriz de Comparações aos Pares dos Atributos em Relação ao Objetivo	105
Tabela 4.2 – Matriz de Comparações aos Pares para o Exemplo Hipotético do Peso de Três Objetos.....	113
Tabela 6.1 – Respostas da Avaliação do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos.....	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo para a Gestão do PDP	13
Figura 2.2 – Tipos de Projetos de Produtos	15
Figura 2.3 – Versões do Modelo de Referência Específico	17
Figura 2.4 – Estruturas Organizacionais para o Gerenciamento de Projetos	24
Figura 2.5 – Função Total “Lavar Roupas”	26
Figura 2.6 – Estrutura de Funções para “Lavar Roupas”	27
Figura 2.7 – Exemplo de Árvore de Classificação	30
Figura 2.8 – Exemplos de Alternativas de Solução.....	31
Figura 3.1 – O Sistema do Produto e seus Processos Elementares	40
Figura 3.2 – Estrutura Metodológica da ACV segundo a ISO 14040	40
Figura 3.3 – Intervenções Ambientais e Fluxos Econômicos	45
Figura 3.4 – Diagrama de Fluxo para um Sistema de Produto Simplificado	50
Figura 3.5 – Categorias de Pontos Centrais e Categorias de Danos.....	52
Figura 3.6 – Diagrama Esquemático do Processo de Inferência Difusa	69
Figura 4.1 – Hierarquia para Exemplificar o Método AHP	102
Figura 4.2 – Vetores de Prioridades para o Exemplo da Compra da Máquina	107
Figura 4.3 – Vetores de Prioridades para o Exemplo da Compra da Máquina pelo Modo Ideal de Síntese.....	109
Figura 4.4 – Diagrama Esquemático do Método de Harker	116
Figura 4.5 – Exemplo de Hierarquia Completa.....	117
Figura 4.6 – Exemplo de Hierarquia Incompleta	117
Figura 5.1 – Etapas da Pesquisa	119
Figura 5.2 – Hierarquia do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos	129
Figura 5.3 – Ciclo Tecnológico e Tempo de Desgaste para Alguns Produtos	137
Figura 5.4 – Priorização entre Vida Física e Vida Tecnológica.....	137
Figura 5.5 – Priorização entre Critérios de Fim de Vida.....	138
Figura 5.6 – A Caixa de Função ECSM do IDEF0	140
Figura 5.7 – Visão Geral do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos	142
Figura 5.8 – Visão Detalhada das Fases do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos.....	142

Figura 5.9 – Fase de Montagem da Hierarquia	142
Figura 5.10 – Fase de Derivação das Prioridades das Alternativas e dos Critérios	143
Figura 5.11 – Etapa de Derivação das Prioridades das Alternativas	143
Figura 5.12 – Etapa de Derivação das Prioridades dos Critérios e Agrupamentos de Critérios	144
Figura 5.13 – Fase de Síntese dos Resultados	144
Figura 5.14 – Fluxograma do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos ..	145
Figura 5.15 – Exemplo de Matriz de Comparações para os Conceitos de um Produto Hipotético	149
Figura 5.16 – Exemplo de Matriz de Comparações para os Critérios Ambientais de um Produto Hipotético.....	151
Figura 5.17 – Exemplo de Planilha de Prioridades de Alternativas de um Produto Hipotético	152
Figura 5.18 – Exemplo de Planilha de Prioridade de Critérios de um Produto Hipotético....	152
Figura 5.19 – Exemplo de Planilha de Síntese de Resultados de um Produto Hipotético	153
Figura 6.1 – Amplitude das Notas e Nota Média da Avaliação do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos	161
Figura 6.2 – Respostas da Avaliação e Nota Média Agrupadas por Critério de Avaliação ...	162
Figura 6.3 – Respostas da Avaliação e Nota Média Agrupadas por Avaliador	163
Figura A 1 – Um Elemento Limite como o Equivalente de um Neurônio.....	194
Figura A 2 – Exemplo de uma Rede Neural Simples.....	196
Figura A 3 – Treinamento Supervisionado de uma Rede Neural Artificial	196
Figura B 1 – Gráfico da Porcentagem de Gorjeta em Função da Qualidade do Atendimento	198
Figura B 2 – Gráfico da Porcentagem de Gorjeta – Solução Exata e Aproximada pela Lógica Difusa	199
Figura B 3 – Ilustração do Princípio da Incompatibilidade.....	200
Figura B 4 – Exemplo de Função de Pertinência	201
Figura B 5 – Exemplo de uma Variável Linguística	202
Figura B 6 – Visão Geral de um Sistema de Inferência Baseado na Lógica Difusa	203
Figura B 7 – Funções de Pertinência para o Exemplo da Gorjeta.....	204
Figura B 8 – Processo de Inferência Difusa para o Exemplo da Gorjeta	204
Figura D 1 – Hierarquia Adaptada	215

Figura D 2 – Ajuste Estrutural.....	220
-------------------------------------	-----

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Os Papéis Principais das Pessoas Envolvidas no Projeto do Produto	21
Quadro 2.2 – Distribuição Qualitativa das Atividades por Áreas que Participam dos Projetos	22
Quadro 2.3 – Tipos de Arranjos Intraunidades.....	23
Quadro 2.4 – Tipos de Arranjos para Projetos	23
Quadro 2.5 – Exemplo de Matriz Morfológica	31
Quadro 3.1 – Fatores de Equivalência de Algumas Substâncias para o Aquecimento Global para Escalas de Tempo de 20, 100 e 500 anos	53
Quadro 3.2 – A Matriz MECO	60
Quadro 3.3 – A Matriz ERPA	61
Quadro 3.4 – Matriz de Agregação para as Notas ABC/XYZ	62
Quadro 3.5 – Exemplo da Estrutura de uma Matriz Insumo-Produto	64
Quadro 3.6 – Matriz Insumo-Produto para o Exemplo do Concreto Armado	66
Quadro 3.7 – Classes de abundância relativa à taxa de uso	81
Quadro 3.8 – Compatibilidade de Metais	83
Quadro 3.9 – Compatibilidade de Plásticos	83
Quadro 3.10 – Energia incorporada de alguns materiais.....	84
Quadro 3.11 – Relação das Estratégias de DfE com os Tipos de Produtos	97
Quadro 4.1 – A Escala Fundamental de Números Absolutos	104
Quadro 4.2 – Índice Aleatório	106
Quadro 4.3 – Procedimento de Cálculo para o Modelo Aditivo Linear.....	108
Quadro 5.1 – Requisitos para o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos ...	120
Quadro 5.2 – Relação entre as estratégias do DfE restantes e os tipos de produtos.....	125
Quadro 5.3 – Derivação dos critérios para avaliação ambiental dos conceitos de produtos..	126
Quadro 5.4 – Relação entre as os critérios de avaliação ambiental de conceitos e os tipos de produtos	127
Quadro 6.1 – Critérios para Avaliação do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos.....	158
Quadro 6.2 – Perfil dos Profissionais que Avaliaram o Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos	160

Quadro 6.3 – Respostas das Perguntas Qualitativas.....	163
--	-----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Contextualização e Justificativas para o Trabalho.....	1
1.2	Objetivos e Estruturação do Trabalho	9
2	O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS.....	10
2.1	Visão Geral	10
2.2	Macrofase Pré-Desenvolvimento.....	13
2.3	Macrofase Desenvolvimento	18
2.4	A Fase de Projeto Conceitual.....	24
2.4.1	A Etapa de Geração de Conceitos	25
2.4.2	A Etapa de Seleção de Conceitos	32
3	MÉTODOS PARA A AVALIAÇÃO E MELHORIA AMBIENTAL DE PRODUTOS	39
3.1	Avaliação de Ciclo de Vida – ACV.....	39
3.1.1	Definição de Escopo e Objetivos	41
3.1.2	Análise de Inventário.....	43
3.1.2.1	Compilação do Diagrama de Fluxo e dos Dados dos Processos	44
3.1.2.2	Multifuncionalidade e Alocação.....	47
3.1.2.3	Cálculo dos Resultados do Inventário	49
3.1.3	Avaliação de Impacto	50
3.1.3.1	Seleção das Categorias de Impacto	51
3.1.3.2	Seleção do Método de Caracterização.....	51
3.1.3.3	Classificação.....	53
3.1.3.4	Caracterização	54
3.1.3.5	Normalização.....	55
3.1.3.6	Agrupamento e Ponderação.....	56
3.1.4	Interpretação	57
3.2	Avaliações de Ciclo de Vida Alternativas	59
3.2.1	Avaliação de Ciclo de Vida Simplificada.....	59
3.2.2	Avaliação de Ciclo de Vida baseada em Modelos Econômicos.....	63
3.2.3	Avaliação de Ciclo de Vida baseada em Redes Neurais Artificiais	67
3.2.4	Avaliação de Ciclo de Vida baseada em Lógica Difusa.....	68

3.2.5	Avaliação de Ciclo de Vida baseada em Decisão Multicriterial	69
3.2.6	Grau de Aplicação dos Métodos de ACV Alternativas no Projeto Conceitual ..	71
3.3	Estratégias de DfE	73
3.3.1	Classificação Ambiental para Produtos	74
3.3.2	Compilação de Estratégias de DfE	77
3.3.2.1	Materiais do Produto	79
3.3.2.2	Energia.....	83
3.3.2.3	Toxicidade e Emissões do Produto	86
3.3.2.4	Vida do Produto.....	88
3.3.2.5	Desmontagem do Produto	93
3.3.2.6	Embalagem do Produto	94
3.3.2.7	Sistema de Produção e sua Gestão	95
3.3.3	Relação das Estratégias de DfE com a Classificação Ambiental de Produtos ...	96
4	O MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA	98
4.1	Decisão Multicriterial – Visão Geral	98
4.2	O AHP.....	101
4.2.1	Etapa 1: Montagem da Hierarquia.....	102
4.2.2	Etapa 2: Comparação dos Atributos e das Alternativas	103
4.2.3	Etapa 3: Cálculo dos Vetores de Prioridade e suas Consistências	105
4.2.4	Etapa 4: Síntese das Prioridades Globais das Alternativas.....	107
4.2.5	Tópicos Adicionais	108
4.2.5.1	Normalização dos Autovetores: Modo Distributivo e Modo Ideal	108
4.2.5.2	Atributos com Estrutura de Valor Invertida	111
4.2.5.3	Matrizes de Comparações Inconsistentes	114
4.2.5.4	Matrizes de Comparações Incompletas	114
4.2.5.5	Hierarquias Incompletas e Ajuste Estrutural.....	116
5	PROPOSTA DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CONCEITOS DE PRODUTOS	119
5.1	Requisitos para o Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos.....	120
5.2	Bases e Escolhas Teóricas	122
5.2.1	Estruturação do Problema.....	122
5.2.2	Construção do Modelo de Preferência	130
5.3	Operacionalização do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos	139
5.3.1	Fase 1: Montagem da Hierarquia	146

5.3.2	Fase 2: Derivação das Prioridades.....	147
5.3.2.1	Etapa 1: Derivação das Prioridades das Alternativas	148
5.3.2.2	Etapa 2: Derivação das Prioridades dos Critérios e seus Agrupamentos.....	150
5.3.3	Fase 3: Síntese dos Resultados	151
6	AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CONCEITOS DE PRODUTOS	154
6.1	Considerações dos Requisitos do Método	154
6.2	Avaliação do Método junto a Especialistas	157
7	CONCLUSÕES	171
	REFERÊNCIAS	175
	APÊNDICE A: VISÃO GERAL DAS REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS	194
	APÊNDICE B: VISÃO GERAL DA LÓGICA DIFUSA.....	198
	APÊNDICE C: ALGORITMOS EM VBA PARA IMPLANTAÇÃO DO AHP NO MICROSOFT EXCEL	205
	APÊNDICE C. 1 – Cálculo do Vetor de Prioridade no Modo Distributivo	205
	APÊNDICE C. 2 – Cálculo da Razão de Consistência.....	206
	APÊNDICE C. 3 – Cálculo do Vetor de Prioridade no Modo Ideal.....	208
	APÊNDICE C. 4 – Cálculo do Vetor de Prioridade no Modo Distributivo Invertido.....	209
	APÊNDICE C. 5 – Cálculo do Vetor de Prioridade no Modo Ideal Invertido.....	210
	APÊNDICE C. 6 – Tratamento de Matrizes de Comparações aos Pares Inconsistentes....	211
	APÊNDICE C. 7 – Reconstrução de Matrizes de Comparações aos Pares Incompletas ...	213
	APÊNDICE D – EXEMPLO NUMÉRICO	215
	APÊNDICE E – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DO MÉTODO	221
	ANEXO 1 – MATRIZ ERPA.....	227

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização e Justificativas para o Trabalho

Há um consenso que o tema de maior importância neste início de século XXI e um desafio chave para as empresas é a questão do desenvolvimento sustentável (KLÖPFFER, 2003; MAXWELL & VORST, 2003; REBITZER & HUNKELER, 2003). De acordo com Klöpffer (2008), a questão da sustentabilidade deveria ser a maior meta para as empresas e o objetivo máximo para o desenvolvimento de seus produtos.

Segundo Labuschagne & Brent (2005), há mais de 100 definições de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável. A mais difundida e adotada na literatura é a do relatório da Comissão Mundial sobre o Ambiente e o Desenvolvimento (WCED) da ONU: é o desenvolvimento apropriado às necessidades do presente, sem comprometer a habilidade das futuras gerações de garantirem suas próprias necessidades (GAUTHIER, 2005; HAUSCHILD; JESWIET & ALTING, 2005; HAUSCHILD; WENZEL & ALTING, 1999; HUNKELER & REBITZER, 2005; HUTCHINS & SUTHERLAND, 2008; KLÖPFFER, 2008; KLÖPFFER, 2003; LABUSCHAGNE & BRENT, 2005; MIHELICIC et al., 2003). Entretanto, esta mesma literatura aponta que tal definição, embora de fácil entendimento, é um tanto vaga; possui altas aspirações morais, mas é difícil de operacionalizar, quantificar e expressar em termos concretos e, portanto, de guiar decisões no mundo dos negócios.

No âmbito de atuação das empresas, a interpretação que se consolidou é a que a sustentabilidade é formada pelo “tripé” Ambiente, Economia e Sociedade. Uma empresa contribui para o desenvolvimento sustentável se proporcionar progresso econômico e, simultaneamente, agir com responsabilidade social e não degradar o meio ambiente (CILIBERTI, PONTRANDOLFO & SCOZZI, 2008; FIGGE & HAHN, 2004; SEURING et al., 2008; SEURING & MÜLLER, 2008).

Há um crescente corpo de conhecimento associando o desempenho econômico das organizações e a minimização de seus impactos ambientais ao Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP). É sabido que até 80% dos fatores ambientais e, principalmente, do custo final do produto são determinados por este processo, em especial nas fases iniciais do projeto (ASIEDU & GU, 1998; AYAĞ & ÖZDEMİR, 2009; DUNK, 2004;

ELLRAM, TATE & CARTER, 2008; EVERSHEIM, NEUHAUSEN & SESTERHENN, 1998; HUNKELER & REBITZER, 2003; LINDAHL et al., 2005; MASCLE & ZHAO, 2008; MAXWELL & VORST, 2003; REBITZER et al., 2004; SROUFE et al., 2000). Contudo, o impacto do desenvolvimento de produtos no pilar social da sustentabilidade ainda é uma questão em aberto na literatura.

O PDP é o processo de transformar informações do mercado, possibilidades tecnológicas e estratégias competitivas da empresa em produto e serviços que atendam às expectativas dos clientes, no tempo adequado e a um custo competitivo (ROZENFELD et al., 2006). Estes autores dividem o PDP em três macrofases: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento. Em linhas gerais, a macrofase de pré-desenvolvimento refere-se ao planejamento estratégico dos produtos e dos projetos dos produtos e é nela que se faz a “ponte” entre os objetivos da empresa e os produtos desenvolvidos. A macrofase de desenvolvimento envolve as atividades de desenvolvimento dos projetos definidos e aprovados na macrofase anterior. Nesta macrofase, cada produto é gerenciado como um projeto. A macrofase de pós-desenvolvimento compreende a retirada planejada do produto do mercado e uma avaliação de todo o ciclo de vida mercadológico do produto, para que as experiências contrapostas ao que foi planejado anteriormente sirvam de referência para futuros desenvolvimentos.

A relação do desenvolvimento de produtos com o pilar econômico da sustentabilidade é considerada pelas empresas, uma vez que é comum os tomadores de decisão avaliarem a consequência econômica de suas decisões.

O pilar social da sustentabilidade refere-se à ética da empresa. Ainda que alguns autores tentem relacionar o impacto social da empresa aos seus produtos (HUNKELER, 2006; KLÖPFFER, 2008; SCHIMIDT, 2004), há uma corrente de pensamento que considera que o impacto está relacionado à conduta da empresa e que não há como conectar direta e inequivocamente indicadores sociais aos seus produtos (DREYER, HAUSCHILD & SCHIERBECK, 2006; HAES, 2008; HAUSCHILD, DREYER & JØRGENSEN, 2008; JØRGENSEN et al., 2009). Além disso, segundo Labuschagne, Brent & Erck (2005), com relação à dimensão social, há pouca concordância sobre quais indicadores utilizar para avaliar o desenvolvimento social e as metodologias correntes ainda não são operacionais para a utilização nas empresas. Ou seja, os métodos para avaliação da conduta social das empresas ainda não estão plenamente desenvolvidos (KLÖPFFER, 2008; LABUSCHAGNE & BRENT, 2006).

No pilar ambiental da sustentabilidade residem grandes desafios. Segundo Hart (1995, p.991), “os próximos 40 anos apresentam um desafio sem precedentes: ou se altera a natureza das atividades econômicas ou há risco de se danificar irreversivelmente o sistema ecológico do planeta”.

De acordo com Hauschild, Jeswiet & Alting (2005), há quatro níveis nos quais uma organização pode abordar a questão ecológica, nesta ordem de importância: produto, sistema de produção, processos e descargas.

Infelizmente, a evolução da consciência ecológica nas empresas seguiu exatamente o caminho inverso (BHANDER, HAUSCHILD & MCALOONE, 2003; HAUSCHILD; JESWIET & ALTING, 2005; HUNKELER & REBITZER 2005; JOHANSSON, 2002; MIHELICIC et al., 2003; WEENEN, 1995). A partir da década 1970, as soluções eram reativas, de remediação e visavam reduzir a quantidade de emissões e substâncias nocivas, por exemplo, por meio de filtragem e limpeza, sendo chamadas de ações “fim-de-tubo”.

Em meados da década de 1980, o foco mudou para a eco-eficiência, isto é, a melhoria de processos visando atender às crescentes pressões legais e diminuir custos de não conformidade, perdas de recursos (matéria prima, água, energia) etc.. Estes esforços ficaram conhecidos como Prevenção à Poluição e Produção Mais Limpa.

A partir da década de 1990, percebeu-se que os esforços ambientais tinham que ser mais pró-ativos e abranger também os produtos das empresas. Em se tratando de produtos, tais esforços deveriam ser incorporados desde o seu projeto. Daí surgiram os conceitos de Projeto Voltado ao Ambiente (DfE – *Design for Environment*) ou Ecodesign e a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do produto.

Johansson (2002) define o DfE como qualquer ação tomada durante o desenvolvimento de produtos para minimizar o impacto ambiental do produto durante todo o seu ciclo de vida, sem comprometer outros critérios essenciais tais como qualidade, custo, aparência etc.. A lógica é que o desempenho ambiental do produto não pode ser obtido sacrificando-se outros atributos, pois o seu potencial de melhoria só será plenamente realizado caso ele seja comprado e substitua o concorrente ambientalmente inferior (HAUSCHILD; JESWIET & ALTING, 2005; WESTKÄMPER, ALTING & ARNDT, 2000).

De acordo com Rebitzer et al. (2004), em geral, do ponto de vista do fluxo de materiais, os produtos têm um ciclo de vida que se inicia com a extração das matérias primas da natureza, passando pela produção, uso e manutenção e, por fim, encerrando-se com a sua disposição final (descarte) e fluxos reversos (reuso, reciclagem ou remanufatura), incluindo os

transportes entre as etapas. Todas estas atividades e processos resultam em impactos ambientais devido ao consumo de recursos, emissão de substâncias e outras trocas com o meio. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) do produto é uma estrutura metodológica para estimar e avaliar os impactos ambientais atribuíveis ao produto. O desenvolvimento da ACV iniciou-se na década de 1990 com a SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) e atualmente é padronizada pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, contendo quatro etapas gerais: definição do escopo, análise do inventário, avaliação de impacto e interpretação. Este método é considerado o mais sofisticado e poderoso para se analisar as consequências ambientais de decisões tomadas durante o desenvolvimento do produto (ALTING & LEGARTH, 1995; BHANDER, HAUSCHILD & MCALOONE, 2003; PARK, SEO & WALLACE, 2001).

Contudo, esta visão abrangente e holística tem um custo alto. Hendrickson, Lave & Matthews (2006) chamam a atenção que uma ACV de um produto complexo é praticamente impossível e exemplificam com o caso real de um automóvel, cuja análise foi simplificada em muitos aspectos e, ainda assim, levou dois anos para ser completada e custou 8 milhões de dólares. Hochschorner & Finnveden (2006) vão além e afirmam que o formato da ACV não permite que ela seja utilizada atualmente pela indústria em geral.

Resumindo, o método mais poderoso para se detectar e melhorar os pontos críticos ambientais do produto (*environmental hotspots*) – isto é, aqueles aspectos que causam um grande impacto em uma perspectiva de ciclo de vida (NIELSEN & WENZEL, 2002) – na prática acaba sendo utilizado apenas depois que o projeto do produto foi encerrado ou, na fase de projeto detalhado, quando a maioria das decisões que tem o maior impacto sobre o desempenho ambiental do produto já foram tomadas (BHANDER, HAUSCHILD & MCALOONE, 2003).

Ou seja, nas fases iniciais do projeto do produto, onde a quantidade de conceitos e opções é grande e diversa, as informações são escassas e o tempo é curto, a ACV pode não ser a ferramenta ideal, principalmente se tratando de um projeto de um produto totalmente novo (SOUSA, EISENHARD & WALLACE, 2001).

Dentre as limitações para a realização da ACV nas fases iniciais do desenvolvimento de produtos, as mais citadas na literatura são: toma muito tempo; seu custo é elevado; exige enorme quantidade de dados, alguns externos, e nem todos acessíveis; utiliza muitos recursos e esforço humano; seus cálculos são complexos; para ser aplicada, exige *expertise* ambiental e dos inúmeros processos envolvidos na produção do produto; seu resultado é sensível a imprecisões e a falta de qualidade dos dados, o que é comum no início

de um projeto; é difícil traçar as fronteiras do sistema do produto a ser avaliado; a ACV é uma metodologia retrospectiva, ou seja, requer um projeto de produto especificado. (BHANDER, HAUSCHILD & MCALOONE, 2003; CHEN & LIAU, 2001; EAGAN & WEINBERG, 1999; FLEISCHER & SCHIMIDT, 1997; FLEISCHER et al., 2001; GONZÁLEZ, DÍAZ & TORRES, 2002; GRAEDEL & SAXTON, 2002; HOCHSCHORNER & FINNVEDEN, 2003; HUR et al., 2005; KHAN, SADIQ & VEICHT, 2004; KLÖPFFER, 2003; MASONI, SCIMÌA & SÁRA, 2001; TELENKO, SEEPERSAD & WEBBER, 2008).

Johansson (2002) e Boks (2006), estudando os fatores críticos de sucesso para integração do ecodesign ao desenvolvimento de produtos, concluíram que as questões ambientais devem ser consideradas o mais cedo possível e que métodos e ferramentas de suporte são fundamentais.

De acordo com Bhander, Hauschild & McAloone (2003), Lindahl et al. (2005) e Reyes & Wright (2001), tem havido na literatura uma forte tendência na direção do desenvolvimento de métodos e ferramentas que visam incorporar as preocupações ambientais ao PDP. No entanto, Karlsson & Luttrupp (2006, p.1295) declaram: “A maior parte das ferramentas do ecodesign focam as fases do projeto a partir da especificação do produto. Entretanto, os principais parâmetros, propriedades, funções, etc. são definidos antes, quando as especificações são escritas. São raras as ferramentas do ecodesign apropriadas para as fases iniciais do desenvolvimento quando as especificações são estabelecidas”. Por outro lado, segundo Guelere Filho (2009), a fase de projeto conceitual é a que mais influencia o produto em termos de desempenho ambiental, logo especial atenção deve ser dada à mesma.

Com base no que foi exposto anteriormente, a presente tese parte das seguintes premissas:

- O tratamento das questões ambientais na fase de projeto conceitual pode ser facilitado pelo uso de métodos e ferramentas de apoio e, como consequência, o desempenho ambiental do produto pode ser melhorado;
- Há a necessidade de métodos e ferramentas apropriados para se incorporar as questões ambientais na fase de projeto conceitual.

A partir destas premissas, é possível articular algumas questões para pesquisa, que, segundo Yin (2005), serão desdobradas em objetivos e procedimentos metodológicos mais adequados para resolvê-los. Na presente tese, são propostas as seguintes questões:

- **Questão 1:** quais as características necessárias para um método auxiliar no tratamento das questões ambientais na etapa de projeto conceitual, considerando-se uma perspectiva de ciclo de vida do produto?
- **Questão 2:** quais os elementos constituintes deste método para o mesmo auxiliar na tarefa de facilitar a escolha do conceito do produto que seja ambientalmente mais correto?
- **Questão 3:** quais são as características necessárias para o método não ser excessivamente complexo e, ainda assim, gerar resultados relativamente robustos, considerando-se que nas fase de projeto conceitual as informações são imprecisas e o tempo escasso?

Estas questões impõem um foco ao pesquisador e delimitam o escopo para a busca de informações. A partir delas, foi empreendida uma pesquisa bibliográfica visando levantar os diversos métodos de avaliação e melhoria ambiental de produtos existentes na literatura, com potencial para utilização na etapa de projeto conceitual e que pudessem servir de base para o desenvolvimento de um método para a avaliação ambiental de conceitos de produtos.

Analisando-se os trabalhos de Guelere Filho (2009) e Telenko, Seepersad & Webber (2008), notou-se que os principais métodos de avaliação e melhoria ambiental de produtos que podem ser utilizados na etapa de projeto conceitual são as ACV Simplificadas, as Estratégias de DfE e algumas abordagens baseadas no QFD, tais como as propostas de Bovea & Wang (2007), Kobayashi (2005), Masui et al. (2003) e Zhang, Wang & Zhang (1999).

Similarmente ao QFD tradicional, os QFD “verdes” são compostos de uma série de matrizes que são preenchidas de forma sequencial, onde o resultado de uma é a entrada da subsequente. Particularmente, a etapa de seleção de conceito é executada na última matriz ou em uma matriz intermediária, caso o desdobramento chegue ao nível do projeto do processo. Na sua essência, estas abordagens nada mais são que a incorporação de requisitos ambientais ao QFD tradicional. Além disso, a matriz onde é feita a seleção do melhor conceito é dependente do resultado das matrizes anteriores, ou seja, não tem como ser tratada de forma isolada. Dessa maneira, estas abordagens têm pouco a oferecer para o desenvolvimento do método almejado nesta tese.

As ACV simplificadas são métodos que se baseiam na ACV e propõem alterações a esta, de forma a permitir seu uso em situações nas quais há restrições de tempo,

informações etc.. Estes métodos foram organizados pelo autor da presente tese nos seguintes grupos: ACV simplificadas, ACV baseadas em modelos econômicos, ACV baseadas em redes neurais artificiais, ACV baseadas em lógica difusa e ACV baseada em decisão multicriterial.

Entretanto, de acordo com Wenzel, Hauschild & Alting (1997), uma das dificuldades no uso das ACV, completas ou alternativas, durante o desenvolvimento de produtos é relacionar seus resultados (os impactos ambientais potenciais) com as características e requisitos do produto. E este relacionamento é de especial importância quando o objetivo é utilizar os resultados da ACV como fonte de informação para guiar as decisões do desenvolvimento.

Por exemplo, suponha que o resultado da ACV tenha sido que o impacto potencial mais significativo do sistema do produto seja a formação de ozônio fotoquímico. Esta informação pode ser difícil de ser utilizada pelo projetista se ela não for relacionada com as características do produto. O que o projetista pode manipular com as suas decisões são, por exemplo, os tipos e quantidades de materiais a serem utilizados, o tempo de vida do produto, padrões de uso e descarte, dentre outros.

Os materiais, energia e substâncias químicas que entram no sistema do produto estão de certa forma incorporados no produto, direta ou indiretamente. Dessa forma, uma vertente de autores propõe a especificação de estratégias e diretrizes de projeto que guardam relação com impactos ambientais potenciais da ACV. Por exemplo, uma regra do tipo “especificar materiais renováveis no produto” tem efeito sobre a categoria de impacto ambiental “depleção de recursos abióticos”. Estas estratégias são conhecidas na literatura como Estratégias de DfE. Segundo Telenko, Seepersad & Webber (2008), as estratégias de DfE são generalizações de lições aprendidas a partir de avaliações de ciclo de vida que apontaram falhas ou potenciais de melhoria ambiental em produtos.

Entretanto, um cuidado especial deve ser tomado com esse tipo de avaliação. Muitas vezes, algumas das estratégias são conflitantes entre si e, o que é pior, podem ser contraproducentes para certos tipos de produtos. De acordo com Hauschild, Jeswiet & Alting (2005), é fundamental escolher apenas o subconjunto de estratégias certas para cada caso de forma a se otimizar o desempenho ambiental do produto.

A despeito desse alerta, a maior parte das estratégias de DfE encontradas na revisão bibliográfica empreendida consistiam apenas de um conjunto de regras sem maiores referências às situações onde eram mais adequadas ou não. Notáveis exceções foram os trabalhos de Giudice, La Rosa & Risitano (2006), Vezzoli & Manzini (2003) e Wimmer & Züst (2003).

Vezzoli & Manzini (2003) detalham uma série de estratégias de DfE e as relacionam com as etapas do ciclo de vida do produto onde teriam o maior impacto. Giudice, La Rosa & Risitano (2006) vão um passo além e também discutem a importância relativa de algumas dessas estratégias. Já Wimmer & Züst (2003) apresentam um método estruturado para a priorização das estratégias de DfE (este método é denominado “Ecodesign Pilot”). Basicamente eles criaram 5 categorias arquetípicas de produtos e as relacionaram com as estratégias. O que o usuário faz é enquadrar o seu produto em uma (ou mais) dessas categorias, selecionar apenas as estratégias que se relacionam com essas categorias e, por fim, baseado nos objetivos da empresa e do desenvolvimento de produtos, priorizar esse subconjunto de estratégias.

A abordagem de Wimmer & Züst (2003), além de mais bem estruturada que as demais, aparentemente é mais simples de ser utilizada pelo profissional de desenvolvimento de produtos. Trabalhar com tipos de produtos parece mais natural ao projetista do que com as etapas do ciclo de vida.

Entretanto, no método Pilot, a priorização entre as diferentes estratégias de DfE é feita apenas de maneira ordinal. Com relação a esta característica, vale a seguinte crítica: informações ordinais são difíceis de serem utilizadas em situações onde há múltiplos critérios conflitantes e nenhuma solução é claramente superior na maioria deles. Isto é, torna-se difícil estabelecer trocas e compensações entre esses critérios.

Nessas situações é particularmente útil a utilização dos conhecimentos de uma das áreas da Pesquisa Operacional denominada Decisão Multicriterial. Esta linha de pesquisa estuda métodos de escolha de alternativas de ação que levam em consideração um conjunto de objetivos e critérios que podem ser multidimensionais e conflitantes. É ideal em situações quando é necessário determinar uma solução onde nenhuma alternativa é melhor em todos os critérios. Um método bastante utilizado de Decisão Multicriterial, por permitir o tratamento dos aspectos tanto tangíveis quanto intangíveis de uma decisão, é o Método de Análise Hierárquica (AHP – *Analytic Hierarchy Process*).

Considerando-se a revisão bibliográfica realizada partir das questões de pesquisa enunciadas anteriormente e das considerações teóricas tecidas até aqui, é possível expressar os objetivos deste trabalho, o que remete a discussão para a próxima seção.

1.2 Objetivos e Estruturação do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo conceber e estruturar um método de avaliação ambiental de conceitos de produtos baseado nas Estratégias do DfE e no AHP. O foco é nos produtos físicos, principalmente os bens de consumo duráveis e os bens de capital.

Este objetivo foi alcançado por meio de duas etapas. A primeira e principal etapa consistiu da proposição e estruturação do método. A segunda etapa consistiu no seu teste, onde se propôs avaliar seu potencial de utilização prática.

O presente trabalho encontra-se estruturado da seguinte maneira. O capítulo 2 trata do tema processo de desenvolvimento de produtos e da fase de projeto conceitual. No capítulo 3, são apresentados alguns métodos de avaliação e melhoria ambiental de produtos. O capítulo 4 descreve o método de análise hierárquica. No capítulo 5, o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos é desenvolvido. O capítulo 6 apresenta considerações a respeito do atendimento dos requisitos teóricos que guiaram a estruturação do método, bem como o resultado de sua avaliação junto aos especialistas consultados (profissionais ligados ao desenvolvimento de produtos de três empresas e um consultor em DfE). Por fim, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos a respeito do tema Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP). O capítulo tem como base o modelo proposto por Rozenfeld et al. (2006), pois este, além de ser um dos modelos mais recentes, também sintetiza e amplia muitas das questões tratadas pelos diversos modelos teóricos criados anteriormente. Grosso modo, este modelo divide o PDP em três macrofases, pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento e, adicionalmente, cada uma delas em fases e atividades.

2.1 Visão Geral

O atual ambiente competitivo requer das organizações grandes esforços para se manterem competitivas, exigindo das mesmas capacidade de implantar estratégias diversas para superar os desafios crescentes impostos pelo mercado (SANTOS, 2006).

Neste contexto altamente dinâmico e mutável, onde a inovação tem um papel importante, particularmente o processo de desenvolvimento de produtos (PDP) ganha dimensão estratégica, já que através dele é que a organização diversifica-se, renova-se e mesmo se reinventa (BROWN & EISENHARDT, 1995). Assim, o desenvolvimento de produtos está entre os processos essenciais para o sucesso, sobrevivência e renovação das organizações, especialmente para aquelas inseridas em mercados mais dinâmicos e competitivos.

De modo geral, desenvolver produtos é um processo de transformar informações do mercado, possibilidades tecnológicas e estratégias competitivas da empresa em produtos que atendam às expectativas dos clientes, no tempo adequado e a um custo competitivo (ROZENFELD et al., 2006).

Segundo Clark & Wheelwright (1993), o sucesso deste processo deve ser julgado em termos de três variáveis: velocidade, eficiência e eficácia. A recompensa para quem preencher esses imperativos é uma significativa vantagem. O desenvolvimento de produtos excepcionais não somente abre novos mercados e atrai novos clientes, como também

cria novas capacidades dentro da organização, além de melhor utilização dos recursos e investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

Contudo, alcançar esses objetivos não é uma tarefa trivial, uma vez que desenvolver produtos envolve várias funções dentro da empresa e, em certos casos, até mesmo unidades distintas. Para Clark & Wheelwright (1993), é fundamental que este processo seja cuidadosamente planejado e gerenciado e que haja uma articulação entre a estratégia da organização e cada um de seus projetos de produtos. Griffin (1997) relata que as empresas com os melhores resultados neste processo têm sido aquelas que se utilizam de um processo formal para o desenvolvimento de seus produtos.

Isto amplia o escopo do PDP, relativamente à visão tradicional. Convencionalmente, desenvolver produtos era visto apenas como empreender um conjunto isolado de projetos de produtos. Enquanto muitas das atividades do desenvolvimento ocorrem dentro de um projeto, muitas coisas que a empresa faz antes do seu início lançam bases para a sua efetividade. A forma pela qual a estratégia de desenvolvimento está vinculada à estratégia tecnológica e de mercado da empresa é fator fundamental para o desenvolvimento ser bem sucedido. Cooper (2001) e Clark & Wheelwright (1993) estão entre os principais autores a realçarem a importância das atividades de pré-desenvolvimento no PDP.

Atualmente, além das atividades de pré-desenvolvimento, a gestão do PDP compreende todo o gerenciamento do ciclo de vida mercadológico do produto, abrangendo desde o acompanhamento do produto na produção e no mercado até a sua retirada.

Outra questão que deve ser tratada pelo PDP, concomitantemente ao projeto do produto e do processo, é a consideração da configuração da cadeia de suprimentos, incluindo logística e integração com clientes e fornecedores (ELLRAM, TATE & CARTER, 2007). Estes autores denominaram o projeto simultâneo do produto, do processo e da cadeia de suprimentos de Engenharia Simultânea Tridimensional (*three-dimensional concurrent engineering – 3DCE*), uma alusão à Engenharia Simultânea tradicional, cujo objetivo é o projeto simultâneo do projeto do produto e do processo por meio de equipe multifuncional competente, bem coordenada, utilizando as sinergias da empresa e tendo suporte significativo da alta gerência.

Segundo Ellram, Tate & Carter (2008), a 3DCE é uma condição necessária para se agregar a questão ambiental ao desenvolvimento de produtos e às práticas de manufatura da empresa. Uma empresa que busca operar de maneira sustentável necessita considerar toda a rede de suprimentos de forma a evitar que uma melhora no seu desempenho se faça à custa da transferência do problema para outro elo da cadeia (HAUSCHILD,

JESWIET & ALTING, 2004; HAUSCHILD, JESWIET & ALTING, 2005; KLÖPFFER, 2003), que se substitua um conjunto de problemas ambientais por outro, ou ainda, que o problema mude de um local para outro (ZHANG, WANG & ZHANG, 1999). Além disso, até 80% dos fatores ambientais e, principalmente, do custo final do produto são determinados nas fases iniciais do PDP (ASIEDU & GU, 1998; AYAĞ & ÖZDEMİR, 2009; DUNK, 2004; ELLRAM, TATE & CARTER, 2008; EVERSHEIM, NEUHAUSEN & SESTERHENN, 1998; HUNKELER & REBITZER, 2003; LINDAHL et al., 2005; MASCLE & ZHAO, 2008; MAXWELL & VORST, 2003; REBITZER et al., 2004; SROUFE et al., 2000).

Devido à amplitude e a importância estratégica dos temas apresentados anteriormente, fica evidente que a gestão do PDP é extremamente complexa. Daí decorre a necessidade da adoção de um modelo de referência para a gestão deste processo. Rozenfeld et al. (2006) realçam que a formalização de um modelo de gestão possibilita que todos os envolvidos tenham uma visão compartilhada do processo, explicitando quais resultados se esperar, quais e como as atividades devem ser executadas, condições a serem atendidas e critérios de decisão a serem adotados.

Na literatura são apresentadas várias propostas de modelos de gestão do PDP, tais como o modelo de funil, a sistemática dos *stage-gates*, a engenharia simultânea, *lean design*, *design for six sigma*, dentre outros. O modelo proposto por Rozenfeld et al. (2006) é um dos mais recentes e sintetiza e amplia muitas das questões tratadas pelos diversos modelos citados anteriormente.

Este modelo de gestão divide o PDP em três macrofases: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento. Cada macrofase é dividida em fases e o processo é auxiliado por dois processos de apoio, como indica a figura 2.1.

Em linhas gerais, a macrofase de pré-desenvolvimento refere-se ao planejamento estratégico de produtos e de projetos de produtos e é nela que se faz a “ponte” entre os objetivos da empresa e os produtos desenvolvidos. Os principais objetivos dessa fase são: garantir uma decisão adequada sobre o portfólio de produtos e projetos, considerando a estratégia da empresa, restrições e tendências mercadológicas e garantir uma definição e um consenso sobre o final do projeto. O final do pré-desenvolvimento é a lista de projetos a serem desenvolvidos.

A macrofase de desenvolvimento envolve as atividades de desenvolvimento dos projetos definidos e aprovados na macrofase anterior. Enfatiza os aspectos tecnológicos correspondentes à definição do produto em si, suas características e sua forma de produção.

Nesta macrofase cada produto é gerenciado como um projeto. Ao seu final, todos os documentos de especificação do produto são preparados e aprovados.

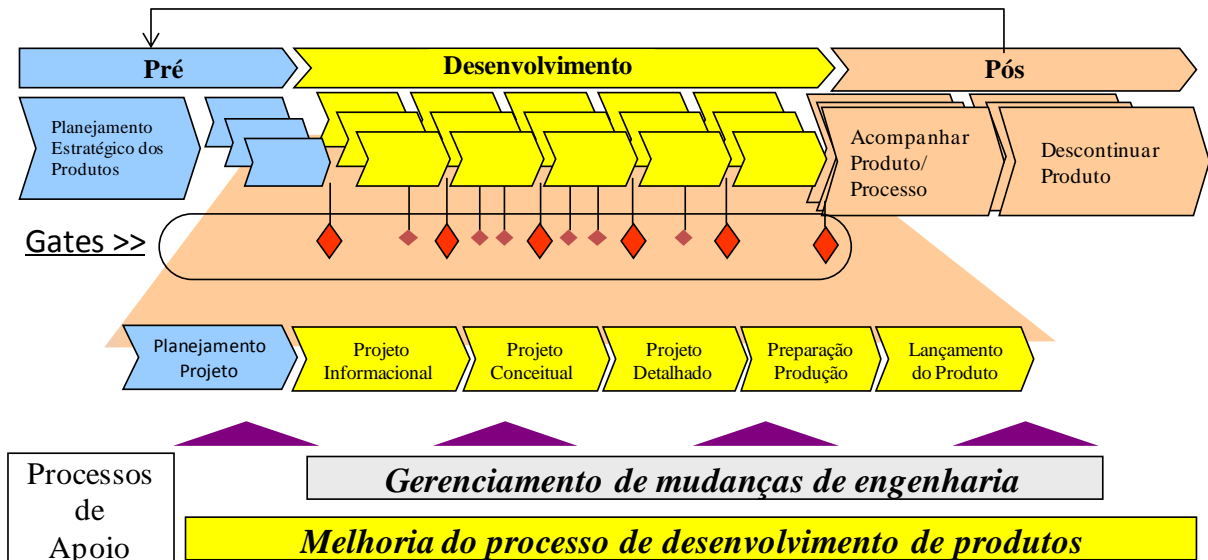


Figura 2.1 – Modelo para a Gestão do PDP
(Fonte: Rozenfeld et al., 2006 p.44)

A macrofase de pós-desenvolvimento compreende o acompanhamento do produto na produção e no mercado, a retirada sistemática do produto do mercado e uma avaliação de todo o ciclo de vida mercadológico do produto, para que as experiências contrapostas ao que foi planejado anteriormente sirvam de referência para futuros desenvolvimentos.

A seguir, as macrofases pré-desenvolvimento e desenvolvimento são abordadas, bem como a fase de projeto conceitual.

2.2 Macrofase Pré-Desenvolvimento

O início do PDP se dá a partir do planejamento estratégico da unidade de negócios. No planejamento estratégico são consideradas e integradas as estratégias tecnológica e de mercado da empresa. A partir destas informações geradas no planejamento estratégico da unidade de negócios, tem-se início o planejamento estratégico de produtos, cujo objetivo é definir a melhor combinação de produtos em relação aos mercados que se deseja atingir, conhecida como portfólio de produtos. Por fim, cada um dos produtos definidos no

portfólio será desenvolvido por meio de projetos. Assim, a fase de planejamento do projeto trata do desenvolvimento de cada um dos produtos definidos como atrativos no portfólio. A seguir, são explicados o planejamento estratégico de produtos e o planejamento de projetos.

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), o objetivo do planejamento estratégico de produtos é obter um plano contendo o portfólio de produtos da empresa, isto é, uma lista de produtos da empresa e os projetos que serão desenvolvidos, bem como uma previsão para retirada dos produtos que já estão sendo comercializados.

Segundo Cooper (2001), a tomada de decisão a respeito do portfólio é um processo dinâmico por meio do qual uma lista de projetos de produtos em desenvolvimento é constantemente revisada e atualizada. Neste processo, novos projetos são avaliados, selecionados e priorizados; projetos existentes podem ser acelerados, extintos ou terem sua prioridade diminuída; e os recursos são alocados e realocados para os projetos ativos. Como as decisões são tomadas em relação a informações incertas e em constante modificação e como há interdependência entre os projetos, o portfólio total, incluindo os projetos já em desenvolvimento, deve ser periodicamente revisado, olhando-se todos os projetos de forma holística e uns contra os outros.

Cooper (2005) explica que os principais objetivos do portfólio são garantir o alinhamento dos produtos com as estratégias da empresa (de mercado e tecnológica), maximizar o valor do portfólio e buscar o balanço certo entre os diferentes tipos de projetos. Com relação a este último tópico, há diversas formas de se classificar projetos de produtos. A mais comum é baseada no grau de inovação do produto, conforme indica a figura 2.2.

Clark & Wheelwright (1993) definem estes tipos de projeto da seguinte maneira:

- **Projetos de P&D Avançados:** enquanto os demais tipos preocupam-se com a introdução de produtos e processos viáveis e rentáveis, através da aplicação de tecnologias comercialmente comprovadas (aplicação), aqui a intenção é criação de conhecimento (invenção). Esta distinção entre aplicação e invenção é fundamental para o bom desempenho do desenvolvimento. Tipicamente este tipo de projeto é conduzido por uma estrutura organizacional própria, utilizando um conjunto de pessoas e equipamentos diferentes dos projetos comerciais. Porém nada impede o intercâmbio de pessoas entre estes projetos e os comerciais;
- **Projetos Radicais:** envolvem mudanças significativas no produto e no processo. Podem estabelecer um novo núcleo ou categoria de produto e processo e a entrada da empresa em novos mercados;

- Projetos Derivados: criam produtos e processos híbridos, com pequenas modificações e melhorias dos já existentes ou versões de menor custo;
- Projetos do tipo Plataforma: são também chamados de Próxima Geração, pois estão entre os derivados e os radicais. Há alterações representativas no produto e no processo. A plataforma serve de base para uma família de produtos. Quanto mais maduro o setor industrial, maior a importância deste tipo de projeto.

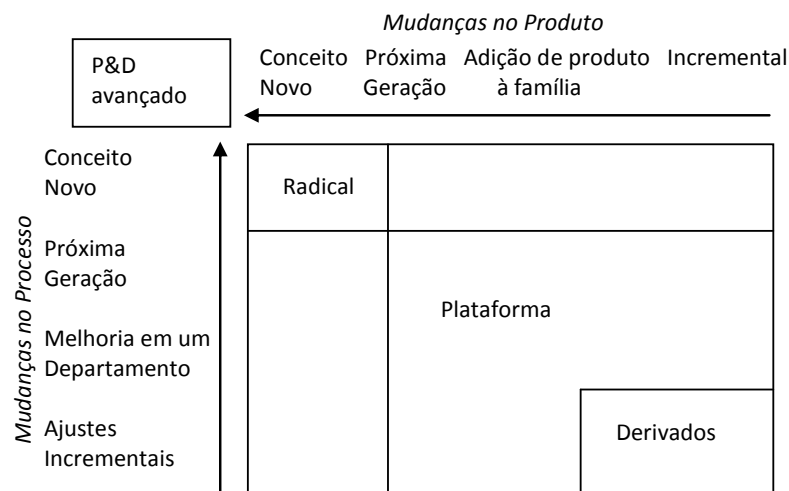


Figura 2.2 – Tipos de Projetos de Produtos
(Fonte: Clark & Wheelwright, 1993 p. 74)

Em síntese, a primeira fase da macrofase de pré-desenvolvimento, o planejamento estratégico de produtos, começa com o desdobramento do planejamento estratégico da empresa em um portfólio ou carteira de projetos, por meio da delimitação de restrições de recursos, informações sobre clientes e levantamento das tendências tecnológicas e mercadológicas. O final desta fase, e que servirá de *input* para a próxima fase do pré-desenvolvimento, o planejamento do projeto, é a definição exata das famílias, produtos e projetos que serão desenvolvidos pela empresa no horizonte de tempo contemplado (ROZENFELD et al., 2006).

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), a segunda fase da macrofase de pré-desenvolvimento denominada de planejamento do projeto, bem como as demais a partir dela, relaciona-se com um produto em particular do portfólio. Aqui os detalhes do projeto do produto, tais como escopo, prazos, custos, dentre outros, serão definidos em detalhes. Aprovado este planejamento, o projeto tem início na macrofase posterior.

É importante notar que a partir deste ponto surge no modelo de Rozenfeld et al. (2006) uma atividade recorrente e que ocorrerá até o final da macrofase desenvolvimento: os

gates (representados por losangos na figura 2.1). Basicamente há dois tipos de *gates*. No primeiro deles (os losangos menores da figura 2.1), o objetivo é avaliar a fase, sendo que a própria equipe do projeto determina se houve o cumprimento das atividades previstas e se submete o projeto ao segundo tipo de *gate*. No segundo tipo (os losangos maiores da figura 2.1), que ocorrem ao final de cada fase, o objetivo é aprovar a fase e todo o portfólio é analisado. Aqui a decisão pode ser de cancelar o projeto, congelá-lo, redirecioná-lo ou aprovar a fase. Como indica a figura 2.1, na fase de planejamento do projeto só há o segundo tipo de *gate*, pois o projeto ainda não foi aprovado, nem a equipe de projeto e seu líder designados.

Nesta fase podem ser utilizados os conhecimentos e técnicas do Gerenciamento de Projetos desenvolvidas pelo PMI (2004) e condensadas no PMBOK (*Project Management Body of Knowledge*). Uma tarefa específica a ser contemplada nesta fase de planejamento do projeto e que não tem paralelo ao PMBoK, por este ser um guia genérico para projetos, é a adaptação do modelo de referência da figura 2.1. Naquela figura, as fases da macrofase desenvolvimento são para o caso do tipo de projeto de produto mais complexo. Em certas ocasiões é possível abreviar ou agregar fases.

O modelo de referência da figura 2.1 é genérico e apresenta foco na tecnologia de fabricação mecânica, voltado para o setor de bens de consumo duráveis e bens de capital, podendo ser utilizado como base para a criação de outros modelos específicos. O importante é adotar os conceitos existentes no modelo e adaptá-los à realidade da empresa.

O modelo genérico de Rozenfeld et al. (2006) é aplicável aos tipos de projeto plataforma e derivado. Para os projetos do tipo radical, há necessidade de uma maior integração com o processo de P&D.

Algumas versões são derivadas do modelo de referência genérico combinando-se duas variáveis: novidade e complexidade. A primeira variável mede o quanto há de peças novas no produto. Pode ser avaliada pela porcentagem de itens na estrutura do produto que não foram utilizados antes em outros produtos da empresa. A segunda variável mede a quantidade de peças nesse produto, sendo avaliada comparando-se o produto em questão com outros produtos da empresa, obtendo, assim uma perspectiva do grau de complexidade do produto em questão.

A figura 2.3 ilustra quatro versões desenvolvidas a partir do modelo de referência genérico, diferenciando-as conforme a ênfase com que serão tratadas as fases do desenvolvimento do produto. A seguir, são descritas essas quatro versões derivadas do modelo genérico da figura 2.1.

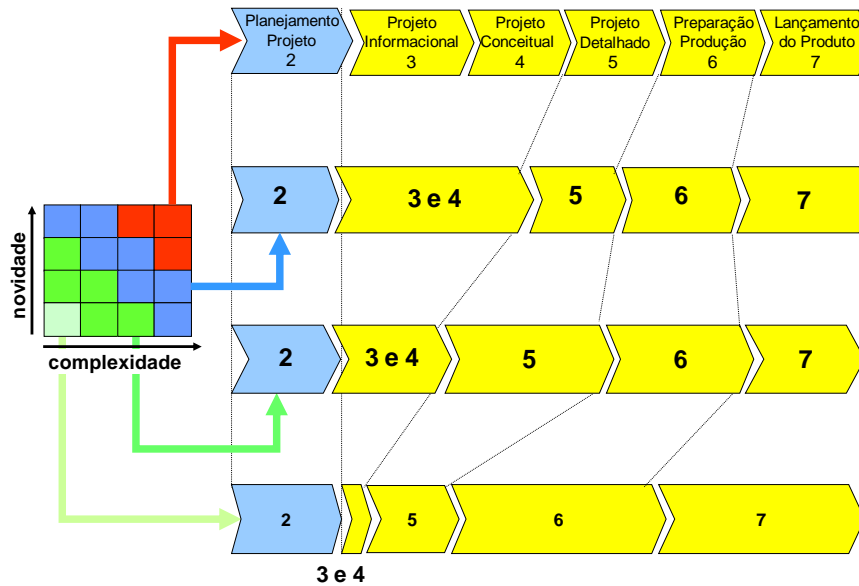


Figura 2.3 – Versões do Modelo de Referência Específico
(Fonte: Rozenfeld et al., 2006 p. 170)

A primeira versão tem duração muito maior que as demais versões, sendo empregada em projetos de produtos mais complexos e ao mesmo tempo inovadores. É o caso de um projeto do tipo plataforma para um mercado diferente do qual a empresa já atuava, inaugurando uma nova família de produtos para a empresa e que se espera gere derivados.

A segunda versão possui um planejamento de projeto menos detalhado e a fase de desenvolvimento é mais simplificada, onde o projeto informacional e conceitual são tratados como uma única fase, além de o projeto detalhado e a preparação da produção serem menores. Essa versão é aplicada em situações em que o projeto do produto apresenta complexidade ou inovação alta. Isto ocorre em projetos plataforma para mercados já conhecidos pela empresa ou projetos derivados da plataforma do caso anterior (plataforma para mercado totalmente novo).

Como características da terceira versão, além de um planejamento de projeto reduzido, há muitas simplificações no desenvolvimento do produto. As fases de projeto informacional e conceitual permanecem unidas e menores do que na versão anterior. O projeto detalhado se mantém, mas a preparação da produção pode ser simplificada e o lançamento do produto passa a ser executado parcialmente. Esta versão é aplicada em derivações convencionais a partir de plataformas de produtos já bem estabelecidos na empresa, pois possuem dimensões de complexidade e novidade de médio para baixo.

Na última versão, são baixas tanto a complexidade quanto a novidade do projeto do produto. Essa adaptação envolve mínimas modificações e ajustes no produto. Entretanto, pode haver muitas modificações no projeto do processo de fabricação e

montagem, dadas a necessidade de preparar a planta para a produção local. Dispensa a necessidade de projeto conceitual, devido ao fato de o produto estar totalmente concebido, com um projeto informacional reduzido. Essa versão é aplicável a situações em que um produto que se pretende lançar no mercado nacional já foi desenvolvido plenamente e o mesmo já está em produção em outro local, como é o caso dos projetos *follow source*.

Em suma, a fase de planejamento do projeto inicia-se a partir da definição das famílias, produtos e projetos que serão desenvolvidos pela empresa no horizonte de tempo contemplado e termina com a declaração do escopo e com o plano de projeto dos projetos que serão desenvolvidos na macrofase posterior.

Finalizando, de acordo com Rozenfeld et al. (2006), os dois objetivos principais da macrofase pré-desenvolvimento são: garantir a melhor decisão sobre o portfólio, conjugando a estratégia da empresa com as restrições tecnológicas e tendências do mercado; e garantir definição e consenso a respeito do objetivo final dos projetos a serem iniciados

2.3 Macrofase Desenvolvimento

Segundo Rozenfeld et al. (2006), o desenvolvimento se inicia após a definição do portfólio e do planejamento dos produtos. A macrofase de desenvolvimento enfatiza os aspectos tecnológicos correspondentes à definição do produto em si, suas características e formas de produção. Portanto, suas atividades são dependentes da tecnologia envolvida no produto.

Conforme foi ressaltado na seção anterior, uma característica importante do modelo que marca a transição do planejamento do projeto para a macrofase de desenvolvimento e que é aplicada durante todas as suas fases é a sistemática de avaliação e transição de fases conhecida como *stage-gates*.

O que determina o final de uma fase é a entrega de resultados, que são congelados a partir do momento que a fase é encerrada, para depois serem unidos e determinarem um novo patamar de evolução do projeto. As soluções aceitas e congeladas podem ser acessadas, mas não modificadas, exceto por meio de um processo de mudança controlado denominado gerenciamento de mudanças de engenharia (figura 2.1). Isto garante que mudanças somente serão feitas após serem cuidadosamente avaliadas e que todos os atores envolvidos serão comunicados.

A primeira fase do desenvolvimento é o projeto informacional, onde, a partir do plano do projeto, informações levantadas no planejamento e em outras fontes, são determinadas as metas a serem alcançadas ao final da atividade de engenharia. Essas metas, além de orientarem a geração de soluções, fornecem a base sobre a qual serão montados os critérios de avaliação e tomada de decisões utilizadas nas etapas posteriores ao desenvolvimento.

Em seguida, na fase de projeto conceitual, procuram-se soluções para se atender às metas especificadas na fase anterior, sendo resumidas em um conjunto de documentos denominado “concepção do produto”. Ainda nessa fase, as atividades da equipe de projeto relacionam-se com a busca, criação, representação e seleção de soluções para o problema de projeto. A busca por soluções pode ser feita por observação, tanto de produtos concorrentes quanto similares encontrados em materiais de pesquisa ou até mesmo por benchmarking. O processo de criação de soluções é livre de restrições, sendo auxiliado por métodos de criatividade. A representação das soluções pode ser feita por meio de esquemas, desenhos e croquis.

Com a solução selecionada, passa-se à próxima fase, chamada projeto detalhado. Esta fase caracteriza-se por detalhar a fase anterior, gerando uma gama de documentos, com o objetivo de desenvolver e finalizar todas as especificações do produto, para depois serem encaminhados à manufatura e às outras fases do desenvolvimento. O protótipo então é aprovado, sendo o produto homologado, partindo para a preparação da produção, onde são feitos testes e homologação da produção, culminando com sua liberação. O produto começa a ser produzido, para posteriormente ser lançado no mercado.

A preparação da produção do produto engloba a produção do lote piloto, a definição dos processos de produção e manutenção. Visa colocar o produto no mercado, atendendo às especificações dos clientes levantadas na fase de projeto informacional e cumprindo as especificações finais do projeto do produto e processo de fabricação, criadas na fase de projeto conceitual e detalhado. Nesta fase são desenvolvidos os planos e especificações realizados nas fases precedentes, como especificações de máquinas, projeto de fábrica, lançamento do produto, assistência técnica, atendimento ao cliente etc..

O objetivo dessa fase é garantir que a cadeia de suprimento (mediante uma análise da qualidade de seus produtos) consiga produzir os produtos no volume definido na Declaração de Escopo do Projeto, com as mesmas qualidades do protótipo e atendendo aos requisitos dos clientes durante o ciclo de vida mercadológico do produto.

A fase de lançamento do produto envolve as atividades da cadeia de suprimentos relacionadas à colocação do produto no mercado: o desenho dos processos de venda e distribuição, atendimento ao cliente e assistência técnica e as campanhas de marketing. O objetivo é colocar o produto no mercado, visando sua aceitação pelos clientes.

O plano de fim de vida do produto é atualizado e congelado ao final dessa fase, estabelecendo estratégias para sua descontinuidade e a transição do cliente para outros produtos novos. Nas atividades finais é feita a análise da viabilidade financeira, o *gate* da fase e o registro das decisões tomadas e lições aprendidas, ficando só um núcleo do time de desenvolvimento para conduzir as fases de acompanhamento e descontinuidade do produto, que ocorrem na próxima macrofase, o pós-desenvolvimento.

De acordo com Mendes (2008), a gestão do PDP pode ser vista por meio de vários prismas. Um destes pontos de vista é definido pelo autor como: “a dimensão processo engloba o conjunto de etapas desempenhadas pela empresa para o desenvolvimento do novo produto, assim como das informações relacionadas à execução de cada uma dessas atividades. É uma das mais importantes dimensões do PDP, já que consiste num conjunto de atividades centrais, organizadas em etapas, sem as quais não é possível desenvolver o novo produto” (MENDES, 2008 p.37).

Na visão do autor da presente tese, o modelo de Rozenfeld et al. (2006), relativamente a macrofase desenvolvimento, é orientado segundo esta linha de pensamento, sendo muito voltado a considerações práticas relativas a como desenvolver produtos. Entretanto, em diversas situações é importante uma visão mais macroscópica de como é a organização da empresa com relação aos seus projetos de produtos. Isto é tratado no trabalho de Clark & Wheelwright (1993).

Segundo esses autores, para o gerenciamento de projetos de produtos, são críticas as seguintes dimensões: definição do projeto; organização do projeto e pessoal; liderança e gestão do projeto; resolução de problemas, teste e prototipagem; controle e revisão da alta gerência; correções em tempo real e durante o projeto. Estas dimensões podem ser resumidos da seguinte maneira:

- Definição do Projeto: determinar o escopo do projeto e estabelecer os limites do que será ou não incluído nele, bem como definir seus propósitos e objetivos. É importante notar que esta dimensão faz parte da macrofase pré-desenvolvimento no modelo de Rozenfeld et al. (2006);
- Organização do Projeto e Pessoal: definição de quem irá integrar a equipe e suas devidas responsabilidades;

- Liderança e Gestão do Projeto: esta dimensão inclui a natureza e o papel dos líderes do projeto e o modo pelo qual as tarefas do processo serão sequenciadas em fases, gerenciadas e quais marcos serão utilizados para assinalar a conclusão de cada fase;
- Resolução de Problemas, Testes e Prototipagem: há uma estreita relação entre esta dimensão e a precedente. Aqui o foco é sobre os passos individuais de trabalho, sua condução e o conhecimento requerido para a resolução de problemas. Fundamental é o modo como os testes e protótipos são usados para validar as escolhas já tomadas e focar os esforços nas tarefas remanescentes;
- Controle e Revisão da Alta Gerência: a alta gerência é o elemento integrador do modelo. A forma que ela revisa, avalia e modifica o projeto e suas metas ao longo do tempo tem impacto significativo sobre a efetividade do mesmo;
- Correções em Tempo Real e Durante o Projeto: a incerteza associada ao esforço de desenvolvimento cria a necessidade de frequentes *feedbacks* e revisões durante o projeto. Este elemento trata de questões como medição e avaliação da posição do projeto, reprogramação, novo sequenciamento e redefinição das tarefas restantes.

A seguir, algumas questões abordadas na lista anterior são aprofundadas. No quadro 2.1, tem-se os principais atores envolvidos no projeto, bem como suas responsabilidades. No quadro 2.2, é mostrado o grau de envolvimento de algumas áreas funcionais da empresa em função da fase do projeto do produto. Na sequência, são explicadas as estruturas organizacionais para as tarefas de projeto.

Quadro 2.1 – Os Papéis Principais das Pessoas Envolvidas no Projeto do Produto

Papel	Responsabilidade
Diretores	Definem as estratégias do desenvolvimento de produtos. Podem participar das revisões de fase, trazendo a visão estratégica para comparar o projeto em avaliação, perante todo o portfólio e oportunidades existentes.
Gerentes funcionais	Responsável por uma função específica e por prover pessoas ou conhecimentos específicos para o andamento do projeto.
Gerente de projeto	Responsável por gerenciar e liderar um projeto específico.
Especialistas	Pessoas de várias áreas funcionais e que possuem um conhecimento profundo sobre um tema específico.
Parceiros	São pessoas de outras empresas que podem colaborar com o projeto.
Equipe de desenvolvimento	Pessoas responsáveis por um projeto ou uma fase do mesmo.
Equipe de avaliação	Pessoas responsáveis por avaliar o andamento do projeto e de aprovar ou não sua continuidade ao longo de sua execução
Time de acompanhamento do produto	Pessoas responsáveis por acompanhar o produto ao longo de sua vida, após o término do projeto. Têm outras funções, mas em situações problemáticas são chamados para corrigir problemas e propor mudanças no produto.

(Fonte: Rozenfeld et al., 2006 p.49)

Quadro 2.2 – Distribuição Qualitativa das Atividades por Áreas que Participam dos Projetos

<i>Área</i>	<i>Projeto Informacional</i>	<i>Projeto Conceitual</i>	<i>Projeto Detalhado</i>	<i>Preparação Produção</i>	<i>Lançamento</i>
Gestão de projetos	██████████ ██████████ ██████████	██████████ ██████████	██████████ ██████████	██████████ ██████████ ██████████	██████████ ██████████ ██████████
Meio ambiente	██████████ ██████████	██████████ ██████████		██████████	██████████ ██████████
Marketing	██████████ ██████████ ██████████	██████████ ██████████ ██████████	██████████		██████████ ██████████ ██████████
Engenharia do produto	██████████	██████████ ██████████	██████████ ██████████ ██████████		
Engenharia do processo	██████████	██████████	██████████ ██████████ ██████████	██████████ ██████████	
Produção	██████████	██████████	██████████ ██████████	██████████ ██████████ ██████████	██████████ ██████████
Suprimentos	██████████	██████████ ██████████	██████████	██████████ ██████████ ██████████	██████████ ██████████
Qualidade	██████████ ██████████ ██████████	██████████ ██████████ ██████████	██████████	██████████ ██████████	██████████ ██████████
Custos	██████████	██████████ ██████████ ██████████	██████████ ██████████	██████████ ██████████	██████████ ██████████

(Fonte: Rozenfeld et al., 2006 p. 88)

As estruturas organizacionais dizem respeito a como a empresa gerencia e distribui as responsabilidades das tarefas do projeto. Eles podem ser de três tipos: organização funcional, organização matricial e organização por projetos.

Na organização funcional, o planejamento e execução do projeto cabem às áreas funcionais, sendo o gerente de cada área responsável pela alocação dos recursos e desempenho de suas funções.

Na organização por projetos, diametralmente oposta a anterior, todas as pessoas envolvidas no planejamento e execução são reunidas em uma mesma unidade autônoma organizada por equipes. Essas pessoas comprometem-se apenas com um único projeto.

A organização matricial é uma combinação das anteriores e caracteriza-se pela sobreposição de uma estrutura por projetos na estrutura funcional. A coordenação e o planejamento do projeto são realizados por uma equipe multifuncional e a execução ocorre nas funções de linha. O arranjo matricial pode assumir várias configurações, ou seja, pode tender mais para o lado funcional (matriz funcional) ou para o lado por projeto puro (matriz

projeto). Se a dosagem for aproximadamente igual ela é chamada de matriz pura ou balanceada. O quadro 2.3 apresenta a definição de Larson & Gobeli (1987) para cada tipo de estrutura organizacional.

Quadro 2.3 – Tipos de Arranjos Intraunidades

Tipos	Características
Funcional	O projeto é segmentado e cada parte transferida para a área funcional afim ou para um grupo de pessoas dentro desta área. O projeto é coordenado pelos gerentes funcionais e seus superiores.
Matriz Funcional	Uma pessoa é formalmente designada para acompanhar o projeto através das funções. Esta pessoa tem autoridade limitada sobre as pessoas das áreas funcionais e serve para planejar e coordenar as atividades. Os gerentes funcionais é que possuem a autoridade sobre as atividades que dependem da sua área.
Matriz Balanceada	Uma pessoa é designada para acompanhar o projeto e possui a mesma autoridade dos gerentes funcionais. Esta pessoa, juntamente com os gerentes de cada área, dirige o fluxo de trabalho e toma as decisões técnicas e operacionais.
Matriz Projeto	Um gerente é designado para acompanhar os trabalhos e é responsável pela conclusão do projeto. O envolvimento dos gerentes funcionais é limitado a designar as pessoas de sua área à medida do necessário e de prover o conhecimento específico demandado pelo projeto.
Equipe Autônoma	Um gerente é designado para comandar uma equipe autônoma composta de pessoas de diversas áreas que só trabalham neste projeto. Os gerentes funcionais não têm envolvimento formal.

(Fonte: Larson & Gobeli, 1987 p.129)

Estudos na indústria automobilística criaram a tipologia das equipes peso-leve e peso-pesado para as divisões da estrutura matricial em função do poder de atuação do gerente do projeto. O quadro 2.4 explicita quais os arranjos mais indicados em função do tipo de projeto a ser empreendido. A seguir, na figura 2.4 estão representados estes tipos de arranjos.

Quadro 2.4 – Tipos de Arranjos para Projetos

	<i>Arranjo Funcional</i>	<i>Equipe Peso Leve (matriz funcional)</i>	<i>Equipe Peso Pesado (matriz projeto)</i>	<i>Equipes Autônomas</i>
<i>Tipo de projeto dominante</i>	Processos de manufatura, projetos onde o progresso técnico é fundamental.	Evoluções, extensões, melhorias incrementais. Solução técnica importante, mas balanço entre funções também.	Plataforma/ Próxima geração; solução para o sistema crucial; ambiente turbulento, velocidade crítica.	Rupturas; alto risco; experimentação.
<i>Características dominantes</i>	Orientação funcional com disciplina e foco no processo	Orientação funcional mas com fases interfuncionais e time de projeto para alcançar integração	Foco na equipe com suporte funcional e clara ligação com a alta gerência	Equipe totalmente dedicada e com controle sobre os recursos e processo

(Fonte: Adaptado de Clark & Wheelwright, 1993 p.)

Em suma, a macrofase de desenvolvimento começa a partir do planejamento dos projetos julgados viáveis no portfólio e termina com as informações técnicas detalhadas para o produto ser produzido. Os protótipos foram aprovados, o produto foi homologado e o processo é capaz de produzir na quantidade e qualidade exigidas. O produto foi lançado no

mercado e o atendimento ao cliente e assistência técnica estão implantados. Na próxima seção será vista uma fase específica da macrofase desenvolvimento, a fase de projeto conceitual.

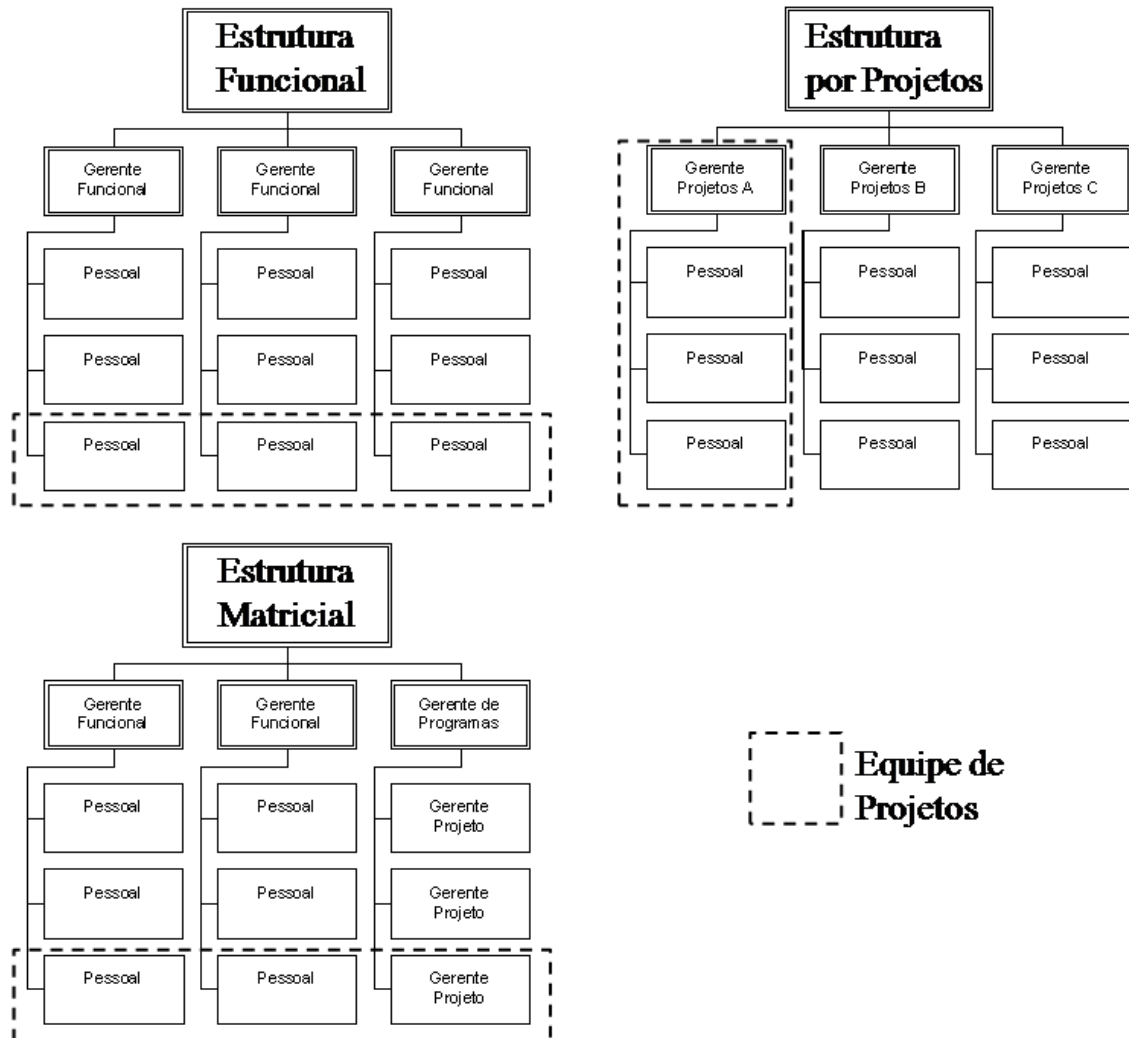


Figura 2.4 – Estruturas Organizacionais para o Gerenciamento de Projetos
(Fonte: Rozenfeld et al., 2006 p.26-27)

2.4 A Fase de Projeto Conceitual

De acordo com Rozenfeld et al. (2006), as atividades que a equipe de projeto irá executar na fase de projeto conceitual relacionam-se com a busca, criação, representação e seleção de soluções para o problema do projeto. No início, o produto é modelado de maneira abstrata e definido em termos de suas funções básicas. As funções básicas são desdobradas em diversas estruturas de função e vários princípios de solução são propostos de forma a satisfazê-las. A combinação dos diversos princípios entre si resulta em alternativas de solução

para o problema. Para cada alternativa, é definida uma arquitetura (componentes e suas conexões) e um estilo, gerando os conceitos do produto. Os conceitos são uma descrição aproximada das tecnologias, princípios de funcionamento e formas do produto, geralmente expressos por meio de um esquema ou modelo tridimensional acompanhado de um texto explicativo. Os conceitos passam, então, por um processo de seleção, onde um deles será o escolhido para avançar às etapas posteriores do projeto e se transformará no produto final.

Grosso modo, as atividades da fase de projeto conceitual podem ser agrupadas em duas etapas: geração de conceitos e seleção de conceitos (BACK et al., 2008; ULRICH & EPPINGER, 2008). Estas duas etapas são detalhadas a seguir.

2.4.1 A Etapa de Geração de Conceitos

Segundo Ulrich & Eppinger (2008), o processo de geração de conceitos inicia-se a partir do conjunto de necessidades dos clientes e das especificações-meta do produto e resulta em um conjunto de conceitos que passará posteriormente por um processo de seleção. Um bom processo de geração de conceitos é aquele onde todo o espaço de soluções alternativas foi explorado. Isto reduz a probabilidade de a equipe descobrir em etapas posteriores do projeto um conceito muito melhor, ou que um concorrente introduza no mercado um produto muito superior a aquele sendo desenvolvido. As disfunções mais comuns durante a etapa de geração de conceitos são:

- Considerar apenas uma ou duas alternativas, frequentemente propostas pelo(s) membro(s) mais assertivo(s) do grupo;
- Falhar em considerar cuidadosamente a utilidade de conceitos utilizados por outras empresas em produtos correlatos ou não;
- Envolver apenas uns poucos membros da equipe no processo, resultando em falta de confiança e comprometimento do resto da equipe;
- Integrar ineficazmente soluções parciais promissoras;
- Falha em considerar categorias inteiras de soluções.

Uma abordagem estruturada para a etapa de geração de conceitos reduz sobremaneira a incidência desses problemas. Ulrich & Eppinger (2008) propõem um método

composto de cinco passos: clarificar o problema, investigar externamente, investigar internamente, explorar sistematicamente e refletir nas soluções e no processo.

O primeiro passo, clarificar o problema, consiste em se obter uma compreensão global do problema e, então, dividi-lo em subproblemas conforme necessário. As fontes de informação básica para este passo são a declaração de escopo do projeto, a lista de requisitos dos clientes e as especificações preliminares do produto, embora todas estas informações sejam atualizadas na fase de projeto conceitual. A divisão de um problema é denominada de decomposição do problema e normalmente é baseada em um esquema funcional, ainda que existam outras maneiras de decomposição.

Para se decompor funcionalmente o problema, este é inicialmente modelado como uma função total que transforma entradas em saídas. Para sistemas técnicos, normalmente as entradas e saídas são de três categorias: energia, materiais e informação. A seguir, a função total é desdobrada em subfunções. O processo é repetido até que cada subfunção seja simples o suficiente para ser manipulada. O resultado final é um diagrama contendo as subfunções conectadas por fluxos de energia, materiais e informação. Tal diagrama é denominado por Rozenfeld et al. (2006) de estrutura de funções. Segundo estes autores, a decomposição da função global permite: a proposição de diferentes estruturas de funções que podem ser obtidas por meio de divisão ou combinação de funções; a mudança da disposição de funções individuais; a mudança do tipo de ligação (série ou paralelo); e a alteração da fronteira do sistema. A figura 2.5 ilustra a representação esquemática da função total e a figura 2.6 a estrutura de funções, ambas para a função de lavar roupas. Nestes dois diagramas, as linhas contínuas e finas representam os fluxos de energia, as linhas contínuas e grossas representam os fluxos de materiais e as linhas tracejadas, os fluxos de informação.

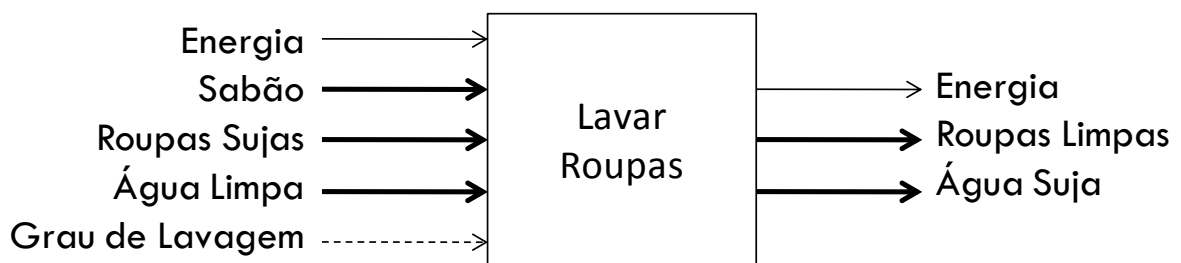


Figura 2.5 – Função Total “Lavar Roupas”
(Fonte: Rozenfeld et al., 2006 p.242)

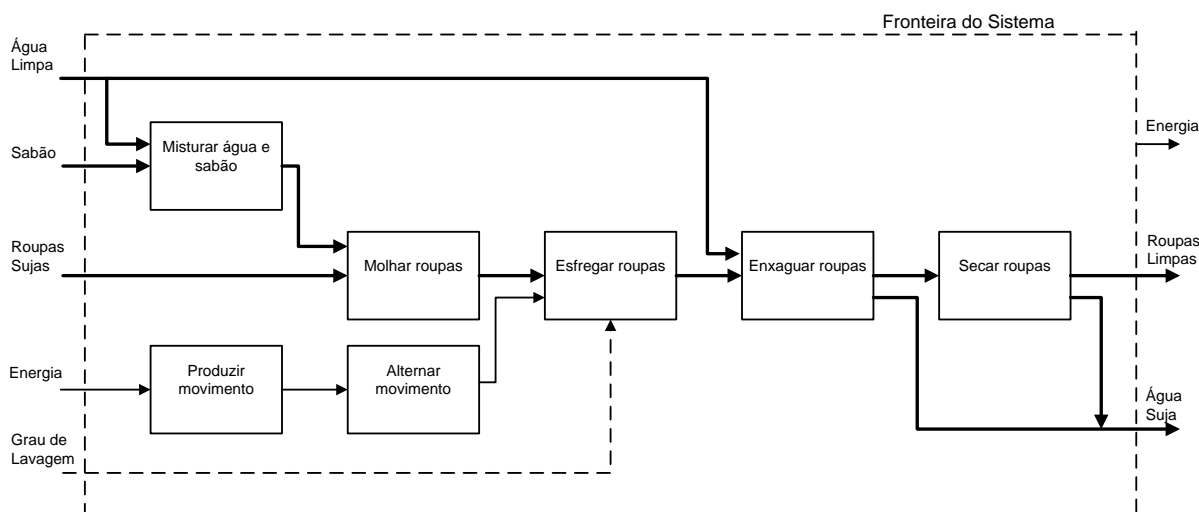


Figura 2.6 – Estrutura de Funções para “Lavar Roupas”
(Fonte: Rozenfeld et al., 2006 p.243).

Neste estágio, o objetivo é apenas descrever os elementos funcionais do produto, sem se comprometer com um princípio tecnológico ou de funcionamento específico para o conceito. Com isso, evitam-se barreiras contra soluções inovadoras e garante-se que o foco seja mantido na essência do problema e não em sua solução imediata.

Uma vez terminada a decomposição funcional, a equipe deve se concentrar nos subproblemas mais críticos para o sucesso do produto ou naqueles que são mais prováveis de necessitarem de soluções mais originais e criativas. Isto envolve uma decisão consciente de quais subproblemas serão atacados inicialmente e quais serão considerados posteriormente.

O segundo passo do método de Ulrich & Eppinger (2008), investigar externamente, é voltado para encontrar soluções existentes tanto para o problema global quanto para os subproblemas identificados durante o passo de clarificação do problema. Implementar uma solução já existente é rápido e barato e permite que a equipe concentre sua energia criativa nos subproblemas críticos para os quais não existe solução satisfatória prévia. Ademais, muitas vezes, soluções convencionais podem ser combinadas com soluções inovadoras de outros subproblemas, gerando uma solução global superior. Por esta razão, a investigação externa envolve uma avaliação detalhada não somente de produtos competidores, mas também de tecnologias utilizadas em outros produtos com subfunções semelhantes.

De acordo com Ulrich & Eppinger (2008), as principais maneiras de obter informações de fontes externas são: entrevistas com usuários de ponta (aqueles que têm a necessidade pelo produto muito antes do mercado em geral e que se beneficiarão

substancialmente da inovação), consulta a especialistas, consulta em registros de patentes, buscas na literatura técnica e *benchmarking* em produtos competidores.

O terceiro passo do método de Ulrich & Eppinger (2008) é a investigação interna, ou seja, a utilização do conhecimento e da criatividade da equipe na geração das soluções dos subproblemas. A investigação é interna no sentido que todas as ideias que surgirão deste passo já estão de posse da equipe de projeto. Em se tratando de desenvolvimento de novos produtos, está é provavelmente a atividade mais criativa e aberta de todo o projeto. Pode-se pensar na investigação interna como um processo de se resgatar pedaços de informações potencialmente úteis da memória dos membros da equipe e, então, adaptá-los ao problema em questão. De acordo com Back et al. (2008), Baxter (2008) e Rozenfeld (2006), são úteis neste passo os seguintes métodos de criatividade:

- *Brainstorming*: pessoas de áreas funcionais distintas são reunidas e propõem grande quantidade de soluções para o problema. Deve-se evitar qualquer crítica ou avaliação preliminar das ideias, por mais absurdas que possam parecer inicialmente;
- Método 635: é semelhante ao *brainstorming*, mas é escrito. O nome do método é devido ao fato de que seis pessoas registram em uma folha de papel três sugestões de solução e, a seguir, trocam as folhas entre si até que cada uma das folhas passe pelas outras cinco pessoas. A cada rodada de troca de folhas, cada membro deve adicionar ou melhorar as ideias já registradas;
- Método Sinético: reconhece que as pessoas possuem um mecanismo mental que tende a enquadrar e converter qualquer coisa nova ou estranha em padrões conhecidos. Porém, para se alcançar a inovação, deve-se percorrer o caminho inverso: transformar o familiar em estranho. Isto é obtido por meio de quatro tipos de analogia: analogia pessoal, analogia direta, analogia simbólica e analogia fantasiosa. Nas analogias pessoais, os indivíduos utilizam suas emoções, sentimentos e características para obter a compreensão do problema tecnológico. Consiste nas pessoas se colocarem no lugar da peça, mecanismo ou operações e ver como se comportariam naquela situação. As analogias diretas consistem em se comparar, em um nível adequado de abstração, dois domínios de conhecimento distintos e tentar transferir as características de um deles para o outro. Na analogia simbólica, uma definição condensada do problema é escrita e palavras-chave são substituídas por sinônimos ou declarações que guardam uma relação com a original. Este procedimento permite analisar o problema de outros pontos de vista e pode disparar ideias criativas. Por fim, têm-se a analogia fantasiosa,

que consiste em se apelar para a irracionalidade e fugir das leis e normas estabelecidas;

- Método da Listagem de Atributos: consiste em isolar e listar os principais atributos do produto e, em seguida, avaliar cada um deles visando sua melhoria.
- Método da Instigação de Questões: questões instigadoras reunidas em torno de palavras-chave são utilizadas para ativar ou estimular ideias. Um exemplo é o método MESCRAI, que lista 19 questões agrupadas em torno das palavras-chave Modificar, Eliminar, Substituir, Combinar, Rearranjar, Adaptar e Inverter (BACK et al, 2008);
- Método da Galeria: combina o trabalho individual com o de equipe. Os membros do grupo propõem individualmente soluções por meio de desenhos e textos que são fixados em um quadro. As ideias são, então, analisadas em grupo.

Como resultado dos passos de investigação externa e interna, a equipe terá coletado dezenas ou até centenas de fragmentos de conceitos, isto é, soluções aos subproblemas. A exploração sistemática, que é o quarto passo do método de Ulrich & Eppinger (2008), tem como objetivo examinar todo o espaço de possibilidades por meio da organização e síntese de tais fragmentos. Uma proposta seria tentar combinar todos os fragmentos associados com os subproblemas entre si. Logicamente esta não seria uma solução factível, pois a quantidade de combinações obtidas seria enorme e muitas dessas combinações seriam inviáveis ou absurdas. Existem dois métodos específicos cujo objetivo é gerenciar esta complexidade e auxiliar a equipe a organizar o raciocínio. São eles a árvore de classificação de conceitos e a matriz morfológica (ULRICH & EPPINGER, 2008).

Segundo Ulrich & Eppinger (2008), a árvore de classificação de conceitos é utilizada para dividir todo o espaço de soluções possíveis em várias classes distintas cujo objetivo é facilitar a comparação e a exclusão de soluções. Este método gera quatro benefícios, a saber: a exclusão de categorias inteiras de soluções pouco promissoras; a identificação de linhas de solução independentes para o problema; a detecção de uma ênfase inapropriada em certos ramos da árvore; e o refinamento da decomposição do problema para certos ramos da árvore. A figura 2.7 mostra uma árvore de classificação de conceitos para o subproblema de determinar a fonte de energia para uma ferramenta portátil de fixação de pregos em madeira para o mercado de construção civil.

As árvores de classificação podem ser construídas com seus ramos correspondendo aos fragmentos de solução de qualquer dos subproblemas. Entretanto, alguns esquemas de classificação são mais úteis que outros. Em geral, um subproblema cuja solução

restringe seriamente as possíveis soluções dos subproblemas remanescentes é um bom candidato para uma árvore de classificação.

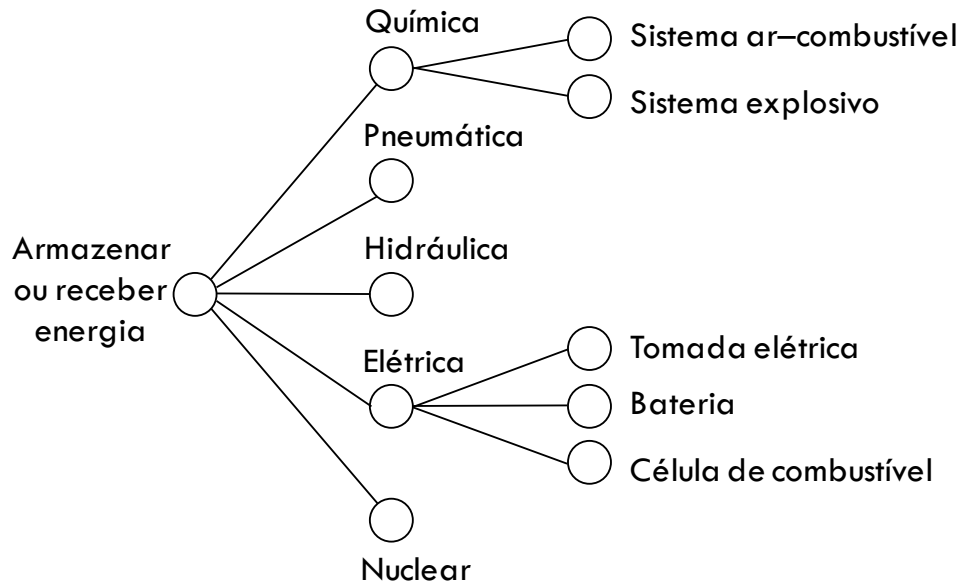


Figura 2.7 – Exemplo de Árvore de Classificação
(Fonte: Ulrich & Eppinger, 2008 p. 112).

O método da matriz morfológica propicia uma forma de se combinar sistematicamente fragmentos de solução. Neste método monta-se uma matriz cujas linhas representam as subfunções do diagrama de estrutura de funções (ver figura 2.6) e as colunas os princípios de solução para cada subfunção. Soluções potenciais para a função global são obtidas combinando-se os fragmentos de cada linha.

Contudo, a simples combinação dos fragmentos não conduz espontaneamente à solução do problema global. Cada combinação deve ser desenvolvida e refinada antes que uma solução integrada apareça. Tal desenvolvimento pode não ser viável ou possível e pode levar a mais de uma solução, mas no mínimo gera mais *insights* para a equipe. Na realidade, a matriz é simplesmente uma maneira de se forçar associações entre os fragmentos de forma a estimular o pensamento criativo. De maneira alguma o simples ato de selecionar combinações produz uma solução completa.

Rozenfeld et al. (2006) denominam a combinação dos fragmentos de solução resultantes da matriz morfológica de alternativas de solução. O conceito do produto é obtido a partir do refinamento destas alternativas. Inicialmente deve-se determinar a arquitetura global das alternativas, ou seja, o esquema pelo qual os elementos funcionais serão arranjados em partes físicas e como interagirão por meio de interfaces. A seguir, são identificados e

definidos os principais sistemas, subsistemas e componentes para as alternativas. Por fim, são agregadas às alternativas decisões ergonômicas e estéticas. Ao final deste processo obtêm-se os conceitos do produto.

O quadro 2.5 mostra um exemplo de matriz morfológica para a ferramenta portátil de fixação de pregos citada anteriormente e a figura 2.8 ilustra três alternativas de solução obtidas combinando-se as seguintes linhas do quadro 2.5: (a) solenoide, mola e múltiplos impactos; (b) motor rotativo, mola e único impacto; e (c) motor linear, massa móvel e único impacto.

Quadro 2.5 – Exemplo de Matriz Morfológica

Subfunções	Princípios de Solução			
	Motor rotativo com transmissão	Motor linear	Solenoide	Canhão elétrico
Converter energia elétrica em cinética				
Acumular energia	Mola	Massa móvel		
Aplicar energia cinética no prego	Impacto único	Múltiplos impactos	Empurrar o prego	

(Fonte: Ulrich & Eppinger, 2008 p. 114).

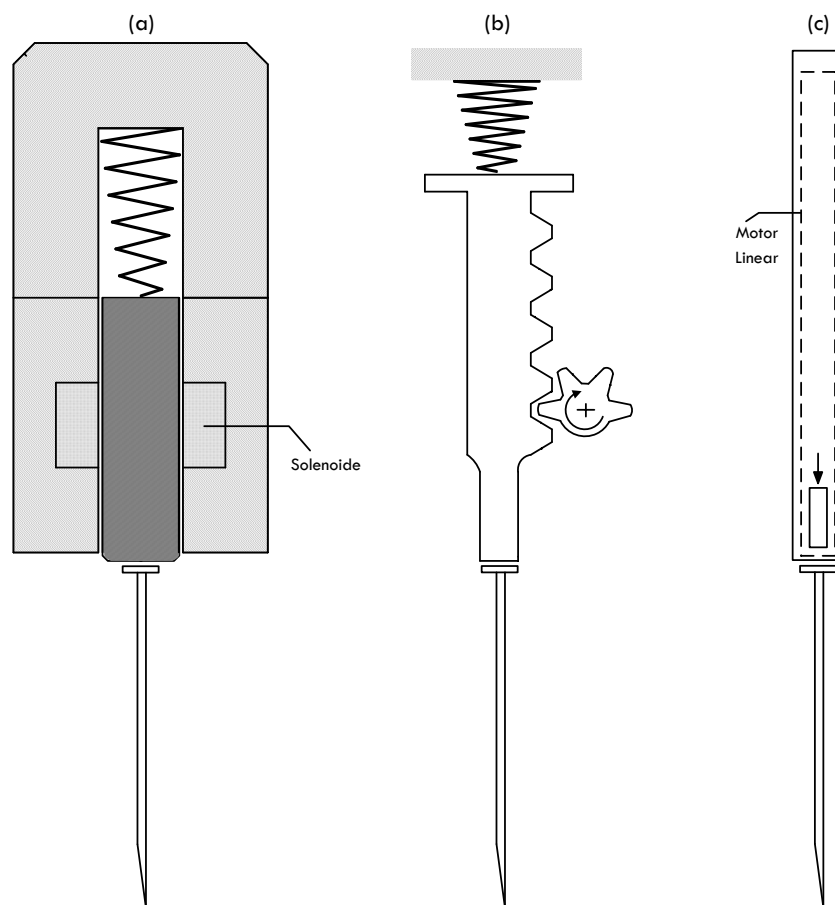


Figura 2.8 – Exemplos de Alternativas de Solução

(Fonte: Adaptado de Eppinger & Ulrich, 2008).

Antes de se finalizar este passo, duas observações são pertinentes. Primeiro, a árvore de classificação de conceitos e a matriz morfológica são ferramentas que a equipe pode utilizar de maneira flexível. Elas são maneiras simples de se organizar o raciocínio e guiar a energia criativa da equipe. Raramente existe uma única árvore de classificação ou matriz morfológica. Provavelmente a equipe passará por uma etapa exploratória, onde várias árvores e matrizes serão desenvolvidas. Esta etapa exploratória é importante para se refinar a decomposição do problema feita anteriormente (passo 1). Em segundo lugar, deve-se lembrar de que ao final do passo 1 alguns subproblemas tinham sido conscientemente deixados de lado, de forma que a equipe pudesse se concentrar naqueles que eram críticos. Neste ponto, depois que os subproblemas mais importantes foram resolvidos, a equipe deve retornar e tratar dos subproblemas remanescentes, mas agora com um escopo de possibilidades mais reduzido.

O quinto e último passo do método de Ulrich & Eppinger (2008) consiste em se refletir a respeito das soluções obtidas e de todo o processo de geração de conceitos. Questões a serem respondidas neste passo são do tipo:

- A equipe está convencida de que todo o espaço de soluções possíveis foi explorado?
- Há diagramas de estrutura de funções alternativos?
- Há maneiras alternativas de se decompor o problema?
- As fontes externas de informação foram amplamente consultadas?
- Ideias de todos foram discutidas e integradas ao processo?

Terminada a etapa de geração de conceitos, a equipe possuirá um conjunto de conceitos de produtos que serão submetidos a um processo de valoração e escolha, conforme é explicado na próxima seção.

2.4.2 A Etapa de Seleção de Conceitos

Anteriormente à etapa de seleção de conceitos, a equipe de projeto identificou um conjunto de requisitos dos clientes e por meio de métodos estruturados gerou conceitos alternativos em resposta a esses requisitos. A etapa de seleção de conceito é o processo de avaliar tais conceitos relativamente aos requisitos dos clientes e uma série de outros critérios. No geral, é um processo convergente e normalmente iterativo, no sentido que pode não

produzir um conceito dominante imediatamente. Inicialmente, um grande número de conceitos é reduzido para um conjunto menor, mas estes conceitos remanescentes podem ser subsequentemente melhorados e/ou combinados entre si, temporariamente ampliando este conjunto. Após algumas iterações, o melhor conceito é finalmente escolhido.

Segundo Rozenfeld et al. (2006), a principal dificuldade envolvida nesta etapa se deve à natureza da fase de projeto conceitual, ou seja, informações técnicas ainda limitadas e abstratas. Portanto, faz-se necessário a utilização de métodos de seleção que tenham capacidade de trabalhar com esta limitação de informações. Os métodos normalmente citados na literatura são variantes de uma matriz de decisão que contém os conceitos e os critérios de avaliação (BACK et al., 2008; BAXTER, 2008; ROZENFELD et al., 2006; ULRICH & EPPINGER, 2008). Os critérios podem ser ponderados ou não e as alternativas podem ser avaliadas de maneira absoluta (cada alternativa é comparada com um padrão) ou relativa (isto é, as alternativas são comparadas entre si).

Back et al. (2008) e Ulrich & Eppinger (2008) sugerem que a seleção de conceitos seja feita em dois estágios. Inicialmente deve-se fazer uma triagem inicial dos conceitos, normalmente utilizando o método de Pugh. A triagem inicial é uma avaliação rápida e aproximada com o objetivo de reduzir a quantidade de conceitos àqueles mais viáveis. O segundo estágio consiste em se pontuar os conceitos. A pontuação é uma análise meticulosa a fim de escolher o conceito com maior probabilidade de conduzir a um produto bem sucedido. Durante a triagem inicial, os conceitos são avaliados em relação a um conceito de referência. Neste passo inicial, comparações quantitativas detalhadas, além de difíceis de serem obtidas, podem ser ilusórias e dar um falso sentimento de segurança à equipe, assim um sistema de comparação aproximado é utilizado. Após algumas alternativas serem eliminadas, a equipe pode efetuar uma análise mais detalhada e quantitativa. Ao longo de ambas as análises, várias iterações podem ocorrer e novas alternativas podem surgir da combinação ou melhoria dos atributos dos conceitos avaliados. A seguir, serão apresentados métodos para a triagem e pontuação de conceitos.

De acordo com Ulrich & Eppinger (2008), o método de Pugh segue cinco passos. Inicialmente, é montada a matriz de seleção, onde as linhas contêm os critérios de decisão e as colunas os conceitos, estes representados por um croqui e um texto explicativo. Os critérios são escolhidos com base nos requisitos dos clientes e da organização, usualmente expressos em um nível razoável de abstração. Os critérios têm de ser escolhidos de forma a discriminar os conceitos. Além disso, como todos têm o mesmo peso, a adição de critérios pouco importantes pode obscurecer o efeito daqueles mais significativos. Após um exame

cuidadoso, a equipe escolhe um conceito de referência, contra o qual todos os outros serão comparados. A referência pode ser um padrão do setor, um conceito simples com o qual a equipe é familiar, um produto comercialmente disponível ou líder do mercado que foi estudado, uma geração anterior do produto em desenvolvimento, qualquer um dos conceitos sendo analisados ou uma combinação de subsistemas que representam as melhores características de diferentes produtos.

Em um segundo momento, as avaliações são colocadas na matriz por meio da discussão entre a equipe. Cada célula da matriz contém os símbolos “+” “-” ou “0”, indicando que o conceito relativo a aquela coluna é, respectivamente, melhor, pior ou igual à referência.

Após os conceitos terem sido avaliados com relação à referência, as quantidades de “+” e de “-” são totalizadas. Um total geral pode ser calculado subtraindo-se o número de avaliações negativas do número de avaliações positivas, dando uma medida aproximada do valor do conceito. Segundo Frey et al. (2009), este total não deve ser considerado como um meio de se obter o conceito vencedor. Esta má interpretação do método está presente em sua apresentação e até na terminologia utilizada em algumas publicações. Em primeiro lugar, normalmente a matriz é exibida nos livros como uma ilustração ordenada e límpida, o que contribui para o equívoco do que é realmente feito. Na prática, ela é uma colagem de notas e croquis. Em segundo lugar, ao invés de ser chamado de método de seleção de conceitos, o que implica uma única iteração levando à escolha de um único conceito, o mais correto seria denominá-lo de método de convergência controlada.

Esta natureza iterativa do método está presente em seu quarto passo. Tendo avaliado e ranqueado os conceitos, a equipe deve considerar se há maneiras de combinar e/ou melhorar certos conceitos. De acordo com Ulrich & Eppinger (2008), duas questões devem ser consideradas:

- Há um conceito no geral bom, mas que é degradado por um atributo ruim? Pode uma pequena modificação melhorá-lo em seu todo, preservando suas características distintivas?
- Há dois conceitos que podem ser combinados de forma a preservar suas características positivas e anular as negativas?

Os conceitos combinados e melhorados são adicionados à matriz, avaliados pela equipe e classificados juntamente com os conceitos originais. Frei et al. (2010) realçam que em aplicações práticas do método, na maioria das vezes o conceito escolhido no final nem

fazia parte das alternativas iniciais. O ponto central é que o método encoraja a geração de alternativas adicionais.

Por fim, estando a equipe satisfeita com seu entendimento de cada conceito e suas qualidades relativas, ela decide quais conceitos serão selecionados para refinamento e análise posteriores. A quantidade de conceitos selecionados para o estágio de pontuação é limitada pelos recursos da equipe.

Antes de encerrar, é interessante apresentar algumas características distintivas do método de Pugh na visão de Frey et al. (2009). Primeiro, o método não é apenas uma ferramenta de tomada de decisão, mas também de aprendizagem e de síntese criativa. Outro ponto é que não há votação no preenchimento da matriz. Quando há controvérsia se um conceito é melhor ou pior que a referência com relação a um critério, ambos os lados devem discutir seus pontos de vista. Em muitos casos, a questão é resolvida, pois fatos novos a um dos lados são trazidos à luz, torna-se claro o que aquele conceito realmente é ou então se clarifica o que o critério em questão na verdade significa. Se a discussão conduzir a um entendimento, um dos símbolos é colocado na matriz. Se o desentendimento persistir, um “0” é colocado. Por fim, mas não menos importante, os seguintes benefícios advêm da utilização do método: conceitos fracos são eliminados de consideração posterior; é possível investir mais recursos no detalhamento dos conceitos mais promissores; fica facilitado o desenvolvimento de conceitos adicionais baseados no que foi revelado pela matriz e pelas informações reunidas em sua confecção.

O segundo estágio da etapa de seleção de conceitos é a pontuação dos conceitos. Muito provavelmente, os conceitos e os critérios de seleção foram refinados desde a etapa anterior de triagem inicial, o que justifica tanto a equipe pontuar os conceitos com relação a uma escala quanto ponderar os critérios. A nota final de cada conceito é geralmente determinada pela média aritmética ponderada de suas pontuações, embora haja outros esquemas de valoração, tais como a média geométrica ou a média dos logaritmos das pontuações (BACK et al, 2008).

Nesta etapa, normalmente são utilizados os métodos de tomada de decisão com múltiplos atributos (MADM), em especial os métodos baseados na teoria do valor multiatributo (MAVT – *Multiattribute Value Theory*), muito embora o método de análise hierárquica (AHP) também possa ser empregado. Uma vez que o AHP será explicado em detalhes no capítulo 4, aqui será dada uma visão geral da MAVT.

Na teoria do valor multiatributo, o valor das alternativas com relação ao objetivo da análise é composto da pontuação das alternativas com relação a cada atributo¹ e dos pesos destes atributos, sintetizados segundo alguma regra de agregação, comumente uma média ponderada. De acordo com Goodwin & Wright (2004), a MAVT é baseada em uma série de axiomas, que se puderem ser aceitos, indicarão quais são os cursos de ação mais racionais. São eles:

- É assumido que o analista é capaz de decidir qual opção é preferível com relação aos diversos atributos;
- Se a opção A é preferível a B e B é preferível a C, por consequência, A deve ser preferível a C;
- Se a opção A é preferível a B e B é preferível a C, por consequência, a intensidade de preferência de A em relação a C é maior que a intensidade de preferência de A em relação a B (ou de B em relação a C);
- É assumido que os valores da melhor opção e da pior não são mais ou menos infinito.

Goodwin & Wright (2004) resumem a aplicação dos métodos da MAVT em quatro passos: identificar os atributos relevantes para a decisão; para cada atributo, designar valores (notas) para medir o desempenho das alternativas naquele atributo; determinar a importância relativa (pesos) de cada atributo; e para cada alternativa, tomar uma média ponderada dos valores recebidos por ela em cada atributo. Este último passo dará uma medida de quão bem a alternativa é com relação ao objetivo.

Os atributos são utilizados para medir o desempenho das alternativas em relação aos objetivos do tomador de decisão. Isto significa que é necessário chegar a um conjunto de atributos que possa ser medido em uma escala numérica. Especificamente para a pontuação dos conceitos, Back et al. (2008) e Ulrich e Eppinger (2008) citam que os mesmos critérios utilizados anteriormente na triagem devem ser revisados e complementados. Naquela ocasião, os critérios estavam expressos em um nível razoável de abstração. Já aqui, possivelmente alguns critérios serão desmembrados e tornados mais específicos. Na realidade, segundo a terminologia da decisão multicriterial, na etapa de triagem não se tinha critérios de decisão, mas atributos. Na etapa de pontuação de conceitos, o que Back et al. (2008) e Ulrich e Eppinger (2008) sugerem podem ser considerados verdadeiros critérios. Entretanto, do

¹ Atributo tem uma definição mais abrangente que critério, ou seja, o que aqui é descrito como sendo válido para a mensuração dos atributos também se aplica aos critérios de seleção de conceitos. O início do capítulo 4 apresenta a definição de ambos de acordo com a decisão multicriterial.

ponto de vista dos métodos da MAVT, tanto atributos quanto critérios podem ser igualmente utilizados.

Uma vez identificados os atributos a serem utilizados, o próximo passo é determinar o desempenho de cada alternativa com relação aos atributos. De acordo com Goodwin & Wright (2004), isto pode ser obtido por meio de avaliação direta ou uso de funções de valor.

Na avaliação direta, a partir de uma escala, por exemplo, de 0 a 1, aloca-se a maior nota à melhor alternativa e a menor nota à pior. As demais devem ser posicionadas de tal forma que a distância entre elas indique a intensidade da preferência de uma alternativa com relação à outra em termos daquele atributo. Por exemplo, dadas três notas A, B e C ($A > B > C$) obedecendo a relação $\overline{AB} = 2 \times \overline{BC}$, pode-se afirmar que o incremento obtido trocando-se B por A é o dobro daquele obtido trocando-se C por B, no atributo em questão. Note que este tipo de escala é intervalar, pois não são os pontos que são diretamente comparados, mas as distâncias entre os mesmos. Por exemplo, a escala de temperatura Celsius é uma escala intervalar. Portanto, pode-se afirmar que um aumento de temperatura de 40°C para 80°C é o dobro de uma variação de 100°C para 120°C. Entretanto, é falso afirmar que 80°C é o dobro de 40°C, pois o zero desta escala é arbitrário.

A construção de uma função de valor pode ser obtida de várias maneiras, dependendo das suposições de sua forma (por exemplo, linear). Inicialmente, cria-se uma escala (por exemplo, de 0 a 1) e aloca-se a maior nota à melhor alternativa e a menor nota à pior. Chamando de x o valor do atributo em sua escala original e v a função de valor, tem-se para atributos positivos (isto é, atributos cujos valores maiores são mais desejáveis como, por exemplo, confiabilidade): $v(x_{max}) = 1$ e $v(x_{min}) = 0$. Para atributos negativos (atributos cujos valores maiores são menos desejáveis como, por exemplo, custos) ocorre exatamente o oposto. Se a função de valor puder ser considerada linear, a reta fica determinada, pois se tem dois pontos da mesma. Portanto, as notas das alternativas intermediárias são obtidas na escala de 0 a 1 por interpolação linear.

Se a função de valor não puder ser considerada linear, sua forma aproximada deve ser obtida. Dentre os diversos métodos existentes, um dos mais utilizados, segundo Goodwin & Wright (2004), é o método da bissecção. Considerando-se um atributo positivo, tem-se que $v(x_{max}) = 1$ e $v(x_{min}) = 0$. Neste método, deve-se determinar um ponto x de tal forma que $v(x) = 0,5$, isto é, o aumento de x_{min} para x é tão atrativo quanto o incremento de x para x_{max} . A seguir, determinam-se os pontos que dividem estes dois intervalos em partes iguais e assim sucessivamente.

O terceiro passo é determinar a importância relativa de cada atributo. Assim como na determinação da função de valor, há diversos métodos para se obter os pesos dos atributos. De acordo com Edwards & Barron (1994), duas maneiras muito utilizadas são o método da troca e da ordenação. No método da troca, ao respondente são dadas duas tarefas. Primeiramente, ele deve dispor em ordem decrescente de importância todos os atributos. Para cada par de atributos adjacentes, o respondente tem de comparar o quanto a melhoria do pior para o maior nível de um deles é comparada com a mesma melhoria no outro. No método da ordenação, a importância relativa dos atributos é derivada apenas da ordem de importância dos mesmos.

O último passo é a síntese das notas das alternativas. Se for possível considerar que os atributos sejam mutuamente independentes de preferência, pode-se utilizar o modelo aditivo linear para síntese dos resultados. Segundo Munda (2008), esta condição ocorre quando dado um par qualquer de atributos, a preferência por um valor específico de um atributo não depender do valor do outro atributo e vice-versa. Operacionalmente, é permitido avaliar a contribuição marginal de cada atributo separadamente e, então, somá-las para produzir um valor total, ou seja, não há interação entre os atributos. De acordo com Frey et al. (2010), esta é uma suposição normalmente bem realista na prática de projetos de engenharia.

Assim como no estágio de triagem inicial, a equipe pode tentar mudar ou combinar conceitos visando a sua melhoria. Para Ulrich e Eppinger (2008), muito embora a etapa de geração de conceitos tenha sido completada antes do início da etapa de seleção de conceitos, alguns dos refinamentos e melhorias mais criativos ocorrem durante a o processo de seleção de conceitos, na medida em que a equipe percebe quais são os pontos positivos e negativos de certas características dos conceitos.

Antes de encerrar formalmente a etapa de seleção de conceitos, a equipe pode empreender uma análise de sensibilidade nos resultados. Isto compreende alterar de maneira proposital os pesos dos critérios e as notas das alternativas e observar o impacto no resultado final. Investigar a robustez dos resultados da ordenação dos conceitos permite avaliar o grau de incerteza do processo de pontuação de conceitos.

Aqui termina a revisão bibliográfica a respeito dos fundamentos teóricos do Processo de Desenvolvimento de Produtos e de uma de suas fases, o Projeto Conceitual. O próximo capítulo apresenta métodos para a avaliação e melhoria ambiental de produtos que podem ser utilizados em conjunto com o desenvolvimento de produtos.

3 MÉTODOS PARA A AVALIAÇÃO E MELHORIA AMBIENTAL DE PRODUTOS

Para se alcançar o desenvolvimento sustentável, são necessários métodos e ferramentas para auxiliar a comparação e a quantificação dos impactos ambientais dos bens e serviços. Estes produtos são criados e utilizados porque eles satisfazem uma necessidade. Todo produto tem um ciclo de vida físico que se inicia com seu projeto e termina nas atividades de fim vida. Todas essas atividades, ou processos, resultam em impactos ambientais devido ao uso de recursos, emissão de substâncias no ambiente e outras trocas ambientais (por exemplo, radiação).

Este capítulo tem como objetivo apresentar alguns métodos para a avaliação e melhoria ambiental de produtos. São apresentadas a Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos, tanto em sua versão completa, padronizada pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, quanto em seus diversos formatos alternativos, bem como as Estratégias do DfE.

3.1 Avaliação de Ciclo de Vida – ACV

Segundo Guinée (2002), a norma ISO 14040 define a ACV como a compilação e avaliação das entradas, saídas e impactos ambientais potenciais do sistema do produto ao longo de seu ciclo de vida físico. O sistema do produto é uma coleção de processos elementares conectados por fluxos de produtos intermediários que desempenham uma ou mais funções definidas. Os processos elementares são a menor porção do sistema do produto para os quais os dados são coletados. A ACV toma como ponto de partida a função satisfeita pelo sistema do produto. Em princípio, abrange todos os impactos ambientais relacionados com uso de recursos e emissões associadas com todos os processos requeridos pelo sistema do produto para fornecer sua função – da extração das matérias primas, passando pela fabricação dos materiais, uso do produto, até o processamento dos resíduos do produto descartado. A figura 3.1 ilustra este conceito.

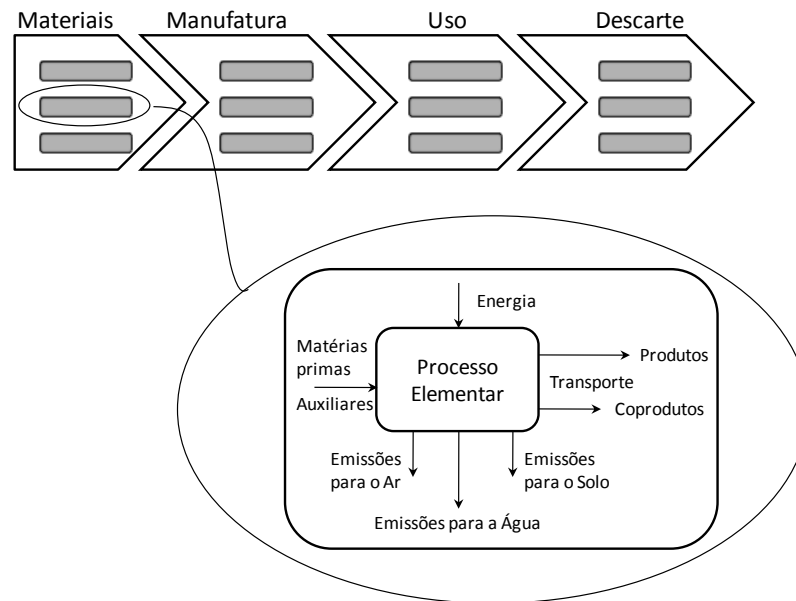


Figura 3.1 – O Sistema do Produto e seus Processos Elementares

(Fonte Adaptado de Hauschild, 2005 e de Vigon et al., 1993)

Devido a sua complexidade, uma ACV requer um protocolo fixo para sua execução. Tal protocolo foi estabelecido pela Organização Internacional para Padronização (ISO) e é geralmente referido como uma estrutura metodológica, esta dividida em quatro componentes, como indica a figura 3.2. As normas ISO 14040 e ISO 14044 que tratam de cada um dos elementos da estrutura metodológica da ACV fornecem uma referência internacional com relação aos princípios, estrutura e terminologia para se conduzir e reportar uma ACV. Contudo, elas não mostram como operacionalizar passo a passo uma ACV. Embora explicitem as etapas que devem ou não ser conduzidas durante um estudo, elas não estão ordenadas de uma forma gradual ou escalonada. A seguir, os componentes da estrutura metodológica da ACV são detalhados.

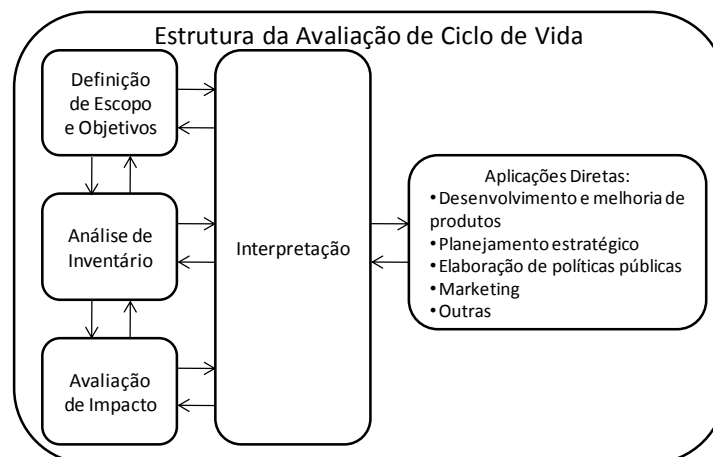


Figura 3.2 – Estrutura Metodológica da ACV segundo a ISO 14040

(Fonte: Guinée, 2002 p. 404)

3.1.1 Definição de Escopo e Objetivos

Inicialmente, o objetivo é declarado e justificado, explicitando-se as aplicações pretendidas da ACV, as partes interessadas e o público-alvo. De acordo com Heijungs (1992b), algumas aplicações importantes da ACV são a geração de informações de produtos, a melhoria de produtos, a regulação de produtos e o traçado de políticas governamentais.

A distinção entre os tipos de objetivo tem importantes consequências na modelagem do sistema do produto. Além disso, a norma ISO que trata da ACV estabelece requisitos específicos obrigatórios para estudos cujo objetivo é fazer declarações comparativas para divulgação pública. Por declarações comparativas entenda-se uma alegação de superioridade ou equivalência ambiental de um produto com relação a seus concorrentes que desempenham a mesma função.

Após a definição do objetivo, vem a definição do escopo. Segundo Guinée (2002), ela consiste de duas etapas: definição dos níveis de cobertura do estudo e definição da unidade funcional e do fluxo de referência. A seguir, esses tópicos são detalhados.

Guinée (2002) explica que a cobertura de uma ACV relaciona-se com a qualidade dos dados a serem obtidos e inclui cinco elementos distintos: cobertura temporal, cobertura geográfica, cobertura tecnológica, cobertura dos processos e cobertura das intervenções ambientais e categorias de impacto.

A cobertura temporal envolve determinar a idade máxima dos dados a serem utilizados e o intervalo de tempo mínimo em que eles serão coletados.

A cobertura geográfica diz respeito ao local de origem dos dados dos processos elementares para estes serem compatíveis com o objetivo do estudo, pois em alguns casos diferenças regionais devem ser consideradas.

A cobertura tecnológica relaciona-se aos tipos de processos que serão utilizados com referência, por exemplo, a melhor tecnologia disponível, a pior tecnologia disponível ou a tecnologia média do setor do estudo.

A cobertura dos processos requer o traçado inicial das fronteiras do sistema do produto. Segundo Guinée (2002), idealmente o sistema deve ser modelado de forma que todas as entradas e saídas em suas fronteiras sejam intervenções ambientais. Entretanto, de acordo com Goedkoop, Schryver & Oele (2008), o sistema do produto tende a ser inter-relacionado de uma maneira complexa de forma que é impossível traçar todas as suas entradas e saídas. Por exemplo, em uma ACV de embalagens, caminhões são utilizados para o transporte. Estes

também são produtos com um ciclo de vida físico. Para produzi-los, aço é necessário, que por sua vez, necessita de carvão, que necessita de caminhões etc.. Fica claro que se faz necessário definir limites ou fronteiras para o sistema. Mas, dependendo das fronteiras e do que é excluído, os resultados podem ser distorcidos. Segundo Goedkoop, Schryver & Oele (2008), os níveis de inclusão são, em ordem crescente:

- Primeira ordem: considerar apenas a produção de materiais e transporte;
- Segunda ordem: considerar todos os processos, exceto os bens de capital;
- Terceira ordem: os bens de capital são incluídos, mas normalmente modelados eles mesmos no modo de primeira ordem, isto é, somente a produção dos materiais necessários para fabricá-los é considerada.

Dependendo do objetivo, é possível limitar alguns estágios do ciclo de vida do produto a montante ou a jusante. Uma situação onde as fronteiras são limitadas é na comparação de produtos alternativos e cujo foco é apenas na avaliação daquelas partes diferentes entre eles. Isto é chamado por Nielsen & Wenzel (2002) de Δ ACV (delta ACV). Por exemplo, se embalagem e transporte são idênticos, estes podem ser desconsiderados em uma análise comparativa. Vigon et al. (1993) chamam a atenção que nestes casos deve-se garantir que os elementos eliminados sejam idênticos em termos de processo, materiais e quantidade.

Finalmente, tem-se a cobertura das intervenções ambientais e categorias de impacto. Pode-se tentar incluir todas as intervenções e categorias de impacto conhecidas ou, no extremo oposto, focalizar em algumas poucas e mais bem consolidadas. O primeiro caso tem a desvantagem de introduzir no estudo intervenções e categorias que não podem ser precisamente medidas ou para as quais não há metodologias práticas de avaliação. Por outro lado, a segunda opção só é justificável em condições e objetivos muito restritos e específicos. O importante é justificar as escolhas e torná-las transparentes.

A segunda etapa na definição do escopo é a definição da unidade funcional e do fluxo de referência. A unidade funcional define a quantidade a ser medida das funções do sistema do produto e deve ser consistente com os objetivos do estudo. Uma de suas utilidades primárias é fornecer uma referência para que os dados de entrada e saída possam ser normalizados. Portanto, a unidade funcional deve ser claramente definida e quantificável. O resultado dessa quantificação é o fluxo de referência. Este é então utilizado para determinar as entradas e saídas do sistema. Guinée (2002) define ambos da seguinte maneira:

- Unidade funcional: quantidade de serviço fornecido pelo sistema do produto em estudo para uso como uma base de referência para a ACV;
- Fluxo de referência: quantidade de fluxo de produto geralmente associada com a fase de uso ou consumo do produto e representando uma maneira específica de se obter a unidade funcional.

Comparações entre sistemas devem ser feitas apenas com base na mesma função, quantificada por meio da unidade funcional na forma de seus fluxos de referência. Por exemplo, ao se comparar sabonete em barra com sabonete líquido, a base de comparação deve ser um serviço equivalente. Como a taxa de uso é diferente, a unidade funcional poderia ser 1.000 lavadas de mãos (VIGON et al., 1993). Já as quantidades de materiais do produto contidas na unidade funcional (fluxo de referência) podem variar entre as alternativas. Suponha que estudos de laboratório tenham determinado que em cada lavagem de mãos sejam utilizados, em média, 5 mm³ de sabonete em barra e 10 mm³ de sabonete líquido. Assim, seriam comparados 5.000 mm³ de sabonete em barras com 10.000 mm³ de sabonete líquido.

Wenzel, Hauschild & Alting (1997) declaram que também é necessário expressar na unidade funcional o tempo de duração da função provida pelo produto. Assim, por exemplo, um refrigerador com vida útil de 13 anos deve ser comparado com 1,3 refrigeradores de vida útil de 10 anos, expressando, dessa forma, os impactos ambientais por 13 anos. Além dos elementos quantitativos, deve-se incluir uma descrição qualitativa do nível de qualidade dos serviços fornecidos.

3.1.2 Análise de Inventário

De acordo com Guinée (2002), esta fase preocupa-se com a coleta dos dados necessários para alcançar os objetivos do estudo e os procedimentos de cálculo. Geralmente é a fase que mais toma tempo e recursos.

O elemento básico do inventário são os processos elementares, já que o sistema do produto foi definido como o conjunto de processos elementares conectados por fluxos intermediários de produtos que desempenham uma ou mais funções e que afetam o ambiente via intervenções ambientais, tais como extração de recursos, emissões de substâncias tóxicas etc..

O termo processo elementar refere-se a qualquer tipo de atividade que produza um resultado com valor econômico. Produtos, serviços ou recursos são transformados em outros produtos, serviços e emissões por meio de processos (elementares) e alimentam outros processos e assim sucessivamente.

Os processos ao longo do ciclo de vida podem ser representados por um diagrama de fluxo. Este é um arranjo sistemático dos principais processos do sistema do produto investigado. Ao se desenhar um diagrama de fluxo, primeiramente são traçadas as fronteiras entre o sistema e o ambiente. A seguir, as características e os dados de cada processo incluído no diagrama devem ser determinados. Alguns processos e suas características estão disponíveis em bancos de dados tornados públicos ou na literatura. Todavia, muitos dados terão de ser coletados “no campo”. A modelagem de processos também pode ser útil e atenção particular deve ser dada à qualidade dos dados.

A seguir, a questão das múltiplas funções deve ser abordada. A produção de cloro, hidróxido de sódio e hidrogênio a partir da eletrólise de sais é um exemplo. Uma vez que quantidades destes compostos são obtidas em proporções fixas e que o sistema do produto normalmente requer apenas um deles, uma etapa de alocação é necessária.

Finalmente, a quantidade de cada função requerida pelo sistema do produto é calculada para cada processo elementar. Todos os produtos e materiais são ponderados multiplicando-se cada processo por um número apropriado. A agregação ao longo de todos os processos gera a tabela do inventário.

As questões tratadas por este breve resumo a respeito da etapa do inventário podem ser agrupadas em três tópicos: compilação do diagrama de fluxo e dos dados dos processos; multifuncionalidade e alocação; e cálculo dos resultados do inventário. Estes tópicos são explicados a seguir.

3.1.2.1 Compilação do Diagrama de Fluxo e dos Dados dos Processos

De acordo com Guinée (2002), em uma ACV, todo e qualquer fluxo deveria ser seguido até que suas entradas e saídas econômicas ou tecnológicas tenham sido transformadas em intervenções ambientais. Intervenções ambientais são fluxos retirados do ambiente que entram no sistema do produto sem terem sido processados ou fluxos saindo do sistema e

descartados no ambiente sem transformações subsequentes, como indica a figura 3.3. As intervenções ambientais são, portanto, fluxos que cruzam a fronteira entre a economia e o ambiente.

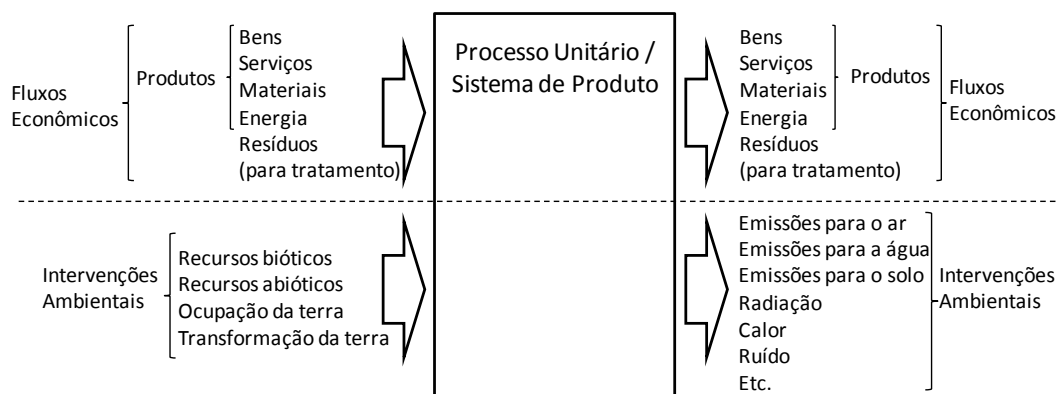


Figura 3.3 – Intervenções Ambientais e Fluxos Econômicos

(Fonte: Guinée, 2002 p. 479)

Sempre que o sistema do produto é estudado, fronteiras são necessárias para separá-lo do resto do mundo. Para Guinée (2002), três tipos de fronteiras podem ser distinguidos em uma Análise de Inventário. As duas primeiras pertencem a esta seção, enquanto a terceira é tratada na seção 3.1.2.2. São elas:

- As fronteiras entre o sistema do produto e o sistema ambiental;
- A fronteira entre os processos relevantes e irrelevantes (critério de corte);
- A fronteira entre o sistema do produto estudado e outros sistemas de produto (alocação).

Normalmente o sistema do produto e suas fronteiras com o sistema ambiental são representados por meio de um diagrama de fluxo. O diagrama de fluxo fornece um esquema de todos os processos elementares mais importantes, incluindo sua inter-relação.

Segundo Guinée (2002), esboçar um diagrama inicial é útil para auxiliar a coleta de dados. Uma vez que só se tornarão aparentes quais fluxos econômicos e processos são relevantes para um estudo em particular após os dados serem coletados, a compilação de um diagrama de fluxo é um exercício iterativo. Inicialmente, o diagrama cobrirá apenas os processos que entregam a unidade funcional e os processos adjacentes que fornecem as matérias primas principais, os principais fluxos de resíduos e suas interconexões. Mesmo após todos os dados terem sido coletados, um diagrama completo é impossível, devido à quantidade de processos elementares, suas relações e a ocorrência de vários ciclos. Na maioria

das vezes, uma solução prática é esboçar apenas os processos principais e ampliá-los, se necessário, em diagramas parciais separados.

De acordo com Guinée (2002), uma vez traçado o sistema do produto e suas fronteiras, o próximo passo consiste de coletar os dados, normalizá-los e relacioná-los com a unidade funcional.

Primeiramente todos os dados relevantes dos processos elementares são coletados, tanto os de entrada, como os de saída. O fluxo de referência é o ponto de partida para a coleta de dados. Tais dados podem ser primários, isto é, diretamente medidos ou calculados, ou secundários, ou seja, vindos da literatura, bancos de dados públicos ou eletrônicos etc..

Após todos os dados terem sido coletados para os processos elementares, eles passam por um processo de normalização. Isto significa colocá-los em quantidades comuns, respectivamente à saída do processo elementar. Assim, por exemplo, todos os processos elementares que geram materiais são expressos por 1 kg de produto; os que geram eletricidade são expressos em 1 kWh, os que geram calor, 1 MJ etc..

A seguir, os dados são relacionados com o fluxo de referência. Assim, se os dados do subsistema X estão normalizados em função de 1 kg de produto X e para a fabricação do produto principal são necessário 5 kg de X, todos os dados do subsistema X (materiais, energia, emissões) são multiplicados por 5.

De acordo com Suh & Huppés (2005), caso quatro condições sejam atendidas, os cálculos acima seriam suficientes para compilar os resultados do inventário (seção 3.1.2.3 a seguir). Tais condições raramente acontecem simultaneamente na prática. São elas:

- Cada processo elementar produz um único material ou energia;
- Cada processo de tratamento de resíduos recebe apenas um tipo de resíduo;
- O sistema do produto fornece entradas para, ou recebe saídas de apenas outro sistema;
- Fluxos de materiais e energia entre processos não tem laços (*loops*).

Estas quatro condições relacionam-se com a questão da multifuncionalidade e alocação (tratadas na seção 3.1.2.2) e a última adicionalmente com os cálculos dos resultados do inventário (tratados na seção 3.1.2.3).

Finalmente, após o traçado do sistema do produto e suas fronteiras e a coleta dos dados, sua normalização e seu relacionamento com a unidade funcional, o último passo da etapa de “Compilação do Diagrama de Fluxo e dos Dados dos Processos” é o traçado da

fronteira entre os processos relevantes e irrelevantes, denominado de critério de corte (GUINÉE, 2002).

Segundo Guinée (2002), em princípio, uma ACV deveria rastrear todos os processos do sistema do produto ao longo de seu ciclo de vida, do “berço ao túmulo”. Na prática, isto é impossível e um número de fluxos deve ser estimado ou ignorado. A raiz do problema é a falta de dados prontamente acessíveis, implicando um esforço desproporcional na coleta de dados, muitas vezes irrelevantes. Entretanto, há um paradoxo nesta situação: só se sabe que um dado é irrelevante depois deste ter sido coletado (WENZEL, HAUSCHILD & ALTING, 1997). Mas se o dado já foi coletado, não faz sentido não considerá-lo depois de todo o esforço despendido (GUINÉE, 2002). Assim, o problema do critério de corte é segundo Guinée (2002): ter que quantitativamente estimar intervenções ambientais associadas a fluxos para os quais não há dados prontamente disponíveis.

De acordo com Vigon et al. (1993), de um ponto de vista prático, pode-se adotar duas medidas. A primeira consiste em ignorar aqueles processos que contribuam em termos de massa com menos de certa porcentagem (por exemplo, 1%) do fluxo total do sistema do produto. A segunda opção é colocar um limite para o número de passos que o processo esteja removido do fluxo principal. Por exemplo, na produção de sabão em barra, a produção de soda cáustica a partir de eletrólise de sais é parte da sequência do processo principal e deve claramente ser incluída. Carbonato de sódio é uma matéria prima para a produção de soda cáustica e, portanto, uma entrada secundária no processo principal de fabricação do sabão em barras. Cloreto de amônia é uma entrada do processo de produção do carbonato de sódio. Relativo ao processo principal, o cloreto de amônia é uma entrada terciária. Utilizando o critério de corte de “um passo para trás”, o cloreto de amônia seria excluído.

3.1.2.2 Multifuncionalidade e Alocação

De acordo com Guinée (2002), muitas vezes os processos são multifuncionais. Suas saídas geralmente incluem mais do que um único produto e as suas entradas frequentemente contém produtos intermediários. Os processos também são dinamicamente unidos com outros processos. Na prática surge o problema que o sistema do produto provê

mais funções do que aquela sendo estudada na unidade funcional de interesse. Torna-se necessário, então, decidir como os fluxos econômicos e as intervenções ambientais serão alocados ao sistema estudado. Um procedimento de alocação é necessário para repartir as entradas e saídas de todos os processos relevantes para os sistemas de produtos apropriados.

Segundo Heijungs (1992a), existem quatro tipos de processos múltiplos onde a questão da alocação pode ser relevante:

- Caso a: coprodução de múltiplos produtos;
- Caso b: processamento conjunto de resíduos;
- Caso c: produção de material reciclado;
- Caso d: uso de material reciclado.

De acordo com Boguski et al. (1996), a alocação de coprodutos (caso a) é a partição das entradas e saídas dos processos aos coprodutos fabricados, sendo normalmente feita em função de suas massas. Outros métodos possíveis são estequiometria, calor de reação etc.. A tarefa da alocação é determinar uma medida uniforme de forma que seja possível dividir as trocas conjuntas. Primeiramente deve-se tentar utilizar um critério técnico. Caso isso não seja possível, um critério econômico (WENZEL, HAUSCHILD & ALTING, 1997).

Conforme Heijungs (1992b), para o caso b, processamento conjunto de resíduos, os critérios são semelhantes ao do caso a. Em muitas situações a composição química dos resíduos fornece uma indicação de quais fluxos devem ou não ser alocados.

O último caso a ser tratado é o do reuso e da reciclagem (caso c e d, respectivamente). Segundo Vigon et al. (1993), o reuso e reciclagem diminuem a quantidade de resíduos sólidos enviado para aterros e reduzem a necessidade de matérias primas e materiais virgens. Logo, há a necessidade de se ajustar a quantidade de materiais e emissões para produtos que podem ser reusados e reciclados. De acordo com Heijungs (1992b) e Vigon et al. (1993), há duas situações distintas: a reciclagem de ciclo aberto e a de ciclo fechado.

Segundo Vigon et al. (1993), a reciclagem de ciclo fechado ocorre quando um produto pode ser reciclado repetidamente, teoricamente um número infinito de vezes. Latas de alumínio são um exemplo. Na reciclagem de ciclo aberto, um produto feito de material virgem é reciclado em outro produto que não é adicionalmente reciclado, mas descartado. Um exemplo é o de garrafas plásticas recicladas em vasos para plantas

Segundo Vigon et al. (1993), na reciclagem de ciclo aberto, a energia e as emissões ambientais relativas à produção, reciclagem e disposição final são divididas entre os

produtos por meio de diversos métodos. Dessa forma, cada um dos produtos dividem a energia, as emissões e as economias geradas pela reciclagem.

3.1.2.3 Cálculo dos Resultados do Inventário

Segundo Guinée (2002), a coleta de dados dos processos elementares gera um banco de dados dos processos. O ato de quantitativamente relacionar estes processos uns com os outros, ponderados pelos fluxos de referência, é denominado método de cálculo. O resultado é um conjunto de processos relacionados e ponderados, cada um com suas intervenções ambientais ponderadas, que são usualmente agregadas.

De acordo com Suh & Huppes (2005), os cálculos dos resultados do inventário podem ser compilados de duas formas. A primeira é diretamente do diagrama de fluxo do processo. Este método é simples de ser aplicado desde que as quatro condições descritas na seção 3.1.2.1 ocorrerem. A figura 3.4 ilustra este método.

No sistema de produto da figura 3.4, uma unidade de uma torradeira é produzida utilizando-se 1 kg de aço e 0,5 MJ de vapor. Esta torradeira é utilizada 1000 vezes e descartada. A produção de 1 kg de aço, de 0,5 MJ de vapor e de 1 torradeira geram, respectivamente, 1 kg, 2 kg e 2 kg de dióxido de carbono (CO₂). Torrar uma unidade de pão e o descarte de uma torradeira emitem, nesta ordem, 0,001 e 0,5 kg de CO₂. Suponha que a torradeira produza ao longo de sua vida útil 1000 torradas e que a unidade funcional seja “1000 pedaços de torradas”. Assim, para se determinar as intervenções ambientais, tem-se:

$$1 \times 1 + 4 \times 0,5 + 2 \times 1 + 0,001 \times 1000 + 0,5 \times 1 = 6,5 \text{ kg CO}_2$$

Na prática, a situação é mais complexa devido aos problemas de multifuncionalidade ou o uso indireto pelo sistema do produto de suas próprias saídas. Para resolver este problema pode-se utilizar um procedimento iterativo ou a fórmula da soma infinita de uma progressão geométrica. Há, também, o procedimento introduzido por Heijungs (1994) que utiliza álgebra matricial, chamado de método da inversão de matriz e que é computacionalmente mais eficiente.

Após os cálculos, o resultado final da etapa de Análise de Inventário e que será utilizado como entrada da próxima etapa da ACV, a Avaliação de Impacto, é a tabela do inventário.

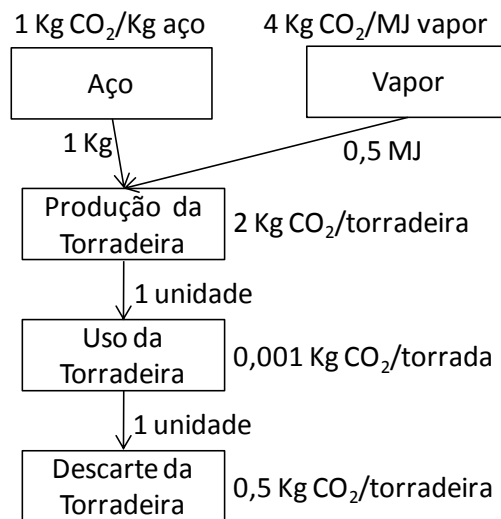


Figura 3.4 – Diagrama de Fluxo para um Sistema de Produto Simplificado
(Fonte: Suh & Hupples, 2005 p.688)

3.1.3 Avaliação de Impacto

Segundo Guinée (2002), a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a etapa na qual o resultado da Análise de Inventário, principalmente a tabela de inventário, é adicionalmente processado e interpretado em termos dos impactos ambientais. Pennington et al. (2004) explicam que esta etapa consiste de elementos obrigatórios e opcionais. São eles:

- Seleção das categorias de impacto de interesse, os indicadores para cada categoria de impacto e os modelos subjacentes;
- Atribuição dos dados do inventário para as categorias de impacto escolhidas. Esta etapa é denominada Classificação;
- Cálculo dos indicadores das categorias de impacto utilizando os fatores de caracterização. Esta etapa é denominada Caracterização;
- Cálculo dos resultados dos indicadores das categorias relativos a valores de referência. Esta etapa é denominada Normalização e é opcional;
- Agrupamento e Ponderação dos resultados. Estas etapas são opcionais e a ponderação não é permitida pelas normas ISO em declarações comparativas tornadas públicas;
- Análise da Qualidade dos Dados. Esta etapa é obrigatória em declarações comparativas tornadas públicas.

3.1.3.1 Seleção das Categorias de Impacto

Segundo Guinée (2002), na Avaliação de Impacto, os resultados do inventário são traduzidos em contribuições para categorias de impacto, tais como depleção de recursos abióticos, mudança climática, acidificação etc.. Para este fim, categorias de impacto relevantes devem ser identificadas. Cada tipo de estudo deve definir as categorias de impacto mais adequadas. Um aspecto chave para a definição dos métodos de avaliação de impacto é o ponto do mecanismo ambiental no qual os indicadores das categorias são definidos. De acordo com Jolliet et al. (2004), há duas escolas de pensamento:

- Métodos clássicos de avaliação de impacto, também chamados de categorias de pontos centrais, ou modelos orientados ao mecanismo. O efeito final não é incluído no modelo. Os mecanismos dos efeitos de uma substância de referência são comparados com os efeitos de outras substâncias sob as mesmas condições;
- Métodos orientados ao dano, ou categorias de pontos finais. Tentam modelar a cadeia de causa e efeito até os danos ao ambiente, à saúde humana e aos recursos naturais.

Muito embora seja interessante em uma avaliação de impacto determinar os danos causados pelos dados do inventário, há um motivo que justifica, pelo menos atualmente, o uso dos métodos clássicos de avaliação de impacto. Devido à falta de conhecimento científico, a ligação das categorias de pontos centrais aos danos não é totalmente conhecida e modelada, levando a grandes incertezas e falta de concordância entre os pesquisadores. Isto é demonstrado pelas setas pontilhadas na figura 3.5.

3.1.3.2 Seleção do Método de Caracterização

Segundo Guinée (2002), as intervenções registradas na tabela do inventário são quantificadas em termos de um indicador comum para a categoria de impacto. Para este fim, modelos de caracterização são utilizados, a partir dos quais fatores de caracterização (ou de equivalência) são derivados para os poluentes. Para cada categoria de impacto, um método de caracterização inclui um indicador para a categoria, um modelo de caracterização e fatores de

caracterização derivados do modelo. Para exemplificar como funciona este sistema, será utilizada a categoria de impacto aquecimento global.

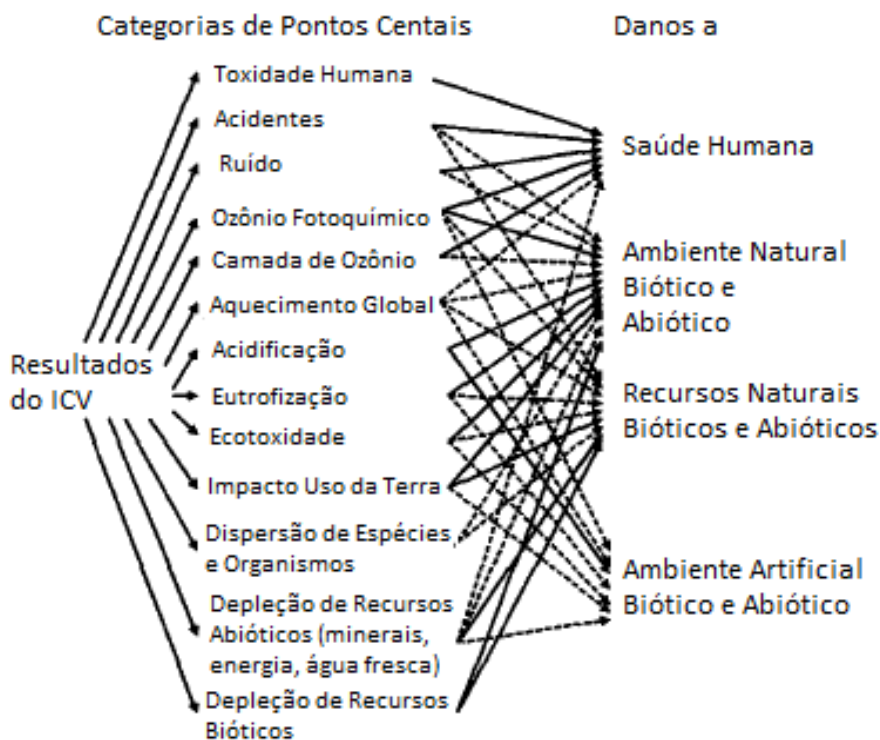


Figura 3.5 – Categorias de Pontos Centrais e Categorias de Danos
(Fonte: Jolliet et al., 2004 p. 395)

De acordo com Hauschild & Wenzel (1998), a contribuição potencial para o aquecimento global é computada por meio de um procedimento que expressa as características da substância relativamente as de outros gases. O Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) desenvolveu um sistema de fator de equivalência que pode ponderar as várias substâncias de acordo com sua eficiência como gás estufa. O sistema aloca às várias substâncias um Potencial de Aquecimento Global (GWP – *Global Warming Potential*), que é calculado como a contribuição esperada para o aquecimento ao longo de um período de tempo escolhido para uma dada quantidade da substância dividida pela contribuição ao aquecimento para uma quantidade correspondente de CO₂. Multiplicando-se a massa da emissão pelo seu respectivo GWP tem-se a magnitude da emissão de CO₂ que, sob as condições escolhidas, resultaria na mesma contribuição para o aquecimento global, ou seja, a emissão do gás estufa expressa em CO₂-equivalente. O CO₂ foi escolhido como referência por ser a substância que mais contribui para o problema do aquecimento global, devido à grande quantidade de sua emissão na atmosfera. O período de tempo normalmente utilizado é

o de 100 anos (Método EDIP, Hauschild & Wenzel, 1998) ou 500 anos (Método Impact 2002+, Jolliet et al. 2003), como indica o quadro 3.1. Como se pode notar neste quadro, por exemplo, um grama de metano, é equivalente ou tem o mesmo efeito cumulativo que 25 gramas de dióxido de carbono durante o período de 100 anos.

Quadro 3.1 – Fatores de Equivalência de Algumas Substâncias para o Aquecimento Global para Escalas de Tempo de 20, 100 e 500 anos

Substância	Fórmula	GWP		
		20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de carbono	CO ₂	1	1	1
Metano	CH ₄	62	25	8
Óxido de Nitrogênio	N ₂ O	290	320	180
CFC 11	CFCl ₃	5000	4000	1400

(Fonte: Wenzel, Hauschild & Alting, 1997 p. 247)

3.1.3.3 Classificação

Segundo Guinée (2002), nesta etapa as intervenções qualificadas e quantificadas do inventário são alocadas às categorias de impacto previamente selecionadas em uma base puramente qualitativa. Por exemplo, emissões de CO₂ de origem fóssil são alocadas à categoria de aquecimento global e assim sucessivamente. Basicamente há duas situações: substâncias que se encaixam apenas em uma categoria e substâncias que se relacionam com mais de uma categoria de impacto. A segunda situação pode ser adicionalmente desagregada em três casos:

- Emissões com impactos paralelos, isto é, substâncias que podem teoricamente contribuir com mais de uma categoria, mas que na prática contribuem com apenas uma. Exemplo: SO₂ pode ter efeito tóxico ou acidificante;
- Emissões com efeitos em série, ou seja, aquelas que podem ter sucessivos impactos. Exemplo: metais pesados podem primeiramente ter um impacto ecotoxicológico e subsequentemente, via cadeia alimentar, impacto tóxico em pessoas;
- Emissões com efeitos indiretos, isto é, emissões tendo um impacto primário que por sua vez gera um ou mais efeitos secundários. Exemplo: intoxicação por alumínio induzida pela acidificação.

Preferencialmente, as emissões com esses três tipos de efeitos deveriam ser alocadas aos problemas na proporção de sua contribuição real. Como isso ainda não é completamente conhecido, em geral as emissões são alocadas inteiramente a todas as categorias de impacto relevantes (GUINÉE, 2002; HEIJUNGS, 1992b). Por exemplo, no caso de uma emissão de 2 kg de SO₂, a contribuição para ambas as categorias, acidificação e toxicidade humana, seria calculada utilizando-se os 2 kg integralmente. Isto leva a uma “dupla contagem”, mas o erro incorrido é desprezível segundo Heijungs (1992b).

3.1.3.4 Caracterização

Guinée (2002) explica que na etapa de caracterização, as intervenções alocadas qualitativamente às categorias particulares de impacto na classificação são quantificadas em termos da unidade comum daquela categoria, permitindo a agregação em um único escore por categoria: o resultado do indicador. Basicamente, deve-se multiplicar a quantidade da emissão por seu fator de caracterização e somar os resultados por categoria de impacto, como indica a equação 3.1.

$$\text{Indicador} = \sum_i m_i \times FE(i) \quad (3.1)$$

Onde “*m*” indica a massa e “*FE*” o fator de equivalência ou caracterização.

Dessa forma, para a categoria de impacto aquecimento global, por exemplo, o indicador é o potencial de aquecimento global (GWP) expresso em kg-equivalentes de CO₂ e os fatores de caracterização são aqueles dados no quadro 3.1. Logo, a equação 3.1 se transformaria na equação 3.2.

$$GWP = \sum_i m_i \times GWP(i) \quad (3.2)$$

Onde “*GWP*” representa o potencial de aquecimento global total de todas as substâncias do inventário que contribuem para este problema e “*GWP(i)*” representa o fator de equivalência de cada substância “*i*” com relação ao CO₂. Este procedimento é executado para

todas as demais categorias de impacto discutidas anteriormente (depleção da camada de ozônio, formação de ozônio fotoquímico etc.).

3.1.3.5 Normalização

De acordo com Heijungs (1992a), é difícil interpretar os indicadores ambientais da etapa de caracterização, uma vez que suas unidades são diferentes. Para Pennington et al. (2004), normalmente há o interesse de se comparar as categorias de impacto entre si. Isto é conseguido por meio da normalização das categorias de impactos ambientais.

Pennington et al. (2004) explica que o objetivo da etapa de normalização é duplo: posicionar os indicadores em um contexto mais amplo e ajustar os resultados de forma a possuírem uma dimensão comum. Hauschild & Wenzel (1998) citam que a normalização, além de fornecer uma impressão das magnitudes relativas os impactos ambientais, também prepara os dados para a etapa posterior de ponderação.

A equação utilizada nesta etapa é, de acordo com Pennington et al. (2004):

$$N_k = S_k / R_k \quad (3.3)$$

Onde “ k ” representa a categoria de impacto, “ N ” o indicador normalizado, “ S ” o indicador da categoria da fase de caracterização e “ R ” o valor de referência. Da equação 3.3 é possível notar que a principal escolha a ser feita é com relação valor de referência.

Segundo Heijungs (1992a), a contribuição do sistema do produto para um efeito ambiental é ligada à contribuição feita por certa comunidade para o mesmo problema ao longo de um período de tempo definido. A escala da comunidade considerada deve ser compatível com o modelo no qual a classificação foi baseada. Para Hauschild & Wenzel (1998), há três categorias de sistemas de referência para a normalização e posterior ponderação:

- Os valores de referência são fixados em função de metas políticas de redução de certa categoria de impacto;
- Os valores de referência são baseados nos níveis de emissão atuais;

- Os valores de referência são determinados em função da capacidade máxima do ambiente em absorver, sem sofrer danos, aquele tipo de emissão.

3.1.3.6 Agrupamento e Ponderação

De acordo Guinée (2002), na etapa de agrupamento as categorias de impacto são agregadas em um ou mais conjuntos. É um elemento opcional da ACV para o qual dois procedimentos estão disponíveis: combinação e ordenação:

- Combinação dos indicadores das categorias em uma base nominal, isto é, por meio das características comuns tais como emissões e uso de recursos ou impactos globais e locais;
- Ordenação dos indicadores em uma escala ordinal tais como alto médio e baixo.

Por fim, a última etapa da fase de Avaliação de Impactos (AICV) é a ponderação. Segundo Pennington et al. (2004), ela se refere à utilização de fatores numéricos baseados em escolhas de valor de forma a facilitar a comparação entre os indicadores das categorias de impacto (normalizados ou não). Matematicamente:

$$EI = \sum V_k \times N_k \quad \text{ou} \quad EI = \sum V_k \times S_k \quad (3.4)$$

Onde “ EI ” é o indicador de impacto ambiental total, “ V_k ” é o peso da categoria de impacto k , “ N ” é o indicador normalizado e “ S ” o indicador da fase de caracterização (não normalizado, uma vez que, assim como a ponderação, a normalização é opcional).

De acordo com Pennington et al. (2004), a ponderação é umas das etapas mais controversas da ACV, principalmente porque envolve escolhas de valor social, político e ético. Os métodos de ponderação podem ser agrupados de três formas:

- Métodos para serem utilizados com categorias de pontos centrais ou finais;
- Maneiras de se obter os pesos
 - Monetização: baseia-se em determinar quanto, em termos financeiros, a sociedade está disposta a pagar para evitar o problema;
 - Painel: baseia-se na opinião de especialistas;

- Distância até o alvo: baseia-se na quantidade que falta para se alcançar as metas de redução traçadas; quanto mais longe do alvo ou mais ambiciosas as metas, maior o peso da categoria;
- Maneiras de se obter a informação necessária para se obter os pesos: preferência expressa ou preferência revelada.

3.1.4 Interpretação

A Interpretação de Ciclo de Vida é a fase na qual os resultados da análise e todas as escolhas tomadas e suposições feitas durante o estudo são avaliadas em termos de fundamento e robustez, e as conclusões gerais são extraídas. Os elementos principais da etapa de Interpretação são a avaliação dos resultados (em termos de consistência e abrangência), a análise dos resultados (em termos de robustez) e a formulação das conclusões e recomendações do estudo de acordo com os seus objetivos. Especificamente, esta etapa tem as seguintes fases: verificação de consistência; verificação de abrangência; análise de contribuição; análise de perturbação; análise de sensibilidade e incerteza; e conclusões e recomendações. A seguir, cada uma dessas fases é explicada. O conteúdo desta seção foi baseado em Guinée (2002).

O objetivo da verificação de consistência é determinar se as suposições, métodos, modelos e dados são consistentes com os objetivos e escopo do estudo. Todas as análises subsequentes são inúteis e em vão se as suposições e modelos são inconsistentes com os objetivos, o escopo e com as opções tomadas. Ao se comparar dois ou mais sistemas de produtos, os seguintes tipos de inconsistências podem ocorrer: diferenças nas fontes dos dados, diferenças na precisão dos dados, diferenças na cobertura tecnológica, diferenças na cobertura temporal, diferenças na idade dos dados, diferenças na cobertura geográfica.

A verificação de abrangência visa assegurar que toda a informação relevante e dados necessários para a etapa de Interpretação estão disponíveis e são completos. Uma maneira de localizar dados errados ou incompletos é pedir para que um *expert* examine os resultados e maneira pela qual eles foram gerados. Outra forma é comparar o estudo com outros similares. As seguintes perguntas podem ser úteis nesta fase: o diagrama de fluxo do processo está correto?; há algum processo faltando?; há entradas e saídas econômicas

faltando?; há emissões e extrações faltando?; a magnitude das emissões está correta?; os balanços de massa e energia somam zero?.

Na análise de contribuição, calcula-se a contribuição relativa dos vários fatores. Esta contribuição é usualmente expressa em porcentagens do total. A análise de contribuição responde perguntas a respeito da contribuição específica dos fluxos ambientais, processos ou impactos de uma dada pontuação ambiental.

A análise de perturbação envolve o estudo dos efeitos de pequenas mudanças dentro do sistema ou nos resultados da ACV. Os efeitos destas pequenas perturbações são calculados simultaneamente para todos os fluxos internos ao sistema, incluindo os econômicos. A análise é conduzida em diferentes níveis de agregação: tabela do inventário, resultados dos indicadores, resultados normalizados dos indicadores ou resultados da ponderação. A principal diferença entre a análise de contribuição e a de perturbação reside no fato que aquela leva em consideração não apenas os fluxos ambientais, mas também os econômicos entre os processos elementares. Isto é relevante, pois efeitos multiplicadores podem surgir a partir de ciclos internos.

As análises de sensibilidade e de incerteza visam avaliar a influência de variações nos dados dos processos, modelos e outras variáveis sobre o resultado. Na análise de sensibilidade, mudanças são deliberadamente introduzidas de forma a se determinar a robustez dos resultados relativamente a essas mudanças. A análise de incerteza se utiliza de dados empíricos na amplitude das incertezas de dados específicos para calcular a amplitude dos resultados finais.

Na última fase da etapa de Interpretação, conclusões são extraídas e recomendações são feitas baseadas nas informações recolhidas nas etapas prévias da ACV combinadas com os resultados das fases anteriores da etapa de Interpretação. Por uma questão de transparência, é aconselhável separar análise de opinião.

Os resultados da etapa de Interpretação são duplos. Inicialmente todos os resultados passam por formas de análise de consistência e incerteza, conduzindo a um número de julgamentos relativos à qualidade e robustez dos achados das etapas da Análise de Inventário e da Avaliação de Impacto. Em segundo lugar, há a descrição das conclusões e recomendações finais, tais como a escolha de uma alternativa ou a melhoria de um produto.

Aqui terminam as explicações relativas aos elementos que compõem uma ACV completa. Na próxima seção são apresentados métodos denominados de ACV Alternativas.

3.2 Avaliações de Ciclo de Vida Alternativas

Na revisão bibliográfica empreendida, foram encontrados diversos tipos de métodos que se baseiam na ACV e propõem alterações a esta, de forma a permitir seu uso em situações nas quais há restrições de tempo, informações etc.. Tais métodos são extremamente variados, possuindo níveis diversos de sofisticação, desde *checklists* qualitativos até métodos semiquantitativos ou quantitativos. Este conjunto de métodos é denominado de Avaliações de Ciclo de Vida Alternativas. De acordo com a visão do autor do presente trabalho, tais métodos podem ser divididos nos seguintes grupos, segundo o tipo de modificação metodológica proposta à ACV:

- Avaliação de ciclo de vida simplificada (qualitativa e semiquantitativa);
- Avaliação de ciclo de vida baseada em modelos econômicos;
- Avaliação de ciclo de vida baseada em redes neurais artificiais;
- Avaliação de ciclo de vida baseada em lógica difusa;
- Avaliação de ciclo de vida baseada em decisão multicriterial.

3.2.1 Avaliação de Ciclo de Vida Simplificada

Há uma grande quantidade destes tipos de métodos. Aqui não se pretende esgotar o assunto nem empreender uma revisão a respeito do estado da arte do tema. Os métodos aqui apresentados foram os que se sobressaíram na literatura consultada. São eles: a Matriz MECO, a Matriz ERPA, a IS-LCA, a ACV abreviada.

De acordo com Wenzel, Hauschild & Alting (1997), a matriz MECO é utilizada para estruturar o trabalho de uma ACV e para sistematizar e simplificar seus resultados. Ela consiste em se dividir a avaliação em quatro áreas, de acordo com as causas subjacentes dos impactos ambientais dos produtos. Estas áreas, cujas iniciais dão o nome à ferramenta, são Materiais (*materials*), Energia (*energy*), Substâncias Químicas (*chemicals*) e Outros (*others*). As informações do produto são estruturadas em uma matriz, como indica o quadro 3.2.

Quadro 3.2 – A Matriz MECO

	Matérias Primas	Manufatura	Uso	Descarte	Transporte
1. Materiais a) quantidade b) recursos					
2. Energia a) primária b) recursos					
3. Químicos					
4. Outros					

(Fonte: Hochschorner & Finnveden, 2003 p.121)

Segundo Hochschorner & Finnveden (2003), uma estimativa do impacto ambiental de cada fase do ciclo de vida é realizada através de estimativas das quantidades de materiais, energia, químicos e outros materiais utilizados na produção e uso do produto.

A categoria “Material” inclui todos os materiais necessários para a produção, uso e manutenção do produto. Materiais que são reutilizados na fase de descarte entram na coluna “Descarte” com sinal negativo. O uso de materiais é apresentado como quantidade e recursos.

Da mesma forma, a categoria “Energia” inclui toda a energia utilizada durante o ciclo de vida do produto, incluindo o uso de energia para a extração das matérias primas. O uso de energia deve ser indicado como energia primária e uso de petróleo.

De forma a se comparar os produtos, o uso de materiais e energia é calculado como consumo de recursos em pessoas×reservas, que significa o consumo proporcional às reservas mundiais de um recurso disponível para uma pessoa agora e no futuro.

A categoria “Químicos” considera todos os produtos químicos utilizados durante o ciclo de vida do produto. As substâncias químicas são classificadas como tipo 1, 2 e 3, de acordo com seu nível de risco. Tipo 1 refere-se a substâncias extremamente problemáticas, tipo 2 a substâncias problemáticas e tipo 3 a substâncias menos problemáticas, seguindo as diretivas da União Europeia e da Dinamarca.

Os aspectos ambientais que não se encaixam em nenhuma das categorias anteriores devem ser incluídos na categoria “Outros”. Todos os fluxos de entrada e de saída devem ser considerados para uma categoria em relação a um tempo base de acordo com a unidade funcional do produto e a fase do ciclo de vida escolhida.

A Matriz ERPA (*environment responsible product assessment*) foi proposta por Graedel & Allenby (1998, 2003) e é um método semiquantitativo que foi utilizado pelos

autores em uma série de estudos de caso em equipamentos elétricos e eletrônicos na empresa AT&T. A característica central da avaliação é uma matriz de ordem 5, onde as linhas representam a fase do ciclo de vida e as colunas as preocupações ambientais, como indica o quadro 3.3.

Quadro 3.3 – A Matriz ERPA

	Escolha de Materiais	Uso de Energia	Resíduos Sólidos	Resíduos Líquidos	Resíduos Gasosos
Pré-manufatura	(1,1) ²	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(1,5)
Manufatura	(2,1)	(2,2)	(2,3)	(2,4)	(2,5)
Entrega	(3,1)	(3,2)	(3,3)	(3,4)	(3,5)
Uso	(4,1)	(4,2)	(4,3)	(4,4)	(4,5)
Descarte	(5,1)	(5,2)	(5,3)	(5,4)	(5,5)

(Fonte: Graedel & Allenby, 2003 p. 217)

Para cada elemento da matriz é designado um número inteiro de 0 (maior impacto) a 4 (menor impacto) baseado em um *checklist* fornecido juntamente com a ferramenta (ver Anexo 1). A responsabilidade ambiental total de um produto (R_{erp}) é calculada como a soma dos elementos da matriz (a_{ij}), ou seja:

$$R_{erp} = \sum_i \sum_j a_{ij} \quad (3.5)$$

A adição implica que a nota máxima é 100 para o produto ideal e que todas as células da matriz possuem o mesmo peso. De acordo com Hochschorner & Finnveden (2003), posteriormente Graedel desenvolveu um método de ponderação baseado no consenso. Hur et al. (2005), em um estudo de caso com a Matriz ERPA, utilizaram o AHP (explicado no capítulo 4) para determinar os pesos dos estágios do ciclo de vida e o método Delphi para ponderar as áreas de preocupação ambiental da matriz.

A IS-LCA (*iterative screening life cycle assessment*) foi proposta originalmente por Fleischer & Schmidt (1997) e refinada posteriormente por Fleischer et al. (2001). Neste método, utilizado como ferramenta de Ecodesign, as escolhas vão sendo reduzidas por um processo iterativo cada vez mais complexo.

Na primeira iteração, os pontos críticos ambientais são determinados por meio de uma avaliação qualitativa baseada no sistema ABC, onde A significa a presença de

² As entradas numéricas são apenas os índices dos elementos da matriz

emissões tóxicas, carcinogênicas ou mutagênicas, B significa a emissão de substâncias tóxicas, alergênicas ou ácidas, e C emissões sem maiores importâncias.

Na segunda iteração, semiquantitativa, são utilizados dois indicadores. O primeiro é o uso de energia, por meio de um indicador denominado Demanda Cumulativa de Energia (CED – *cumulative energy demand*), pois o consumo de energia tem grandes impactos no potencial de aquecimento global, na depleção de recursos e no potencial de acidificação. O segundo indicador cobre as categorias de impacto potencial acidificação, eutrofização, formação de ozônio fotoquímico e aquecimento global, mas seu principal objetivo é avaliar a toxicidade humana e ecotoxicidade. Ele é baseado em um sistema de classificação ABC/XYZ, onde ABC indica a qualidade da emissão e XYZ sua quantidade (X=grande, Z=pequena). Quanto mais séria a emissão, menor a quantidade necessária para ela obter nota X.

Para cada meio (água, ar, solo), uma categorização da emissão é feita com base em dados ou julgamento de especialistas. No próximo passo, a nota mais séria para cada meio e para cada processo é determinada. No esquema proposto, o grau de severidade é, em ordem decrescente: $AX > AY = BX > AZ = BY > BZ > CX = CY = CZ$. Cada processo, então, é caracterizado pela maior nota ABC/XYZ para cada meio. As notas são agregadas ao longo do ciclo de vida utilizando-se fatores de massa qualitativos (proporção entre entradas e saídas de cada processo necessárias para satisfazer a unidade funcional). As notas obtidas para os três meios são agregadas utilizando-se um sistema de pesos, como indicado no quadro 3.4. O meio ar recebe o maior peso porque emissões neste meio acabam se depositando nos outros meios mais tarde. Este resultado agregado forma um índice de emissões não relacionadas à energia. Juntamente com o CED, esta nota serve para comparar diferentes materiais na segunda iteração da IS-LCA.

Quadro 3.4 – Matriz de Agregação para as Notas ABC/XYZ

	Emissões Ar			Emissões Água e Solo		
	X	Y	Z	X	Y	Z
A	3	1	1/3	1	1/3	1/9
B	1	1/3	1/9	1/3	1/9	0
C	0	0	0	0	0	0

(Fonte: Fleischer et al., 2001 p. 151)

Na terceira iteração, que é parcialmente quantitativa, todos os dados das categorias de impacto (aquecimento global, eutrofização etc.) são levados em conta e na quarta e última iteração, faz-se uma ACV quantitativa completa.

Denomina-se ACV abreviada o tipo de avaliação no qual etapas do ciclo de vida do produto são totalmente excluídas ou substituídas por dados genéricos que não foram coletados para o estudo em particular. Hur et al. (2005) foram os autores que empreenderam um dos maiores esforços para medir seu grau de precisão.

O procedimento metodológico foi o seguinte. As etapas do ciclo de vida consideradas foram pré-manufatura, manufatura, distribuição/uso e fim de vida. A etapa pré-manufatura foi adicionalmente dividida em aquisição de matérias-primas, fabricação de subcomponentes e fabricação de componentes. A etapa de fim de vida foi dividida em reciclagem de componentes e descarte de materiais.

Os autores executaram uma ACV completa que coletou dados primários para as todas as fases exceto aquisição de matérias primas, fabricação de subcomponentes e descarte. Esta ACV serviu como referência para se comparar o desempenho das demais. Deve-se realçar que não existe nenhuma ACV onde se coleta dados primários para todos os processos elementares.

Os autores excluíram e simplificaram uma ou mais etapas simultaneamente, gerando 11 combinações diferentes. Por exemplo, a combinação mais abreviada de todas utilizou dados primários apenas para a etapa de manufatura, dados secundários para aquisição de matérias primas e descarte e excluiu todas as demais. A combinação menos abreviada excluiu apenas a fabricação de subcomponentes, utilizou dados secundários para a aquisição de matérias primas e descarte e utilizou dados primários para todas as demais.

Por fim, foram comparadas estas 11 combinações com a referência. Houve duas combinações que foram capazes de reproduzir os resultados da referência com alto grau de concordância. Chegou-se a conclusão que a ACV abreviada é uma alternativa viável à ACV completa.

3.2.2 Avaliação de Ciclo de Vida baseada em Modelos Econômicos

A ACV baseada em modelos econômicos, também chamada de EIOLCA (*environmental input-output life cycle assessment*), utiliza a ideia da matriz insumo-produto de Leontief, complementada por matrizes de uso de recursos, energia e emissões das atividades da economia do país (HENDRICKSON et al., 1997; HENDRICKSON, LAVE &

MATTHEWS, 2006; MATTHEWS & SMALL, 2001). O produto a ser avaliado é aproximado por seu setor econômico correspondente (JOSHI, 2000).

Segundo Hendickson, Lave & Mathews (2005), a análise de insumo-produto divide a economia inteira de uma nação em setores distintos, visualizados em uma matriz onde cada linha e coluna os representam. O quadro 3.5 ilustra a estrutura de uma matriz insumo-produto.

Quadro 3.5 – Exemplo da Estrutura de uma Matriz Insumo-Produto

Produtos dos Setores (<i>i</i>)	Insumos para os Setores (<i>j</i>)				Produto Intermediário	Demanda Final	Produto Final
	1	2	3	<i>n</i>			
1	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{1n}	O_1	Y_1	X_1
2	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{2n}	O_2	Y_2	X_2
3	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{3n}	O_3	Y_3	X_3
<i>n</i>	X_{n1}	X_{n2}	X_{n3}	X_{nn}	O_n	Y_n	X_n
Insumo Intermediário	I_1	I_2	I_3	I_n	Produto Interno Bruto (PIB)		
Valor Agregado	V_1	V_2	V_3	V_n			
Insumo Total	X_1	X_2	X_3	X_n			

(Fonte: Hendickson, Lave & Mathews, 2005 p. 14)

De acordo com Hendickson, Lave & Mathews (2005), cada elemento X_{ij} representa o insumo para o setor *j* originário do setor *i* no processo de produção. O produto total de cada setor X_i é a soma ao longo das linhas de insumo dos outros setores (ou o produto intermediário O_i) mais o produto fornecido para o consumo dos clientes finais. O Produto Interno Bruto é a soma de todas as demandas finais. A soma das colunas representa a quantidade total de insumos para cada setor vindo dos outros setores.

Para efetuar cálculos, é preferível dividir cada elemento da matriz acima por X_i . Isto gera uma matriz *A*, cujos elementos a_{ij} são denominados coeficientes técnicos e indicam o valor monetário de insumos requeridos do setor *i* para o setor *j* produzir uma unidade monetária de seu produto.

Para Joshi (2000), sendo *x* o produto final dos setores e *y* a demanda final dos consumidores, o produto final é obtido somando-se os produtos consumidos pelos setores intermediários aos produtos demandados pelos consumidores (as exportações são excluídas por conveniência). Algebricamente, tem-se a equação 3.6:

$$x = Ax + y \quad (3.6)$$

Assim, o produto doméstico final x requerido para suprir a demanda doméstica total dos consumidores é determinada pela equação 3.7, onde “ I ” a matriz identidade.

$$x = (I - A)^{-1} y \quad (3.7)$$

A análise insumo-produto pode ser estendida para a análise ambiental assumindo-se que a quantidade de intervenções ambientais geradas por um setor é proporcional à quantidade de produtos de setor e que a proporção entre ambos é fixa. Seja R uma matriz que indique a quantidade de poluentes ou recursos naturais emitidos ou consumidos para a produção de uma unidade monetária de produto para cada setor. Logo, o total direto e indireto de emissões de poluentes ou consumo de recursos pelos setores para fornecer certa quantidade de produto é dado pela equação 3.8, onde B é um vetor de impactos ambientais.

$$B = Rx = R(I - A)^{-1} y \quad (3.8)$$

Para ilustrar os procedimentos de cálculo deste modelo, é útil apresentar um problema de pequena escala, uma vez que a matriz insumo-produto é enorme. Para a economia dos EUA, ela contém aproximadamente 500 setores. O seguinte exemplo foi retirado de Hendickson, Lave & Mathews (2005). Considere a pavimentação de 1 km de rodovia com concreto armado, ao custo de US\$ 150 mil, sendo US\$ 104 mil devido a 3.680 toneladas de concreto e US\$ 46 mil devido a 78 toneladas de aço para reforço de concreto. Neste exemplo, apenas um aspecto ambiental é apresentado: resíduos perigosos regulamentados pelo *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA). A matriz insumo-produto, mostrada no quadro 3.6, é simplificada de forma que apresenta apenas 10 setores e somente os insumos diretos para o aço e para o concreto.

Uma coluna no quadro 3.6 representa os insumos diretos requeridos dos outros estágios para uma unidade de produto daquele estágio em particular. Assim, por exemplo, a produção de US\$ 1 de concreto (setor 10) requer US\$ 0,04 de eletricidade (setor 5). Este valor de US\$ 0,04 é obtido no quadro 3.6 pelo cruzamento da coluna do setor de concreto (setor 10) com a linha do setor de eletricidade (setor 5).

Como os produtos dos setores do quadro 3.6 tem muitas unidades físicas diferentes (cimento: kg, eletricidade: kWh, por exemplo), fica nítido que é melhor representar

a matriz insumo-produto em unidades monetárias. Estas podem ser convertidas em quantidades se necessário.

Quadro 3.6 – Matriz Insumo-Produto para o Exemplo do Concreto Armado

<i>Insumos</i>	Setor 1	Setor 2	Setor 3	Setor 4	Setor 5	Setor 6	Setor 7	Setor 8	Setor 9	Setor 10
Setor 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,10
Setor 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,12
Setor 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0,04	0
Setor 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0,005	0
Setor 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0,04
Setor 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,02
Setor 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,03
Setor 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,20
Setor 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Setor 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

LEGENDA: Setor 1= Transporte; Setor 2 = Mineração de agregados; Setor 3= Mineração de minérios de ferro e ligas ferrosas; Setor 4 = Calcário; Setor 5 = Eletricidade; Setor 6 = Mineração de carvão; Setor 7 = Aditivos químicos; Setor 8 = Produção de cimento; Setor 9 = Produção de ferro e aço; Setor 10 = Produção de concreto. (Fonte: Hendickson, Lave & Mathews, 2005 p. 56)

Para determinar a quantidade de insumos para a produção de US\$ 150 mil de concreto armado, aplica-se a equação 3.7. A matriz A são os dados do quadro 3.6 e o vetor do produto requerido y neste caso consiste dos US\$ 104 mil de concreto e US\$ 46 mil de aço para reforço de concreto. O cálculo do produto dos fornecedores (neste exemplo, apenas diretos) seria, em milhares de dólares:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,03 & 0,10 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,12 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,04 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,005 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,07 & 0,04 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0,05 & 0,02 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0,05 & 0,03 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0,20 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 46 \\ 104 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12 \\ 12 \\ 2 \\ 0,2 \\ 7 \\ 4 \\ 5 \\ 21 \\ 46 \\ 104 \end{bmatrix}$$

Finalmente, o cálculo do resíduo sólido perigoso gerado seria calculado por meio da equação 3.8. Os elementos da diagonal da matriz R são os resíduos em kg gerados por US\$ 1 mil de produto, os elementos de x estão US\$ 1 mil e os elementos da matriz B estão em kg. Na matriz R abaixo, 0,027 kg de resíduos sólidos perigosos são gerados por US\$

1 mil de produto no setor de mineração de carvão (setor 6), por exemplo. Assim, para a demanda de US\$ 4 mil de carvão, 0,1 kg de resíduos sólidos perigosos são gerados. No total, são gerados 2760 kg de resíduos sólidos perigosos para o exemplo do concreto armado.

$$\begin{bmatrix}
 2,096 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0,002 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0,162 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0,025 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 2,745 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,027 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 94,158 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 13,866 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 42,454 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,0002
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 12 \\
 12 \\
 2 \\
 0,2 \\
 7 \\
 4 \\
 5 \\
 21 \\
 46 \\
 104
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 25 \\
 0,03 \\
 0,3 \\
 0,005 \\
 19 \\
 0,1 \\
 471 \\
 291 \\
 1953 \\
 0,02
 \end{bmatrix}$$

Há duas simplificações fundamentais no método apresentado. Primeiramente, o produto é aproximado pelo seu setor. Para contornar esta limitação, Joshi (2000) propôs várias alternativas, tais como o produto pode ser tratado como um novo setor industrial hipotético ou o setor existente ser desagregado. A segunda e mais importante limitação é a exclusão das fases de uso e descarte. Se todas as fases do ciclo de vida do produto não forem contempladas, o método não pode ser denominado de ACV. Assim, Joshi (2000) e Suh & Hupples (2005) propõem que as fases do ciclo de vida até a manufatura sejam modeladas por meio da EIOLCA e as fases de uso e descarte por uma ACV baseada em processos, como foi visto na seção 3.1. Este método é denominado ACV híbrida.

3.2.3 Avaliação de Ciclo de Vida baseada em Redes Neurais Artificiais

O apêndice A apresenta uma visão geral das redes neurais artificiais. Nas ACV baseadas em redes neurais artificiais (CHEN & LIAU, 2001; PARK & SEO, 2006; PARK, SEO & WALLACE, 2001; SOUSA, EISENHARD & WALLACE, 2001; SOUSA & WALLACE, 2006), treinam-se as redes com dados advindos de ACV completas e o sistema faz previsões baseadas em parâmetros do produto, imitando o processo de raciocínio de um *expert*.

Todos os métodos de ACV baseada em redes neurais artificiais revisados nesta seção se utilizaram de três camadas: uma de entrada, uma de saída e uma oculta. Como eram

métodos que visavam determinar impactos ambientais na etapa de projeto conceitual, a camada de entrada consistia de atributos do produto conhecidos nesta etapa do desenvolvimento de produto tais como massa, volume, materiais, tempo de vida, uso de energia etc.. A camada de saída era constituída das categorias de impactos ambientais como, por exemplo, aquecimento global, acidificação, eutrofização etc..

De todos os métodos de ACV Alternativas revisados nesta tese, os baseados em redes neurais artificiais são os que estão em estágio de desenvolvimento mais inicial.

3.2.4 Avaliação de Ciclo de Vida baseada em Lógica Difusa

No apêndice B são mostrados os princípios básicos da lógica difusa. Na ACV baseada em lógica difusa (ABELE, REINER & BIRKHOFFER, 2005; GONZÁLEZ, DÍAS & TORRES, 2002; GÜERECA et al, 2007; WECKENMANN & SCHWAN 2001), assim como nas redes neurais artificiais, tenta-se modelar e imitar o processo de raciocínio de um *expert*, porém utilizando-se de outro tipo de teoria matemática: a lógica difusa (*fuzzy logic*).

González, Días & Torre (2002) aplicaram o processo de inferência esquematizado na figura 3.6 em conjunto com a ACV. A entrada 1 era o tipo de material, tipo de transporte ou tipo de emissão no ambiente, a entrada 2, respectivamente, quantidade de material, distância transportada e quantidade de emissão e a saída era o nível de impacto ambiental da alternativa medido em uma escala de 0 a 100.

Abele, Reiner & Birkhofer (2005) transformaram os intervenções ambientais do inventário em números difusos. Esses dados foram acumulados utilizando operações de soma. A cada emissão dentro de cada categoria de impacto ambiental foi aplicada um fator de equivalência, em um procedimento similar à fase de caracterização de uma ACV completa, mas utilizando números difusos. Este conjunto de emissões equivalentes foi tratado como a Entrada 1 da figura 3.6. A Entrada 2 era o grau de severidade da categoria de impacto ambiental. Por exemplo, aquecimento global tinha relevância “muito alta”, acidificação, relevância “média” etc.. A essas entradas eram aplicadas regras, cujo resultado era um índice de 0 a 100 para cada categoria de impacto ambiental. Por fim, calculava-se a média entre os índices de cada categoria de impacto ambiental, gerando um índice final para o produto em questão.

Os procedimentos metodológicos utilizados por Güereca et al (2007) e por Weckenmann & Schwan (2001) eram mais simples. O primeiro limitou-se a transformar os resultados numéricos do inventário de uma ACV em variáveis linguísticas para modelar a imprecisão dos dados, enquanto o segundo utilizava números difusos para modelar as incertezas dos dados do inventário da ACV.

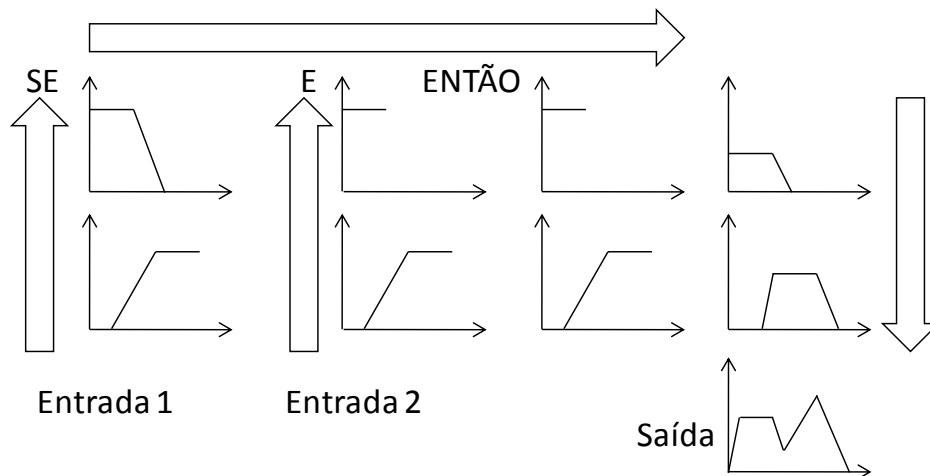


Figura 3.6 – Diagrama Esquemático do Processo de Inferência Difusa
(Fonte: Jang & Gulley, 1998 p.2.26)

3.2.5 Avaliação de Ciclo de Vida baseada em Decisão Multicriterial

A Decisão Multicriterial é uma área da Pesquisa Operacional que pode ser dividida em duas subáreas, dependendo do tipo do problema considerado. Nos problemas de otimização, o número potencial de alternativas é ilimitado, ao passo que nos problemas de classificação e escolha, ele é finito. A tomada de decisão com múltiplos objetivos (MODM) trata do primeiro tipo de problemas e a tomada de decisão com múltiplos atributos (MADM) trata do segundo. Adicionalmente, a MADM pode ser subdividida em métodos compensatórios e métodos de sobreclassificação.

Azapagic & Clift (1999) e Tan, Culaba & Aviso (2008) aplicaram métodos de MODM, especificamente programação linear, em conjunto com a ACV. Em linhas gerais, este procedimento é o oposto daquele empregado pelos métodos de MADM: ao invés de se determinar o impacto ambiental de alternativas dadas a priori, aqui é determinado o estado tecnológico do sistema de forma a serem satisfeitas metas ambientais especificadas. A programação linear consiste em se determinar o mínimo (ou máximo) de uma função objetivo

linear sujeita a restrições também lineares. Matematicamente isto é expresso por meio da equação 3.9.

$$\begin{aligned} \min \sum_i \alpha_i \cdot x_i \\ \text{sujeito a : } \sum_i \beta_{ij} \cdot x_i \leq c_j \end{aligned} \quad (3.9)$$

Neste caso, a função objetivo a ser minimizada consiste dos impactos ambientais, tais como aquecimento global, acidificação etc., as restrições podem ser custos, quantidade produzida etc. e x é a variável de decisão, por exemplo, o nível operacional dos processos.

A diferença entre os métodos compensatórios e de sobreclassificação, quando aplicados à ACV, é que o primeiro permite a compensação entre os atributos ambientais das alternativas, como por exemplo, um bom resultado relativamente à categoria de impacto aquecimento global contrabalançar completamente um mau resultado na categoria depleção da camada de ozônio. Já os métodos de sobreclassificação permitem a compensação parcial, ou seja, uma boa nota em um critério só pode contrabalançar outra caso a diferença entre ambas exceda certo limite. Permitem, também, o uso de funções de veto, isto é, eliminam alternativas que fiquem acima ou abaixo de certo limite pré-estabelecido.

Entretanto, Seppällä (2003), Seppällä, Basson & Norris (2002) e Seppällä & Hämäläinen (2001) mostraram que as diversas etapas e equações da ACV original são mais aderentes aos métodos compensatórios da MADM. Ademais, Werner (2005), em um estudo a respeito dos modelos mentais e suposições que sustentam a ACV, fornece uma extensa lista de características da metodologia. Uma delas era que a ACV possui um caráter compensatório, isto é, permite trocas ou compensações entre os diferentes tipos de impacto ambientais.

Os métodos compensatórios de MADM mais utilizados em conjunto com a ACV são os baseados na teoria do valor multiatributo (MAVT) e o Método de Análise Hierárquica (AHP). Eagan & Weinberg (1999); Henson, Culaba & Mendoza (2002); Ong, Koh & Nee (2001) e Qian, Huang & Yan (2007) aplicaram o AHP em conjunto com a ACV. Basicamente foi montada uma hierarquia, onde o nível inferior são as alternativas a serem consideradas, o nível intermediário são os critérios ambientais pelos quais os méritos das alternativas serão julgadas e o topo da hierarquia é o objetivo da análise. A partir de um

procedimento matemático a importância relativa das alternativas para a satisfação do objetivo é derivada.

Ong, Koh & Nee (1999) propuseram método denominado de pré-ACV, cujo objetivo era a seleção de materiais que minimizassem os impactos ambientais de impressoras. Os critérios de avaliação consistiam de escalas numéricas baseadas na teoria do MAVT, enquanto os pesos dos critérios eram extraídos por meio do AHP. Khan, Sadiq & Veitch (2004) adotaram um procedimento semelhante em um estudo de caso para a escolha do melhor sistema de geração de energia elétrica. Seppälä et al. (2002) aplicaram o método SMART na etapa de avaliação de impacto da ACV, visando comparar diversas empresas com relação à unidade funcional “fabricação de uma tonelada de metal”.

3.2.6 Grau de Aplicação dos Métodos de ACV Alternativas no Projeto Conceitual

A seguir são discutidas as vantagens e desvantagens de cada tipo de método à luz de sua aplicabilidade na etapa de projeto conceitual.

Grosso modo, os métodos denominados de avaliação de vida simplificada são mais fáceis e rápidos de serem aplicados. A matriz MECO permite ao projetista determinar áreas específicas de melhoria no produto, o que nem sempre é aparente em uma ACV. A matriz ERPA trabalha apenas com dados ordinais, excluindo a necessidade de inventário e análise de impactos, que implicam grande quantidade de dados quantitativos. O mesmo pode ser dito das duas primeiras iterações da IS-LCA; são necessários apenas dados qualitativos e ordinais. Entretanto, estes métodos são difíceis de serem utilizados em situações onde há múltiplos critérios e nenhuma solução é claramente superior em todos eles. Ou seja, o método terá um resultado inequívoco apenas se uma alternativa for claramente superior às demais em todos os critérios, o que nem sempre é o caso. Na prática, é mais útil para eliminar de futuras considerações alternativas que se saiam mal em diversos critérios simultaneamente ou aquelas que tenham impacto em categorias particularmente sensíveis (por exemplo, algum tipo de solução inventiva que leve o produto a conter substâncias tóxicas e perigosas à saúde de seus usuários). Com relação à ACV abreviada, não é aconselhável a exclusão de certas etapas do ciclo de vida do produto, pois é difícil se saber de antemão quais podem ter uma contribuição marginal para o impacto total do produto. Mais promissora é a ideia de utilizar dados genéricos disponíveis em bancos de dados. Como a análise do inventário é a fase que mais

consome recursos, substituir a coleta de dados *in loco* por dados prontamente acessíveis acelera muito a avaliação e contornam-se os problemas apontados com as abordagens anteriores. Contudo, a disponibilidade de dados públicos ainda é pequena e os dados genéricos podem representar mal o estudo em particular, pois normalmente estes dados são médias e foram coletados em países da Europa Ocidental ou EUA.

Os métodos baseados em modelos econômicos têm como principal vantagem a abrangência da análise. Diferentemente da ACV por processos, que traça fronteiras e critérios de corte arbitrários para o sistema do produto, a EIOLCA cobre toda a economia. De posse dos dados necessários, a análise é mais simples e mais rápida. Entretanto, muito embora as matrizes insumo-produto sejam disponíveis em muitos países, apenas uns poucos possuem a matriz de emissões por setor econômico. Além disso, este método parece ser o menos adequado comparativamente aos demais revisados, devido ao fato de o mesmo não contemplar as fases de uso e descarte. Por outro lado, a utilização de ACV híbridas no projeto conceitual recai nos mesmos problemas da ACV por processos apontados na Introdução.

Os métodos baseados em redes neurais e lógica difusa apresentam os mesmos pontos fortes e fracos. São os mais difíceis de implantar, devido à complexidade do sistema e a necessidade de linguagens de programação específicas (por exemplo, MATLAB). Por outro lado, uma vez em funcionamento, são os mais simples e rápidos de utilizar; basta fornecer os parâmetros de entrada que o sistema faz a inferência. O projetista não precisa de nenhuma proficiência na área ambiental ou a respeito do funcionamento de uma ACV. Porém, este tipo de abordagem “caixa-preta” pode impedir um melhor entendimento do problema sendo resolvido. Isto é desvantajoso, pois em muitas ocasiões o processo de geração e escolha é iterativo e o melhor conceito emerge da análise e síntese de outros concebidos inicialmente.

A ACV baseada em decisão multicriterial se apoia sobre uma estrutura metodológica cujo objetivo é assistir o tomador de decisão a escolher entre alternativas que possuam um conjunto de objetivos e critérios multidimensionais e conflitantes, onde nenhuma alternativa é melhor em todos os critérios, como normalmente é o caso da avaliação ambiental de produtos. Em comparação com os métodos de ACV simplificada, são mais difíceis de serem aplicados, porém os dados gerados estão no mínimo em uma escala intervalar, o que permite a comparação direta entre critérios conflitantes. Relativamente aos métodos baseados em redes neurais e lógica difusa, é mais fácil de implantar. Por outro lado, é mais difícil de usar, pois não há um processo de inferência direta como nos dois sistemas mencionados; os tomadores de decisão devem executar todas as etapas do método multicritério escolhido (AHP, por exemplo). Isto consome mais tempo e demanda maior conhecimento.

3.3 Estratégias de DfE

De acordo com Wenzel, Hauschild & Alting (1997), uma das principais dificuldades no uso de uma ACV (completa ou alternativa) no desenvolvimento de produtos é relacionar os impactos potenciais com as características e requisitos do produto. E este relacionamento é de especial importância quando o objetivo é utilizar os resultados da ACV como fonte de informação para guiar as decisões do desenvolvimento.

Por exemplo, considere que o resultado da ACV tenha sido que o impacto potencial mais significativo do sistema do produto seja a formação de ozônio fotoquímico. Esta informação pode ser difícil de ser utilizada pelo projetista se ela não for relacionada com as características do produto. O que o projetista pode manipular com as suas decisões são, por exemplo, os tipos e quantidades de materiais a serem utilizados, o tempo de vida do produto, os seus padrões de uso e descarte, dentre outros.

Os materiais, energia e substâncias químicas que entram no sistema do produto estão de certa forma incorporados no produto, direta ou indiretamente. Dessa forma, uma vertente de autores propõe a especificação de estratégias e diretrizes de projeto que guardam relação com impactos ambientais potenciais da ACV. Por exemplo, uma regra do tipo “especificar materiais renováveis no produto” tem efeito sobre a categoria de impacto ambiental “depleção de recursos abióticos”. Estas estratégias são conhecidas na literatura como Estratégias de DfE. Segundo Telenko, Seepersad & Webber (2008), as estratégias de DfE são generalizações de lições aprendidas a partir de avaliações de ciclo de vida que apontaram falhas ou potenciais de melhoria ambiental em produtos.

Entretanto, um cuidado especial deve ser tomado com esse tipo de avaliação. Muitas vezes, algumas das estratégias são conflitantes e, o que é pior, podem ser contraproducentes para certos tipos de produtos. De acordo com Hauschild, Jeswiet & Alting (2005), é fundamental escolher apenas o subconjunto de estratégias certas para cada caso de forma a se otimizar o desempenho ambiental do produto.

Segundo Wimmer & Züst (2001), a questão que se coloca é: quais das possíveis estratégias devem ser selecionadas para o desenvolvimento de um produto ambientalmente superior? Melhorar uma máquina de lavar roupas requer uma estratégia ambiental diferente daquela utilizada para melhorar uma peça de mobília, que não consome energia ou materiais na etapa de uso. No caso da máquina de lavar, é o processo de lavagem que tem de ser melhorado (aumentar a eficiência, um processo alternativo, etc.). Para a

mobília, as possibilidades de melhoria situam-se em outro campo, por exemplo, uso de matérias-primas (tipo, quantidade de materiais), processo de manufatura, distribuição (transporte) e fim de vida (desmontagem, reciclagem).

Uma solução é dividir os produtos em certos tipos básicos e relacionar as estratégias mais indicadas para cada tipo de produto. Essa classificação facilita a seleção das estratégias mais adequadas. Isso é feito a seguir. Inicialmente é descrita uma tipologia ambiental para os produtos. Na sequência, as estratégias e sua relação com os tipos de produtos são expostas.

3.3.1 Classificação Ambiental para Produtos

De acordo com Wimmer & Züst (2001), do ponto de vista ambiental, os produtos podem ser classificados em: produtos intensivos em matérias-primas, produtos intensivos na fabricação, produtos intensivos em transporte, produtos intensivos no uso e produtos intensivos no descarte.

O maior impacto ambiental causado pelos produtos intensivos em matérias-primas (tipo básico A) é devido à obtenção das matérias-primas. O consumo de energia e de materiais necessários para o processamento das matérias-primas contidas no produto claramente excede os impactos ambientais que ocorrem nas fases subsequentes do ciclo de vida. Exemplos típicos são computadores e dispositivos eletrônicos com baixo consumo de energia. Alguns fatores são indicativos de um produto do tipo básico A:

- O produto contém uma considerável proporção de materiais intensivos em recursos, tais como alumínio primário, aço de alta liga, cobre, níquel, fibras de carbono, etc.;
- O produto contém materiais intensivos em recursos e não é possível desmontá-lo nem reutilizar ou reciclar suas partes;
- Na fabricação do produto não são utilizados materiais reciclados, matérias-primas renováveis ou partes restauradas;
- O produto contém materiais intensivos em recursos e é utilizado apenas por um curto período de tempo.

O maior impacto ambiental causado pelos produtos intensivos na fabricação (tipo básico B) é resultante do processamento dos materiais na etapa de manufatura. Estes impactos são devido à provisão de energia e materiais para a fabricação do produto, bem como às emissões e ao consumo de recursos requeridos pelos processos de produção.

Produtos do tipo B contêm partes e montagens manufaturadas em processos intensivos em energia, tais como fundição e forjaria, ou processos intensivos em materiais, tais como limpeza e recobrimento. Adicionalmente, produtos do tipo B contêm partes e montagens que envolvem muitos estágios produtivos individuais ou que são manufaturadas em diferentes locais, exigindo muito transporte. Um exemplo de produtos do tipo B é mobília. Algumas características dos produtos do tipo B são:

- A manufatura do produto consome bastante energia;
- A manufatura gera uma considerável quantidade de resíduos sólidos, efluentes líquidos ou emissões gasosas;
- A manufatura envolve grandes quantidades de processos e materiais auxiliares;
- A manufatura utiliza processos e materiais auxiliares prejudiciais ao ambiente;
- A manufatura é intensiva em recursos, mas o produto só é utilizado por um curto período de tempo;
- O produto contém partes e componentes transportados por longas distâncias.

Para os produtos intensivos em transporte (tipo básico C), o transporte (da planta industrial até o local de uso do produto) e a embalagem são os fatores determinantes para o desempenho ambiental global do produto. Os produtos do tipo C são caracterizados por uma forma especial de distribuição, enquanto as fases de extração de matérias-primas, manufatura, uso e descarte causam relativamente poucos impactos ambientais. Isso ocorre quando produtos muito pesados ou volumosos são transportados por longas distâncias, por exemplo, de avião. Outro exemplo são produtos tais como cerâmica, que são produzidos e importados de países distantes. Algumas características de produtos do tipo C são:

- O produto requer transportes de longa distância entre o fabricante e o usuário final;
- São utilizados meios de transporte intensivos em recursos, tais como aviões, caminhões, etc.;
- A distribuição do produto envolve muito material para a sua embalagem.

Para os produtos intensivos no uso (tipo básico D), os impactos durante o uso dominam o seu impacto ambiental global. O consumo de energia e/ou materiais ou a geração de emissões gasosas, efluentes líquidos ou resíduos sólidos durante o uso causam impactos substanciais. Estes impactos estão intimamente ligados à utilização das funções e serviços pretendidos. A função desejada somente pode ser obtida por meio da introdução de processos adicionais. Resumindo, produtos do tipo D possuem as seguintes características:

- O produto requer energia para a sua operação (combustível, energia elétrica, etc.) e é utilizado regular ou intensivamente;
- A operação do produto requer materiais adicionais;
- O uso do produto gera emissões gasosas, efluentes líquidos ou resíduos sólidos.

Para este tipo de produto, o usuário do produto necessita de informações que o habilite a operá-lo de maneira segura e eficiente. Nesse contexto, o desenvolvimento de produto tem uma influência decisiva sobre o comportamento do usuário e, conseqüentemente, sobre o desempenho ambiental do produto.

Entretanto, nem sempre produtos que são ativos na sua fase de uso são produtos que requerem estratégias de otimização ambiental ligadas a produtos do tipo D. Considere, por exemplo, uma unidade de refrigeração. Para diminuir seu impacto, as medidas a serem tomadas relacionam-se com o aumento da eficiência da unidade, por exemplo, utilizando mais material para melhorar o isolamento térmico. Considere, agora, uma unidade de refrigeração acoplada a um caminhão frigorífico. O foco agora muda da eficiência da unidade para a eficiência do conjunto. Ou seja, a melhor estratégia agora é diminuir o peso da unidade, isto é, uma estratégia para produtos do tipo A. O importante é sempre ter em mente a eficiência ambiental global de forma a alocar as estratégias ambientais corretas. Isto é, o raciocínio de ciclo de vida sempre considera o projeto do sistema como um todo.

Züst (2002) faz da distinção entre produtos ativos imóveis ou estacionários e produtos ativos móveis, ou seja, aqueles que são movimentados com frequência. Os primeiros são produtos do tipo D. Já para os produtos ativos móveis, as estratégias de melhoria ambientais são semelhantes às daquelas dos produtos intensivos em matérias-primas.

Produtos intensivos no descarte (tipo básico E) são caracterizados pelo fato de descarte, retomada e desmontagem serem os fatores dominantes no impacto global. Isto pode ser causado por substâncias problemáticas contidas no produto ou por materiais combinados inseparáveis que causam problemas no descarte.

A desmontagem e separação dos materiais consomem muito tempo, são intensivas em mão de obra e causam um ônus adicional ao ambiente. Além disso, uma mistura desvantajosa de materiais pode reduzir dramaticamente a possibilidade de reciclagem. Ainda, outro problema é o descarte do produto, pelo usuário, juntamente com lixo doméstico, sem a separação e o descarte adequado dos materiais perigosos. Esta prática pode gerar emissões venenosas e ambientalmente perigosas.

Para a utilização de materiais por meio da reciclagem, os diferentes materiais deveriam idealmente estar presentes em grandes quantidades, limpos e não misturados uns com os outros. Outra dificuldade com a fase de fim de vida é que o tempo entre o projeto e o descarte pode ser longo. Nesse ínterim, as condições econômicas podem se alterar e as medidas originalmente planejadas para um abastecimento e descarte eficientes podem não existir mais. Ou o sistema de suprimento, retomada e descarte podem ter se tornado ineficaz. Algumas características dos produtos do tipo E são:

- O produto contém substâncias ou montagens ambientalmente nocivas e que necessitam de tratamento especial na sua etapa de fim de vida;
- O produto causa problemas no descarte porque não pode ser desmontado, reformado ou reciclado;
- O produto e suas partes intensivas em recursos não podem ser reintegrados ao ciclo de materiais.

Por fim, algumas vezes não é possível designar inequivocamente um produto a um dos 5 tipos vistos anteriormente. Nesses casos, é aconselhável investigar pelo menos dois picos de impactos em detalhes e combinar as estratégias pertencentes aos tipos básicos para realizar a melhoria do produto.

3.3.2 Compilação de Estratégias de DfE

Esta seção apresenta uma compilação das Estratégias de DfE encontradas na literatura. Para definir quais materiais seriam considerados válidos para a pesquisa bibliográfica, foi feita uma triagem inicial baseada em quatro critérios. O primeiro critério utilizado foi que as estratégias deveriam estar voltadas para os profissionais de desenvolvimento de produtos e não para a alta administração ou outras partes interessadas.

Assim, as estratégias estariam relacionadas com decisões tomadas por esses profissionais, tais como *layout* do produto, formas e tipos de componentes, seleção de materiais etc.. O segundo critério foi o nível de aplicação das estratégias. O propósito foi garantir que tais estratégias não fossem apenas altas aspirações morais, mas maneiras úteis de se melhorar o projeto do produto. O terceiro critério foi que o conjunto de estratégias deveria ter como objetivo reduzir o impacto ambiental do ciclo de vida do produto. O último critério foi que as estratégias deveriam ser aplicáveis a um número diverso de produtos.

Ao final desse processo, terminou-se com a seguinte lista de autores: Brezet & Hemel³ apud Lee & Park (2005), Crul & Dihel (2006), Fiksel (2009), Giudice, La Rosa & Risitano (2006), Graedel & Allenby (2003, 1998), Keoleian & Menerey (1993), Lee & Park (2005), Luttrup & Lagerstedt (2006), Telenko, Seepersad & Webber (2008), Thompson (1999), Vezzoli & Manzini (2003), Wimmer & Züst (2003), Züst (2002).

Para compilar as estratégias, a partir das propostas desses autores, foi utilizado o diagrama de afinidades. O diagrama de afinidades destina-se a reunir fatos e ideias que necessitam ser organizados ou agrupados. Os dados são agregados de acordo com sua afinidade mútua. O desenvolvimento de um diagrama de afinidades envolve as seguintes etapas: inicialmente, um tema ou problema é selecionado. A seguir, dados verbais são coletados. Em um terceiro momento, os dados verbais são reduzidos a frases que devem ser transferidas a cartões independentes. Na sequência, os cartões são agrupados e cada grupo é rotulado; esse processo continua até que o número de grupos identificados seja satisfatório.

Especificamente, as estratégias propostas por cada autor foram transcritas para os cartões. Estratégias idênticas ou muito semelhantes foram agrupadas e renomeadas. A seguir, essas estratégias renomeadas foram novamente transcritas em cartões e esses foram agrupados. Desse processo, surgiram 38 estratégias que foram agrupadas em torno de 7 temas: materiais, energia, toxidade e emissões do produto, vida do produto, desmontagem do produto, embalagem do produto e sistema de produção e sua gestão. É digno de nota que algumas estratégias poderiam ter sido colocadas em mais de um tema. Por exemplo, a estratégia 12 “utilizar materiais com baixo conteúdo energético” poderia ter sido alocada no temas “materiais do produto” ou no tema “energia”.

Em primeiro lugar, os temas resultantes do diagrama de afinidades são descritos e as estratégias de DfE que os compõe são apresentadas. Dois dos temas, materiais e vida do produto, são compostos de dois subgrupos de estratégias, estes rotulados de

³ BREZET, H.; VAN HEMEL, C. *EcoDesign: A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption*. United Nations Environmental Program (UNEP), 1997.

estratégias genéricas, que são agrupamentos de estratégias específicas. Algumas das estratégias específicas são compostas de uma série de diretrizes para a sua implementação prática. Em segundo lugar, a relação dessas estratégias com a classificação ambiental de produtos é desenvolvida, de forma a auxiliar a escolha daquelas mais adequadas para o produto sendo projetado.

3.3.2.1 *Materiais do Produto*

Com relação aos materiais, duas estratégias genéricas podem ser utilizadas: minimizar o consumo de materiais e aumentar o seu tempo de vida.

Reduzir o consumo de materiais diminui o impacto ambiental do produto uma vez que, além de menos materiais serem extraídos da natureza, também se diminui o seu processamento, transporte e descarte. Deve-se tentar minimizar-se não apenas os materiais utilizados para e pelo produto, mas também os refugos e descartes criados pelos processos de produção, mas isso será tratado mais adiante na seção 3.3.2.7.

Aumentar o tempo de vida dos materiais significa fazê-los durar mais tempo do que o produto do qual eles fazem parte. Os materiais podem ser reutilizados ou reprocessados em matérias-primas secundárias, gerando uma vantagem ambiental dupla. Primeiramente, evita-se o impacto ambiental do material em um aterro. Em segundo lugar, evita-se o impacto de se produzir uma quantidade similar de material ou energia de matérias-primas primárias. O impacto de processos que deixam de ocorrer é considerado uma vantagem ambiental indireta.

As estratégias específicas a seguir têm impacto na quantidade ou tempo de vida dos materiais.

Estratégia 1: Minimizar quantidade de materiais e partes e reduzir o peso do produto.

A taxa de produção de materiais é talvez o mais importante indicador de insustentabilidade da atual economia. O fluxo de materiais é determinante no uso de energia, água, emissão de gases estufa e outros indicadores ambientais. Logo, uma estratégia fundamental para melhorar a sustentabilidade é a desmaterialização. A diminuição da massa de um produto é uma das formas mais diretas de se reduzir resíduos, além de diminuir uso de energia para o transporte do produto.

Para Vezzoli & Manzini (2008), a minimização do conteúdo material do produto se inicia com a redução da quantidade de material nos componentes, empregando-se formas geométricas que preservem a rigidez necessária, e termina com a desmaterialização do produto, isto é, a substituição de *hardware* por *software*. A miniaturização é outra tendência, uma vez que o desenvolvimento tecnológico tem permitido reduzir drasticamente a quantidade de materiais requeridos para certa função. Outra opção é integrar funções para reduzir a quantidade de materiais e de componentes.

Estratégia 2: Diminuir a variedade de materiais.

O ideal seria que cada componente individual do produto fosse feito de um único material, pois isso se constitui em uma grande contribuição para facilitar a reciclagem. Segundo Vezzoli & Manzini (2008), maneiras de se minimizar o número de materiais diferentes são utilizar único material por produto ou por submontagem e utilizar o mesmo material não apenas para os componentes, mas também para as junções.

Estratégia 3: Utilizar materiais reciclados.

A utilização de materiais reciclados reduz o consumo de recursos requeridos para a manufatura do produto e a quantidade de resíduos gerados.

Estratégia 4: Utilizar materiais recicláveis, compatíveis entre si e com tecnologia de reciclagem eficiente.

Nem todos os materiais são recicláveis da mesma forma, isto é, suas características de desempenho podem desviar-se em maior ou menor grau das características dos materiais primários. Selecionar materiais facilmente recicláveis não significa apenas identificar aqueles predispostos a certa tecnologia de reciclagem, mas também identificar aqueles que retêm valor uma vez reciclados.

Adicionalmente, a seleção de materiais recicláveis não pode estar desconectada de uma análise do impacto ambiental do material ao longo de seu ciclo de vida. Por exemplo, utilizar um material facilmente reciclável, mas que é intensivo em energia em sua pré-produção, pode não ser viável econômica e ambientalmente.

Estratégia 5: Evitar o uso de materiais escassos e preferir materiais abundantes ou renováveis.

Da perspectiva da sustentabilidade, que objetiva resguardar recursos para as futuras gerações, a não exaustão de materiais não renováveis ganha importância. Portanto, o projetista deve estar atento à seleção de materiais, evitando o uso desnecessário daqueles que possam ter restrição de suprimento futuro. Uma aproximação para a abundância de recursos naturais não renováveis pode ser derivada comparando-se a quantidade total das reservas atuais estimadas com a taxa atual de uso do material. A divisão do primeiro pelo segundo gera o tempo de exaustão, ou seja, o número de anos até o fim das reservas conhecidas do material, mantendo-se o consumo atual. Listas com o tempo de exaustão de diversos materiais cujo uso industrial é comum podem ser encontradas na literatura (GRAEDEL & ALLENBY, 2003; GRAEDEL & GRENVILLE, 2005), como exemplifica o quadro 3.7.

Outra alternativa é o uso de materiais renováveis, isto é, aqueles cuja taxa de renovação é suficiente para compensar seu uso. Ademais, substâncias renováveis são frequentemente biodegradáveis, o que pode ser uma vantagem no estágio de descarte.

Quadro 3.7 – Classes de abundância relativa à taxa de uso

Abundantes ($t_D > 100$ anos)	Al, B, C, Ca, carvão, Cr, Fe, I, K, Li, Mg, Na, Nb, Os, Pt, terras raras, Ru, Si, Ti, V, Yt.
Fartos ($50 < t_D < 100$ anos)	Co, Hf, gás natural, Ni, P, Pd, Rh, Sb, Ta, W, Zr.
Restritos ($25 < t_D < 50$ anos)	Ba, Bi, Cd, Cs, Cu, Mn, Mo, petróleo, Se, Sn, Sr, U.
Raros ($t_D < 25$ anos)	Ag, Au, Hg, In, Pb, S, Th, Zn.

(Fonte: Graedel & Allenby, 2003 p. 57).

Estratégia 6: Restaurar e reutilizar partes e componentes (entre produtos do mesmo modelo ou entre famílias de produtos).

Bens duráveis podem ser manufaturados com componentes restaurados, resultando em menores custos e consumo de materiais, frequentemente com o mesmo nível de qualidade de produtos com componentes novos.

O reuso de componentes é uma das formas mais desejáveis de reciclagem porque as estruturas não são destruídas e grande parte do valor do componente é conservado.

Para colocar esta estratégia em prática, a empresa deve desenvolver um sistema de logística reversa por meio do qual componentes usados possam ser recuperados, reprocessados e reciclados. O estabelecimento de uma infraestrutura de laço fechado garante a uniformidade, homogeneidade e confiabilidade dos ativos recicláveis. Esta estratégia é ambientalmente superior se comparada com a manufatura de partes e componentes a partir de materiais primários.

Estratégia 7: Padronizar materiais e componentes.

A padronização facilita a possibilidade de reuso ou de reciclagem dos materiais e componentes contidos no produto.

Estratégia 8: Eliminar ou minimizar a quantidade dos itens consumíveis do produto.

Itens consumíveis são materiais utilizados durante o uso do produto, tais como baterias, detergentes, óleos etc.. Primeiramente, devem ser consideradas opções de eliminar tais itens por meio de projetos inovadores. Caso isso não seja possível, deve-se tentar encorajar o seu reuso ou reciclagem. Por fim, se tais itens não puderem ser reusados ou reciclados, a solução ambientalmente correta é garantir com que o consumidor faça o seu descarte adequado.

Estratégia 9: Evitar materiais incompatíveis entre si, compósitos, ligas e materiais misturados que não possam ser separados.

A separação de materiais incompatíveis gera custo econômico (devido ao tempo e gastos com a separação) e ambiental (devido ao impacto das entradas e saídas deste processo). Segundo Vezzoli & Manzini (2008), formas de se evitar a incompatibilidade são utilizar o mesmo material ou materiais compatíveis entre si não apenas para os componentes, mas também para as junções e utilizar no produto ou em suas submontagens materiais que possam ser reciclados juntos. Os quadros 3.8 e 3.9 exemplificam alguns materiais que são compatíveis e incompatíveis entre si.

Estratégia 10: Utilizar materiais melhores e tratamentos superficiais para proteger o produto de sujeira, corrosão e desgaste.

Uma superfície difícil de ser limpa tende a encurtar a vida útil do produto. Clientes descartam produtos com problemas estéticos, mesmo que não haja deterioração de sua função. Assim, os projetistas devem prestar atenção à aparência do produto, em particular à sua superfície. Esta deve ser fácil de ser limpa e nenhum problema ambiental deve advir dessa limpeza.

A corrosão diminui a vida do produto e torna a reciclagem e o reuso difíceis. Para preveni-la, agentes ou materiais anticorrosivos devem ser considerados. Entretanto, estes não devem representar nenhuma ameaça ao ambiente, nem impedir a reciclagem dos materiais.

Estratégia 11: Identificar materiais e incluir instruções sobre o descarte.

De forma a facilitar a classificação e seleção de materiais para reciclagem, é da maior importância designar os materiais constituintes do produto. Além disso, a embalagem também deve mostrar instruções a respeito dos métodos de descarte apropriados.

Quadro 3.8 – Compatibilidade de Metais

Metais	Elementos que são incompatíveis para a reciclagem	Elementos que agravam as condições de reciclagem
Ferro	Hg, Be, PCB.	Cu, Zn, Sn
Alumínio	Hg, Be, PCB.	Cu, Fe, Zn
Cobre	Hg, Be, PCB.	As, Sb, Ni, Bi, Al.

(Fonte: Vezzoli & Manzini, 2008 p.173)

Quadro 3.9 – Compatibilidade de Plásticos

	PS	SAN	ABS	PA	PC	PMMA	PVC	PP	PE, LD/HD	PET	Termopares
PS	+	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-
SAN	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-
ABS	-	+	+	-	+	+	0	-	-	-	-
PA	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
PC	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-
PMMA	0	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-
PVC	-	+	0	-	-	+	+	-	-	-	-
PP	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
PE, LD/HD	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
PET	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-
Termopares	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-/0/+

LEGENDA: “+”: boa; “0”: moderada; “-”: pobre/nenhuma.

(Fonte: Lee & Park, 2005 p.89)

3.3.2.2 Energia

A geração e uso de energia é uma preocupação ambiental da mais alta importância devido a seu papel na emissão de gases estufas, chuva ácida, dentre outros. Outra consideração é a sua escassez, principalmente se for considerada a não renovação dos combustíveis fósseis.

Em geral, a indústria utiliza uma quantidade substancial de energia em seus processos produtivos e, como consequência, contribui significativamente para os problemas ambientais relacionados à sua geração e uso. Segundo Graedel & Allenby (2003), nos E.U.A. as atividades manufatureiras são responsáveis por aproximadamente 30% de toda energia consumida. Adicionalmente, há de se considerar o caso dos produtos que consomem energia durante seu uso.

As estratégias a seguir relacionam-se com o consumo de energia para e pelo produto em todas as etapas de seu ciclo de vida.

Estratégia 12: Utilizar materiais com baixo conteúdo energético.

Isto significa especificar materiais que utilizam pouca energia na etapa de extração e processamento para a produção de matérias-primas. Graedel & Grenville (2005) e Lee & Park (2005) apresentam tabelados os conteúdos energéticos (MJ/Kg) de diversos materiais de uso comum na indústria, tais como metais, papel, papelão e plásticos, como exemplifica o quadro 3.10. Graedel e Allenby (2003) consideram como referência as seguintes faixas em sua avaliação ordinal, do melhor para o pior: abaixo de 50 MJ/kg, entre 50 MJ/kg e 99 MJ/kg, entre 100 MJ/kg e 200 MJ/kg e acima de 200 MJ/kg.

Quadro 3.10 – Energia incorporada de alguns materiais

Material	Energia Incorporada (MJ/kg)	Material	Energia Incorporada (MJ/kg)
Alumínio	170	Plástico, PMMA	110
Vidro	10	Plástico, POM	84
Cobre	90	Plástico, PP	80
Magnésio	150	Plástico, OS	90
Latão	80	Plástico, PUR	110
Níquel	190	Plástico, PVC	65
Papel/Papelão	40	Plástico, SAN	90
Plástico, ABS	95	Borracha Sintética	35
Plástico, EPS	79	Aço Inoxidável	46
Plástico, PA	140	Silicone	220
Plástico, PC	115	Ferro Fundido	30
Plástico, PE	75	Aço	40
Plástico, PET	80	Zinco	70

(Fonte: Lee & Park, 2005 p. 86)

Estratégia 13: Minimizar o consumo de energia dos processos.

O projeto do processo é parte integral do desenvolvimento de produto e ambos, produto e processo, devem ser considerados simultaneamente. O consumo de energia durante

a fabricação e montagem do produto depende da tecnologia adotada pelo fabricante. Assim, os projetistas deveriam selecionar tecnologias que sejam eficientes e que economizem energia.

Logicamente há ações fora do desenvolvimento de produtos que consistem considerar também o próprio projeto interno da fábrica na busca por economia de energia. Por exemplo, Vezzoli & Manzini (2008) citam que são úteis os seguintes procedimentos para se minimizar o consumo de energia dos processos: empregar maquinário eficiente; utilizar o calor emitido pelo processo para pré-aquecer outros fluxos de processo; empregar reguladores de velocidade para motores e bombas com configurações dinâmicas; equipar o maquinário com sistema de desligamento inteligente; otimizar as dimensões globais de motores e facilitar sua manutenção; otimizar o tamanho da planta industrial; otimizar o sistema de movimentação de estoques; otimizar o sistema de transporte interno e considerar a diminuição do peso e dimensões dos materiais transportados e semiprodutos; empregar um sistema eficiente de iluminação, aquecimento e ventilação nos prédios e instalações.

Estratégia 14: Minimizar o consumo de energia no transporte e armazenagem.

Com relação ao transporte, é claro que o meio de transporte é preponderante no impacto ambiental causado pela movimentação do produto. Entretanto, o projetista pode intervir escolhendo soluções que maximizem as capacidades de veículos e depósitos, diminuindo, assim, o consumo por unidade transportada. A reconfiguração de embalagens e produtos pode aumentar significativamente a taxa de espaço por bem transportado.

Estratégia 15: Minimizar o consumo de energia em uso.

De acordo com Wimmer & Züst (2001), produtos ativos às vezes consomem muito mais energia durante seu uso do que foi requerido para sua fabricação. Uma maneira de diminuir tal consumo é por meio da escolha adequada de um princípio funcional. Usualmente uma mesma função pode ser desempenhada satisfatoriamente por diversos princípios diferentes. Portanto, deve-se garantir que um princípio funcional eficiente em energia seja selecionado.

Outro aspecto a ser considerado é o comportamento de uso do consumidor. Este comportamento é determinante no consumo de energia. Nesse contexto, o projetista deve tentar oferecer incentivos e suporte para promover um uso ambientalmente correto por parte do cliente. Tornar visível o uso ambientalmente inadequado pode auxiliar na sua prevenção. Por exemplo, fornecer *feedback* ao usuário, mostrando o consumo corrente de energia pode

ser útil. Oferecer informações, instruções e prover o produto com programas e botões que poupem energia são outras soluções (como, por exemplo, ocorre nas máquinas de lavar roupas).

Vezzoli & Manzini (2008) oferecem as seguintes diretrizes: projetar considerando-se a eficiência energética do produto e de sua manutenção, projetar sistemas que utilizem uma parte de sua energia de fontes passivas (por exemplo, o sol), empregar sistemas de conversão de energia, motores e sistemas de transmissão eficientes, diminuir o peso de produtos que se movem (produtos ativos móveis), projetar sistemas que recuperam energia ou dispositivos que poupem energia e empregar sistemas que façam uso dinâmico de energia.

Estratégia 16: Fonte de energia do produto.

Além do aspecto do consumo de energia, é importante também a fonte de energia utilizada para alimentar o produto. Se possível, deve-se dar preferência a fontes de energia renováveis, tais como solar, eólica, termal ou biomassa, por exemplo.

Estratégia 17: Fonte de energia do processo.

Se possível, o processo deve utilizar fontes renováveis ou mais limpas de energia.

3.3.2.3 Toxidade e Emissões do Produto

A estratégia de desmaterialização reduz o fluxo total de materiais e energia, com isso conservando recursos e reduzindo resíduos e emissões. Entretanto, simplesmente reduzir a massa dos materiais é insuficiente. Algumas substâncias quando liberadas no ambiente podem exercer um impacto adverso significativo, tanto na saúde humana, quanto no meio, mesmo em concentrações muito baixas. Exemplos conhecidos são chumbo, mercúrio e dioxinas. Logo, a análise do fluxo de material apenas é insuficiente para avaliar a sustentabilidade do produto.

A estratégia de desintoxicação refere-se à prevenção e redução de efeitos adversos causados ao homem e ao ambiente pelo uso de materiais. Abaixo seguem estratégias específicas relacionadas com a desintoxicação.

Estratégia 18: Selecionar materiais atóxicos e inofensivos e evitar o uso de materiais ou substâncias tóxicas nos componentes.

Idealmente, o uso de substâncias tóxicas em um produto deveria ser banido. Quando isso é inevitável por razões técnicas, informações para o descarte ou reciclagem efetivos devem ser fornecidos. Informações sobre o grau de toxicidade de mais de 11.200 substâncias podem ser encontradas em <http://www.scorecard.org/chemical-profiles/>. Neste sistema, o grau de toxicidade das substâncias é dado em uma escala de 1 (menos tóxico) a 100 (mais tóxico). Graedel & Allenby (2003) utilizam os seguintes intervalos de referência, do melhor para o pior: abaixo de 25, entre 25 e 50, entre 51 e 75 e acima de 75.

Estratégia 19: Evitar a utilização dos itens consumíveis tóxicos no produto.

Não se deve apenas eliminar ou diminuir a quantidade dos itens consumíveis do produto, mas também evitar consumíveis tóxicos. Algumas substâncias mesmo em pequenas quantidades são altamente problemáticas.

Estratégia 20: Garantir o uso seguro do produto e eliminar o potencial de dano ambiental em caso de falha.

O projetista deve estar atento ao risco ambiental inerente ao produto em caso de avaria durante o seu uso. Neste contexto, condições de operação não usuais, tais como acidentes, incidentes, erros operacionais devem ser levados em consideração. Sistemas de proteção também reduzem o risco de danos ao ambiente.

Estratégia 21: Minimizar a geração de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas durante o uso do produto.

Durante o uso, um produto pode gerar resíduos sólidos (por exemplo, cartucho de impressora), efluentes líquidos (por exemplo, máquina de lavar) ou emissões gasosas (por exemplo, motor a combustão interna). Adicionalmente, a natureza dessa dissipação pode ser intencional ou não intencional. Produtos intencionalmente dissipadores são aqueles projetados para que durante o uso algo seja impreterivelmente perdido no ambiente. As diretrizes para a mitigação dos danos ambientais desse tipo de produto são semelhantes àsquelas de eliminação ou diminuição dos itens consumíveis. Já os produtos não intencionalmente dissipadores são aqueles cujas emissões se devem à sua degradação. Aqui as diretrizes são semelhantes àsquelas de garantir o uso seguro do produto e de protegê-lo da corrosão e do desgaste.

3.3.2.4 *Vida do Produto*

Quando se fala de otimização do tempo de vida útil do produto, duas estratégias genéricas são viáveis: estender o tempo de vida útil do produto e seus componentes e intensificar o uso do produto, minimizando o tempo de não utilização.

O termo vida útil significa o intervalo de tempo que o produto e seus componentes duram sob condições normais de trabalho, mantendo seu comportamento e desempenho em um nível padrão aceitável ou pré-determinado. As principais razões que determinam o fim da vida útil e levam ao descarte do produto são: degradação do desempenho e fadiga estrutural devido ao uso normal; degradação devido a causas ambientais ou químicas; danos causados por acidentes ou mau uso; e obsolescência tecnológica, estética ou cultural.

Um produto com vida útil curta causa não somente um descarte prematuro, mas também novos impactos indiretos devido à necessidade de sua reposição. A pré-produção, produção e distribuição do novo produto obriga o consumo de recursos e criação de emissões adicionais. Entretanto, nem sempre estender a vida do produto é sinônimo de diminuição de impactos ambientais. Isso porque novos produtos podem ser mais eficientes que os anteriores (um exemplo é o aumento de eficiência energética dos refrigeradores ao longo dos anos). Isto é, se o produto causa o maior impacto durante a sua fase de uso, não há vantagem em se aumentar indefinidamente sua vida; há um ponto de equilíbrio que balanceia os impactos negativos da produção do novo produto com os ganhos advindos de sua maior eficiência (ou alternativamente, o ganho devido ao menor impacto causado no uso). Colocando de outra maneira, a partir de certo tempo, o impacto causado devido à produção e distribuição do novo produto mais o descarte do antigo é menor do que manter o antigo em uso, graças ao aumento de eficiência do novo produto no uso.

A segunda estratégia genérica é a utilização mais intensiva do produto. Produtos utilizados mais intensivamente cumprem sua demanda de desempenho embora com uma redução do número de produtos em um dado momento e local. Isso determina uma redução em seu impacto ambiental. Em outras palavras, se os produtos são utilizados mais intensivamente, sua vida útil passará mais rapidamente, sem aumentar a quantidade global de produtos e seus respectivos descartes. De fato, um uso mais intensivo leva a uma vida útil em termos absolutos menor (tempo entre a compra e o descarte). Mas, por outro lado, aumenta-se o tempo de uso efetivo e diminui-se o descarte de produtos ainda bons por motivos de obsolescência técnica ou estética. Portanto, essa estratégia tem maior potencial para ganhos

quando o produto tem rápida obsolescência ou para produtos cujo modo de utilização normal pelos clientes é apenas ocasional.

As seguintes estratégias específicas têm impacto sobre o tempo de vida útil do produto (estratégias de 22 a 29) ou sobre o seu uso intensivo (estratégia 30).

Estratégia 22: Facilitar a manutenção.

Manutenção é definida como atividades preventivas periódicas e pequenos ajustes. Uma manutenção apropriada ajuda a evitar custos econômicos e ambientais de reparos, bem como o impacto do descarte e da produção de um novo produto. Bens duráveis normalmente requerem manutenção apropriada e que pode ser facilitada por meio de um projeto adequado.

Segundo Vezzoli & Manzini (2008) e Giudice, La Rosa & Risitano (2006), as seguintes diretrizes facilitam a manutenção do produto: simplificar o acesso e a desmontagem dos componentes que passarão por manutenção; facilitar o acesso às partes a serem limpas; pré-arranjar e facilitar a substituição das partes que se deterioram mais rapidamente; agrupar os componentes de acordo com suas propriedades físicas e mecânicas, níveis de confiabilidade e funções compartilhadas; equipar o produto com sistemas para o diagnóstico das partes que irão requerer manutenção e prover instrumentos para o diagnóstico de componentes críticos; equipar o produto com ferramentas de manutenção fáceis de serem utilizadas; e projetar produtos que requeiram menos manutenção.

Estratégia 23: Facilitar o reparo.

Para Vezzoli & Manzini (2008), o custo da mão de obra é o fator determinante para um eventual reparo do produto. Este custo é normalmente proporcional à complexidade e dificuldade de acesso às partes a serem reparadas.

Produtos duráveis normalmente requerem reparos, que devem ser facilitados por soluções de projeto adequadas, com uma clara visão do que pode e do que será feito e por quem. Dependendo do produto e do contexto de uso, os reparos serão feitos pelo próprio usuário ou por um centro de serviço ligado ao produtor ou ao distribuidor.

Se o fabricante também irá manufaturar as peças de reposição, a sua intercambiabilidade é fundamental. A padronização torna as partes de diversos fabricantes diferentes compatíveis entre si. Projetos onde são especificados componentes ou características únicos podem facilmente tornar nulos quaisquer esforços voltados para o reparo.

Segundo Vezzoli & Manzini (2008) e Giudice, La Rosa & Risitano (2006), as seguintes diretrizes facilitam o reparo: pré-arranjar e favorecer a remoção e a remontagem de componentes críticos sujeitos à deterioração e avarias; projetar partes e componentes padronizados; equipar o produto com sistemas de diagnóstico de danos automático; e projetar o produto para ser facilmente reparado *in loco*.

Estratégia 24: Facilitar a atualização e a adaptação do produto a mudanças no desempenho.

Produtos cuja tecnologia evolui rapidamente podem manter-se em uso por meio da troca das partes obsoletas. Isto é chamado de atualização. A atualização pode estender a vida do produto, diminuindo, dessa maneira, o consumo de recursos e a geração de resíduos. De forma a realmente diminuir o impacto ambiental global do produto, uma considerável parte do mesmo deve manter-se inalterada. Isto significa que a atualização é somente uma substituição de componentes; uma grande parte do produto é a mesma. A atualização deixa o produto atualizado com a tecnologia, mas economiza muitos componentes que não precisam ser substituídos.

De acordo com Giudice, La Rosa & Risitano (2006), a adaptação do produto é entendida em relação a mudanças nos consumidores ou no meio em que o produto está operando. Para isso, os produtos devem ser projetados com *design* modular, com componentes comuns e atualizáveis, com arquitetura reconfigurável e com dimensões, desempenho e estética dinâmicos. Normalmente, a estratégia de adaptação é mais adequada a produtos com obsolescência intrínseca e que consistam de muitos componentes.

Estratégia 25: Aumentar a durabilidade do produto

De acordo com Züst (2002), os maiores candidatos para prolongamento de vida útil são os produtos passivos imóveis, isto é, aqueles que durante o uso não são regularmente movimentados e que não consomem energia e/ou materiais (ou que uso é tão infrequente a ponto de poderem ser considerados passivos como, por exemplo, um barbeador elétrico).

Conforme já comentado, produtos ativos não devem ser projetados para vida muito longa, exceto no caso de não se esperar inovação tecnológica em sua função. Em geral, qualquer tipo de produto cuja tecnologia evolui rapidamente não é candidato para longa durabilidade: se ele irá se tornar obsoleto rapidamente, não há necessidade de durar muito. Produtos complexos que compartilham essa característica deveriam ser adaptáveis; a durabilidade deve ser longa, mas apropriada.

Estender a vida de produtos que são movimentados regularmente pode ser contraproducente, pois isso pode se opor à necessidade de diminuição de sua massa. Também faz pouco senso prolongar a vida de produtos que são destruídos durante o uso ou que são utilizados uma única vez.

Projetar componentes que irão durar muito mais que a vida útil do produto também gera desperdícios desnecessários, pois durabilidade maior quase sempre é obtida por meio de materiais de melhor qualidade ou tratamentos dos mesmos.

Segundo Vezzoli & Manzini (2008), as seguintes diretrizes são válidas para o projeto de uma vida apropriada: projetar componentes com vida de igual duração; projetar a vida dos componentes substituíveis de acordo com a durabilidade programada; possibilitar e facilitar a separação de componentes que possuam diferentes expectativas de vida; selecionar materiais duráveis de acordo com o desempenho do produto e sua expectativa de vida; e evitar materiais duráveis para produtos ou componentes temporários.

Estratégia 26: Aumentar a confiabilidade.

A confiabilidade é um dos mais importantes critérios de qualidade. Ela também está relacionada com menores impactos ambientais. De fato, produtos não confiáveis devem ser consertados ou substituídos. Características importantes relacionadas com a confiabilidade são a quantidade de componentes e como estes são combinados entre si. De acordo com Vezzoli & Manzini (2008), a confiabilidade é aumentada com a diminuição do número de componentes, a simplificação do produto e com a eliminação de uniões fracas.

Estratégia 27: Facilitar o reuso do produto.

O reuso é entendido como um segundo uso do produto. Reparos, limpeza e todos os procedimentos que auxiliam a proteção da integridade do produto podem ser incluídos e aplicados para favorecer a transição de um uso para o outro. Obviamente, um produto bem cuidado é mais facilmente reutilizado. Portanto, é de vital importância também facilitar a manutenção e o reparo.

Produtos destinados ao reuso têm de ser primeiramente coletados e, sem um número excessivo de operações, serem dirigidos para o mesmo tipo de uso ou para outro com menores exigências.

As seguintes diretrizes facilitam o reuso, segundo Vezzoli & Manzini (2008): aumentar a resistência de componentes que são facilmente danificados e que não podem ser recuperados; facilitar o acesso e a remoção dos componentes recuperáveis; projetar

componentes modulares e substituíveis; projetar os componentes segundo padrões para facilitar a substituição; projetar partes auxiliares reutilizáveis; e projetar produtos visando uma utilização secundária.

Estratégia 28: Facilitar a remanufatura.

Remanufatura é um processo industrial de renovação de produtos desgastados pelo uso e que irá recuperá-los a uma condição comparável a de um novo. Produtos industriais ou produtos valiosos que não precisam mudar frequentemente são economicamente mais apropriados à remanufatura. Para facilitar a remanufatura, é importante possuir processos de remoção, substituição e troca dos componentes da linha de produtos.

De acordo com Vezzoli & Manzini (2008), as seguintes diretrizes são válidas para facilitar a remanufatura: facilitar a remoção e substituição de componentes recuperáveis; separar as partes estruturais dos componentes externos; prover fácil acesso aos componentes a serem remanufaturados; calcular tolerâncias mais precisas para as conexões recuperáveis; e reforçar com maior quantidade de material os locais e superfícies mais sujeitos à deterioração.

Estratégia 29: Otimizar a funcionalidade.

Para que o produto tenha um uso mais intensivo, é necessário que ele seja multifuncional ou que possua diversas funções integradas. Segundo Fiksel (2009), produtos multifuncionais são eficientes do ponto de vista ecológico na medida em que a mesma quantidade de material proporciona um nível maior de funcionalidade. Quanto maior a proporção de tempo utilizado, maior a razão de valor entregue por unidade de recurso consumido. Um produto multifuncional é aquele projetado para servir simultaneamente para vários propósitos.

Estratégia 30: Substituir produto por serviço; arrendar o produto ao invés de vendê-lo.

De acordo com Fiksel (2009), uma forma de desmaterialização consiste em eliminar o produto e trocá-lo por um serviço. A vantagem dessa estratégia reside no fato de o provedor do serviço, visando aumentar sua lucratividade, ter a motivação e a habilidade de maximizar a eficiência da utilização e seus recursos. Uma forma bastante difundida é o arrendamento, onde o fabricante retém a posse e a responsabilidade pelo produto. Estes tipos de estratégia tem o potencial de reduzir os recursos e o capital da cadeia de suprimentos necessários para entregar valor aos clientes.

3.3.2.5 *Desmontagem do Produto*

O DfD (*design for disassembly* – projeto voltado para a desmontagem) foca em como projetar um produto facilmente desmontável, isto é, aquele em que suas partes e materiais podem ser fácil e economicamente separados.

Esta estratégia relaciona-se com a completa desmontagem do produto, visando à separação de materiais e componentes do produto ao fim de sua vida útil. Isto permite a reciclagem e neutralizações (em caso de haver materiais tóxicos ou perigosos) dos materiais e a reutilização de partes do produto.

Um benefício secundário advindo desta estratégia é que a possibilidade de fácil separação das partes simplifica a manutenção, o reparo e a atualização do produto.

Estratégia 31: Concentrar elementos tóxicos, perigosos ou valiosos.

Estes tipos de materiais devem ser concentrados de forma a facilitar e tornar rápida a sua remoção para a reutilização, reciclagem ou descarte adequados.

Estratégia 32: Facilitar a desmontagem do produto

A facilidade de desmontagem do produto é um conceito complexo que depende de uma grande quantidade de fatores (FIKSEL, 2009; KEOLEIAN & MENEREY, 1993; LUTTROP & LAGERSTEDT, 2006; TELENKO, SEEPERSAD & WEBBER, 2008; THOMSON 1999; VEZZOLI & MANZINI, 2008; WIMMER & ZÜST, 2001), tais como:

- Quantidade de uniões e interfaces;
- Simplicidade da arquitetura do produto e quantidade de componentes;
- Facilidade de acesso aos componentes;
- Sequência de desmontagem;
- Facilidade de separação de componentes e materiais (incluindo os incompatíveis);
- Reversibilidade dos sistemas de união;
- Facilidade de identificação dos materiais.

Giudice, La Rosa & Risitano (2006) fornecem uma série de parâmetros quantitativos que, além de permitir avaliar a facilidade de desmontagem do produto, complementam a lista anterior. São eles:

- Profundidade da estrutura: número de partes em cada nível de desmontagem (determinado a partir de um diagrama de árvore do produto);
- Dependência da desmontagem: número de paralelismos presentes no processo de desmontagem (determinado a partir de um diagrama de precedência);
- Simplicidade da estrutura: número de partes conectadas em cada ligação;

3.3.2.6 *Embalagem do Produto*

Para Keoleian & Menerey (1993), a distribuição eficiente do produto relaciona-se com o transporte, armazenagem e embalagem do produto. Os dois primeiros foram tratados dentro da estratégia genérica de energia, especificamente na estratégia de minimizar o consumo de energia no transporte e armazenagem. As estratégias a seguir relacionam-se com a embalagem do produto.

Propor a redução da embalagem não significa que se deva subestimar sua função em manter o produto intacto durante o transporte e armazenagem. Assim, a embalagem pode fornecer uma vantagem ambiental porque ela aumenta a expectativa de vida do produto, prevenindo-o de ser danificado. Entretanto, a embalagem deve ser tratada como um produto separado, com um ciclo de vida próprio.

Estratégia 33: Reduzir o volume do produto.

Produtos com menor volume, que possam ser dobrados ou colocados uns dentro dos outros requerem menor quantidade de embalagem, bem como reduzem o espaço requerido para armazenagem e transporte.

Estratégia 34: Minimizar a quantidade, o volume e o peso da embalagem.

As embalagens devem ser projetadas para minimizar a quantidade, o volume e o peso de seus materiais e, ao mesmo tempo, satisfazer as exigências de segurança, saúde e os requisitos dos consumidores. De acordo com Lee & Park (2005), um índice útil para se avaliar o grau de otimização do volume e do peso da embalagem é coeficiente volumétrico, que é a razão do volume da embalagem pelo peso do produto. Uma estratégia interessante para a

minimização da embalagem é projetá-la para ser ou tornar-se parte do produto (VEZZOLI & MANZINI, 2008).

Estratégia 35: Especificar materiais adequados, padronizar, reciclar e reutilizar a embalagem.

As embalagens devem ser projetadas para que seus materiais sejam recicláveis. Deve-se, também, utilizar materiais adequados ao tipo de embalagem (se retornável ou descartável). A sua padronização torna a logística mais eficiente. O reuso pode ser uma opção interessante, mas deve-se considerar sua viabilidade, pois demanda, segundo Keoleian & Menerey (1993): uma estrutura de coleta e retorno; procedimentos para inspeção contra defeitos e contaminação; meios para reparo, limpeza e restauro; e sistema de manuseio e armazenagem.

3.3.2.7 Sistema de Produção e sua Gestão

Os processos que geram grandes impactos ambientais deveriam ser substituídos por outros mais limpos. Muito embora o projeto do processo seja parte integral do projeto de produtos, as melhorias nos processos produtivos e as estratégias abaixo descritas podem ser perseguidas fora do processo de desenvolvimento de produtos.

Estratégia 36: Minimizar a geração de resíduos sólido, efluentes líquidos e emissões gasosas durante a produção (processo de produção mais limpo).

A geração de resíduos, efluentes e emissões durante a fabricação e montagem do produto depende da tecnologia adotada pelo fabricante. Assim, os projetistas deveriam selecionar tecnologias que sejam eficientes e mais limpas. De acordo com Crul & Dihel (2006), essas são as tecnologias que evitam materiais tóxicos (por exemplo, PCB, chumbo, cádmio e mercúrio), substâncias que destroem a camada de ozônio (por exemplo, CFC), substâncias que causam o aquecimento global, substâncias que causam a formação de ozônio fotoquímico (por exemplo, hidrocarbonos) ou processos de tratamento superficial como galvanização e revestimento eletrolítico de zinco ou cromo.

Estratégia 37: Aumentar a eficiência do processo, diminuir perdas, reduzir quantidade de materiais e reutilizar e/ou reciclar perdas internas.

Processos projetados para utilizar materiais da maneira mais eficiente reduzem simultaneamente as entradas de materiais e as perdas das saídas. Segundo Keoleian & Menerey (1993), as mesmas ações para se reduzir a quantidade de materiais do produto produzem um resultado similar no processo. Segundo esses autores, o controle dos processos, a melhora do *layout*, a melhora do sistema de movimentação de materiais e controle do estoque e as estratégias de prevenção de poluição (tratamento dos resíduos, emissões e efluentes) são todas estratégias para se aumentar a eficiência dos processos e diminuir seu impacto ambiental. Além do mais, os materiais resultantes de perdas internas são materiais normalmente limpos, bem identificados e adaptados ao reuso ou reciclagem de alta qualidade.

Estratégia 38: Implantar sistema de gestão de suprimentos verde.

De acordo com Wimmer & Züst (2001), esta estratégia relaciona-se com a utilização de materiais auxiliares de processo ambientalmente aceitáveis (renováveis, recicláveis, reciclados e não tóxicos), bem como dar preferência à compra de matérias-primas e produtos semiacabados de fornecedores locais, minimizando a necessidade de transportes longos e facilitando um sistema de logística reversa para reutilizar contêineres e reciclar embalagens.

3.3.3 Relação das Estratégias de DfE com a Classificação Ambiental de Produtos

Na literatura consultada, a grande maioria dos trabalhos apenas listava as estratégias sem maiores referências às condições em que elas seriam mais adequadas. Os únicos autores a relacionar estratégias de DfE com tipos de produtos ou impactos das mesmas nas etapas do ciclo de vida do produto foram, respectivamente, Wimmer & Züst (2003) e Vezzoli & Manzini (2008) e Giudice, La Rosa e Risitano (2006). A partir da análise desses autores, principalmente Wimmer & Züst (2003), foi possível determinar quais são as estratégias mais indicadas em função da classificação de produtos apresentada anteriormente, como indica o quadro 3.11.

Quadro 3.11 – Relação das Estratégias de DfE com os Tipos de Produtos

Estratégias de DfE	Tipos de Produtos				
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E
Estratégia 1	X		X		
Estratégia 2	X				X
Estratégia 3	X				
Estratégia 4	X				X
Estratégia 5	X				X
Estratégia 6	X	X			X
Estratégia 7	X	X			X
Estratégia 8				X	
Estratégia 9	X				X
Estratégia 10	X	X			X
Estratégia 11	X				X
Estratégia 12	X				
Estratégia 13		X			
Estratégia 14			X		
Estratégia 15				X	
Estratégia 16				X	
Estratégia 17		X			
Estratégia 18	X				X
Estratégia 19				X	
Estratégia 20				X	
Estratégia 21				X	
Estratégia 22	X	X		X	
Estratégia 23	X	X			X
Estratégia 24	X	X		X	
Estratégia 25	X	X			X
Estratégia 26	X	X		X	
Estratégia 27	X	X			X
Estratégia 28	X	X			X
Estratégia 29	X	X		X	
Estratégia 30	X	X			X
Estratégia 31	X				X
Estratégia 32	X	X			X
Estratégia 33			X		
Estratégia 34			X		
Estratégia 35			X		
Estratégia 36		X			
Estratégia 37		X			
Estratégia 38		X			

(Fonte: Elaborado pelo Autor)

Aqui termina o capítulo a respeito dos métodos de avaliação e melhoria ambiental de produtos. A seguir, será abordado o AHP, que juntamente com os conceitos ambientais aqui descritos, serviram de base para a proposição do método da presente tese.

4 O MÉTODO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA

4.1 Decisão Multicriterial – Visão Geral

De acordo com Tsouflas & Pappis (2008), a Decisão Multicriterial (*Multi-Criteria Decision Making* – MCDM) é uma área da Pesquisa Operacional (PO) que estuda métodos de escolha de alternativas de ação que levam em consideração um conjunto de objetivos e critérios que podem ser multidimensionais e conflitantes. É ideal em situações quando é necessário determinar uma solução onde nenhuma alternativa é melhor em todos os critérios.

Önüt, Kara & Işık (2009) explicam que a MCDM é dividida em dois ramos, dependendo do número de alternativas consideradas. Nos Métodos de Tomada de Decisão com Múltiplos Objetivos (*Multiple Objective Decision Making* – MODM), as alternativas não são pré-determinadas, mas determinadas a partir de um conjunto de funções objetivo contínuas a serem otimizadas, sujeitas a uma série de restrições. Nos Métodos de Tomada de Decisão com Múltiplos Atributos (*Multiple Attribute Decision Making* – MADM), um número finito de alternativas é avaliado em relação a uma série de atributos, tanto quantitativos, quanto qualitativos.

De acordo com Kahraman (2008), A MADM é o ramo mais conhecido da MCDM. É uma classe geral de modelos que trata de problemas sob a presença de vários critérios de decisão. Os métodos de MADM requerem que a escolha ou seleção seja feita entre alternativas usualmente conhecidas a priori e descritas em termos de seus atributos. Presume-se que há um número pré-determinado e limitado de alternativas de decisão. A resolução dos problemas envolve classificação, ordenamento, filtragem ou seleção.

Na MODM, por outro lado, as alternativas não são dadas a priori. Ao invés disto, os métodos de MODM fornecem uma estrutura matemática que permite esboçar um conjunto viável de alternativas, que uma vez identificadas, serão julgadas por quão próximas satisfizerem múltiplos objetivos. Por isso, o número de alternativas é grande, potencialmente infinito. A resolução de um problema de MODM envolve seleção.

Segundo Hung et al. (2006) e Masud & Ravindran (2009), como nos problemas de MODM normalmente há um número infinito de soluções eficientes e elas não são

comparáveis sem informação do tomador de decisão, é geralmente assumido que ele tem uma função de preferência real definida nos valores dos objetivos, mas que ela não é explicitamente conhecida. A partir desta premissa, o objetivo primário dos métodos de solução é determinar uma solução eficiente que maximize a função preferência do tomador de decisão. Os métodos de MODM podem ser categorizados em três subáreas, dependendo das suposições a respeito da função preferência do tomador de decisão: quando informações completas a respeito da função preferência estão disponíveis; quando não há informação disponível; e quando informações parciais são obtidas de forma interativa ou progressiva.

A MADM pode ser dividida em duas subáreas: os métodos compensatórios (quando um alto desempenho em um atributo pode parcialmente compensar um baixo desempenho em outro) e os métodos não compensatórios ou de sobreclassificação. (HUNG *et al.*,2006; KAHRAMAN, 2008).

De forma a padronizar o linguajar e facilitar o entendimento dos problemas e métodos de solução, algumas definições são necessárias. Os seguintes termos e conceitos básicos foram retirados de Goodwin & Wright (2004) e Masud & Ravindran (2009):

- Alternativas são os possíveis cursos de ação em um problema de decisão e estão no âmbito da tomada de decisão. Particularmente nos métodos de MADM, onde elas são pré-especificadas, é importante desenvolver todas as alternativas possíveis, caso contrário é possível que a escolhida seja inferior a outras não exploradas;
- Atributos são traços, características, qualidades ou parâmetros de desempenho das alternativas. Por exemplo, se a decisão é a respeito da compra de um automóvel, os atributos poderiam ser cor, economia de combustível, tamanho etc.. Na MADM os atributos normalmente formam os critérios de avaliação;
- Objetivos são as direções de melhoria, conforme a percepção do tomador de decisão. No exemplo do carro, um objetivo poderia ser maximizar a economia de combustível. Este objetivo indica que se preferem automóveis com maior rendimento e quanto maior esta economia, melhor a situação. Na MODM, os objetivos formam os critérios de avaliação;
- Metas é o estado específico ou desejado para os atributos ou objetivos. São alvos ou limites esperados a serem alcançados pela melhor alternativa. No exemplo anterior, uma meta poderia ser um automóvel que alcance um desempenho mínimo de 10 km/l;
- Critérios de avaliação são regras de aceitação ou padrões de julgamento para as alternativas, por isso abrangem os atributos, metas e objetivos. Podem ser diretamente

mensurados (exemplo: preço do carro) ou se utilizar um critério substituto (exemplo: volume interno como substituto para conforto dos passageiros);

- Valor e Utilidade: para as alternativas, são derivadas pontuações numéricas que medem sua atratividade. Se a decisão não envolve elementos de risco, esta pontuação é chamada de valor da alternativa, caso contrário ela é chamada de utilidade da alternativa.

De acordo com Goodwin & Wright (2004), quando problemas de decisão envolvem vários atributos, um tomador de decisão desassistido tenderá a evitar compensações entre estes atributos. Isto pode levar à seleção de uma opção que se saia bem em apenas um atributo, ou a rejeição de opções relativamente atrativas porque não é permitido um bom desempenho em alguns atributos compensar um mau desempenho em outro. Por exemplo, um fornecedor é escolhido pelo seu baixo preço, a despeito de sua demora de entrega ou péssimo serviço de pós-venda. Este tipo de problema surge devido à limitada capacidade de processar informações da mente humana. Quando confrontado com um problema amplo e complexo, há muita informação a ser processada simultaneamente, logo o decisor é forçado a utilizar estratégias mentais simplificadas, ou heurísticas, de forma a chegar à escolha.

A ideia central é que dividindo o problema em pequenas partes e focando cada parte separadamente o tomador de decisão provavelmente obterá uma melhor compreensão do problema do que seria conseguido por meio de uma visão holística. Após tal análise, o decisor estaria mais bem preparado para explicar e justificar o porquê de uma opção particular ser a preferível.

A seguir é apresentado um dos principais métodos compensatórios dentre os métodos de tomada de decisão com múltiplos atributos: o método de análise hierárquica (*analytic hierarchy process* – AHP). As principais vantagens do AHP com relação a outros métodos compensatórios de MADM são:

- Possibilidade de manipular com facilidade atributos intangíveis. Mesmo não havendo uma série histórica das variáveis intangíveis, basta uma noção qualitativa de importância entre os elementos em consideração (NIEMIRAA & SAATY, 2004);
- Permite detectar e calcular o grau de inconsistências nos julgamentos do tomador de decisão (MUSINGWINI & MINNITT, 2008);

- Permite derivar de dados tanto quantitativos, quanto qualitativos, vetores de prioridades ou pesos que possuem propriedade de escala de razão (FORMAN & SELLY, 2001).

4.2 O AHP

O AHP foi desenvolvido por Thomas L. Saaty durante a sua experiência na Agência de Controle de Armas e Desarmamento no Departamento de Estado dos Estados Unidos. Segundo Saaty (2005b), o AHP é uma teoria de medida relativa utilizada para problemas que envolvem critérios intangíveis ou problemas onde é necessário combinar critérios tangíveis com intangíveis. Nesta abordagem, uma escala de prioridades é derivada de comparações entre os elementos aos pares. Nos métodos de medição tradicionais, tem-se uma escala prévia, onde cada elemento é comparado, um a um, com a escala.

De acordo com Forman & Selly (2001), o AHP é baseado em três axiomas: comparação recíproca, homogeneidade e independência. O primeiro axioma declara que a comparação dos elementos A e B, relativamente ao elemento C a que eles se ligam na hierarquia, deve ser o inverso da comparação de B com A. Por exemplo, se A é 5 vezes maior que B em certa propriedade, B é 1/5 maior que A nesta mesma propriedade. O segundo axioma expressa que, ao se construir uma hierarquia de objetivos, seus elementos devem ser agrupados em níveis de tal forma que os agrupamentos não contenham elementos que difiram por mais de uma ordem de grandeza. O terceiro axioma é necessário para que o problema possa ser estruturado como uma hierarquia. Ele afirma que os julgamentos ou prioridades dos elementos de um nível não podem depender dos níveis inferiores. Caso isto não ocorra, tem-se uma rede e deve-se utilizar o Método de Análise em Redes (*analytic network process* – ANP), que é uma generalização do AHP (SAATY, 2005b).

Segundo Goodwin & Wright (2004), as principais etapas do AHP são:

- Montar a hierarquia de decisão;
- Comparar atributos e alternativas aos pares. Isto é utilizado para se determinar a importância relativa dos atributos em relação ao objetivo e para se determinar o desempenho de cada alternativa com relação aos atributos;

- Transformar as comparações aos pares em pesos (ou vetores de prioridade) e avaliar a consistência dessas comparações;
- Sintetizar as prioridades globais das alternativas por meio do modelo aditivo linear (devido ao axioma 3).

A seguir, estas etapas são detalhadas e explicadas por meio de um exemplo.

4.2.1 Etapa 1: Montagem da Hierarquia

No AHP, atributos são utilizados para medir o desempenho das alternativas em relação aos objetivos do tomador de decisão. Uma maneira útil de se estruturar o problema é por meio de uma hierarquia. Segundo Bhushan & Rai (2004), uma hierarquia indica a relação entre os elementos de um nível com aqueles do nível imediatamente inferior. Na raiz da hierarquia está o objetivo do problema sendo estudado. Suas ramificações são os diversos atributos e subatributos considerados. É importante notar que a comparação dos elementos de um nível qualquer é feita com relação a sua contribuição ao nível imediatamente acima.

A figura 4.1 mostra um exemplo onde o objetivo é escolher a melhor máquina. Os atributos de interesse são confiabilidade, suporte pós-vendas, rapidez de entrega e customização. Há três alternativas (máquinas) sendo consideradas: A, B e C.

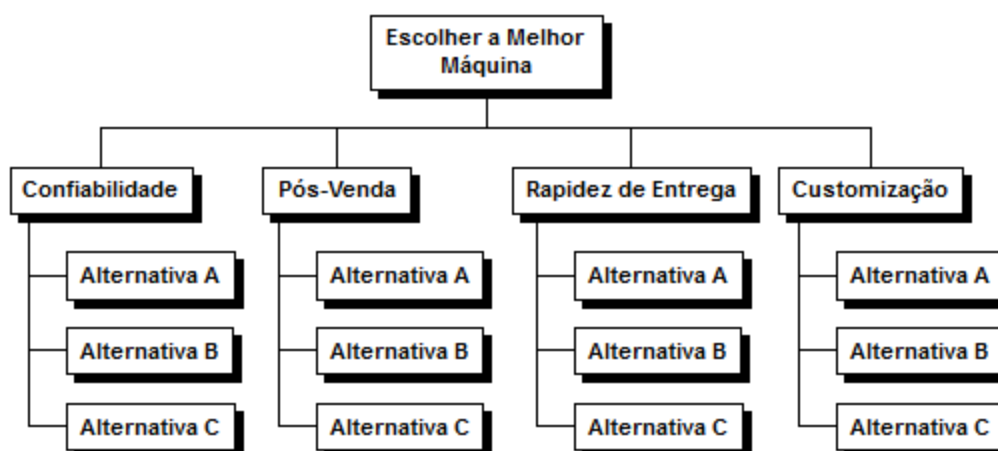


Figura 4.1 – Hierarquia para Exemplificar o Método AHP
(Fonte: Adaptado de Goodwin & Wright, 2004 p.415)

Tendo construído a hierarquia, é necessário julgar se a mesma é uma representação precisa e útil do problema. Goodwin & Wright (2004) sugerem os uso de cinco critérios:

- Totalidade: todos os atributos de interesse foram incluídos;
- Operacionalidade: Os elementos no nível mais baixo da hierarquia são suficientemente específicos para poderem ser avaliados e comparados;
- Decomposição: o desempenho de cada opção pode ser julgado independentemente de seu valor em outros atributos;
- Ausência de Redundância: cada atributo não pode duplicar outros, caso contrário haveria uma “contagem em dobro”, levando certos atributos terem um peso indevido no final;
- Tamanho Mínimo: uma hierarquia excessivamente grande torna uma análise significativa impossível. Atributos não devem ser decompostos além do nível que possam ser medidos. Atributos que não distinguem as alternativas podem ser eliminados.

É necessário achar um “meio termo” para esses critérios, uma vez que eles são conflitantes. Por exemplo, para tornar uma hierarquia operacional é necessário aumentar o seu tamanho.

4.2.2 Etapa 2: Comparação dos Atributos e das Alternativas

A próxima etapa é a comparação aos pares dos elementos de um mesmo nível hierárquico com o elemento do nível superior a que eles se unem (elemento de controle).

Assim, as três alternativas serão comparadas entre si com relação aos atributos confiabilidade, pós-vendas, rapidez de entrega e customização. Para cada atributo é construída uma matriz de comparações. Neste exemplo, para a comparação das alternativas são necessárias quatro matrizes.

Os atributos também serão comparados aos pares, com relação a sua importância no objetivo final. Neste passo, é necessária uma única matriz.

As perguntas feitas para se completar essas matrizes são do tipo: “considerando o objetivo escolher a melhor máquina, qual atributo é mais importante, confiabilidade ou customização, e quanto mais importante?”; “considerando o critério confiabilidade, qual alternativa é preferível, A ou B, e quanto mais?”. A intensidade das comparações é feita utilizando-se a escala fundamental de 1 a 9 de Saaty, como indica o quadro 4.1.

Quadro 4.1 – A Escala Fundamental de Números Absolutos

Intensidade de Importância	Definição	Explicação
1	Igual	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
2	Entre igual e moderada	
3	Moderada	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente uma atividade sobre a outra
4	Entre moderada e forte	
5	Forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
6	Entre forte e muito forte	
7	Muito forte ou importância demonstrada	Uma atividade é favorecida muito fortemente sobre a outra; sua dominância é demonstrada na prática
8	Entre muito forte e extrema	
9	Extrema	As evidências favorecendo uma atividade sobre a outra são da ordem de afirmação das mais altas possíveis
1,1 a 1,9	Quando as atividades são muito próximas, um decimal é somado a 1 para indicar suas diferenças conforme apropriado.	
Recíprocos	Se a atividade <i>i</i> tem um dos números acima quando comparada com a atividade <i>j</i> , então <i>j</i> tem o valor recíproco quando comparada com <i>i</i> .	
Números Racionais	Se houver necessidade de forçar a consistência da matriz	

(Fonte: Saaty & Vargas, 2006, p.3)

Para a construção de cada uma das cinco matrizes de comparações aos pares, deve-se seguir a seguinte lógica. Sempre se compara a dominância (ou importância) do elemento da linha sobre o elemento da coluna, respectivamente aos seus impactos no elemento de controle. Caso a importância do elemento da linha seja menor do que a importância do elemento da coluna, usa-se o recíproco ($1/2$, $1/3$ etc.). Dessa forma, $a_{ij} = 1/a_{ji}$. A comparação de um elemento com ele mesmo é 1, assim a diagonal da matriz é sempre igual a um ($a_{ii} = 1$).

Saaty (2004) explica a lógica deste sistema de medição. Ao fazer comparações aos pares entre elementos homogêneos, proporções são estimadas utilizando-se a escala fundamental de números absolutos para comparar duas alternativas com respeito a um atributo, com a menor alternativa ou a inferior funcionando como a unidade de medida daquele atributo. Para estimar a maior, como um múltiplo daquela unidade, atribui-se a ela um número absoluto da escala fundamental. Este processo é repetido para cada par. Ao invés de

atribuir dois números w_i e w_j e determinar a razão w_i/w_j , atribui-se um único número de 1 a 9 para representar a razão w_i/w_j . O número absoluto da escala é uma aproximação para a razão w_i/w_j . A escala derivada fornece w_i e w_j . Este é o ponto central da abordagem de medida relativa do método AHP.

A tabela 4.1 mostra o exemplo da comparação entre os atributos com relação à sua importância no objetivo. Pode-se perceber, por exemplo, que confiabilidade foi considerada “fortemente mais importante (5)” que rapidez.

Tabela 4.1 – Matriz de Comparações aos Pares dos Atributos em Relação ao Objetivo

OBJETIVO	Confiabilidade	Pós-Vendas	Rapidez	Customização
Confiabilidade	1	4	5	4
Pós-Vendas	1/4	1	3	1/2
Rapidez	1/5	1/3	1	1/3
Customização	1/4	2	3	1

(Fonte: Adaptado de Goodwin & Wright, 2004 p. 417)

4.2.3 Etapa 3: Cálculo dos Vetores de Prioridade e suas Consistências

A próxima etapa é determinar, a partir das matrizes de comparações, a importância relativa de cada elemento sobre o seu elemento de controle (pesos ou vetores de prioridade) e julgar a consistência das matrizes. Por consistência quer se dizer que, por exemplo, se A é duas vezes mais importante que B e B três vezes mais importante que C, A deveria ser seis vezes mais importante que C. Obviamente em situações reais é muito difícil haver uma consistência perfeita. O método AHP permite certo grau de inconsistência e também mostra como calculá-la.

Para cada matriz, calculam-se seus autovalores e respectivos autovetores. Os autovalores (λ) são determinados resolvendo-se a equação 4.1.

$$\det(A - \lambda \cdot I) = 0 \quad (4.1)$$

Onde “*det*” significa o determinante, A é a matriz de comparações aos pares e I é a matriz identidade. Chamando de λ_{max} o maior autovalor, seus autovetores v são calculados a partir da equação 4.2.

$$A \cdot v = \lambda_{max} \cdot v \quad (4.2)$$

Por fim, calculam-se os pesos w (importância relativa ou vetor de prioridades) de cada elemento do nível sobre o elemento de controle normalizando-se o vetor v pela divisão de cada um de seus elementos pela sua soma.

Na prática, as equações 4.1 e 4.2, bem como as demais fórmulas necessárias para a utilização prática do AHP, devem ser implantadas via *software*. O autor da presente tese optou por utilizar o Microsoft Excel (justificativa no capítulo 5) e programou fórmulas na sua linguagem, o *Visual Basic*. Todos os algoritmos do AHP nesta linguagem de programação encontram-se no Apêndice C. Adicionalmente, estes algoritmos foram testados com relação à sua correção aplicando-os a problemas com resultados conhecidos disponíveis na literatura.

Aplicando o algoritmo para o cálculo do vetor de prioridade normalizado pela sua soma (ver Apêndice C1) nos dados da tabela 4.1, obtêm-se os seguintes resultados:

$$\begin{aligned}\lambda_{\max} &= 4,158 \\ v^T &= (0,906; 0,236; 0,117; 0,335) \\ w^T &= (0,569; 0,148; 0,074; 0,209)\end{aligned}$$

Estes valores indicam que a importância relativa dos atributos confiabilidade, pós-vendas, rapidez e customização no objetivo são, respectivamente, 56,9%, 14,8%, 7,4% e 20,9%.

Entretanto, antes de se aceitar estes valores, é necessário avaliar se as comparações fornecidas pelo decisor são consistentes. Para isso, calcula-se a razão de consistência⁴ (*Consistency Rate* – CR) das respostas. Se esta for maior que certo limite, aquela matriz terá de ser refeita (ver seção 4.2.5.3). Segundo Saaty (2005b), os valores admissíveis de CR são no máximo 0,05 para matrizes de ordem 3, no máximo 0,08 para matrizes de ordem 4 e no máximo 0,1 para matrizes de ordem mais alta. A fórmula de cálculo de CR é dada pela equação 4.3.

$$CR = [(\lambda_{\max} - n)/(n - 1)]/RI \quad (4.3)$$

Onde n é a ordem na matriz e RI (*Random Index*) é o índice aleatório, cujos valores são mostrados no quadro 4.2 para matrizes de ordem 3 até 15.

Quadro 4.2 – Índice Aleatório

Ordem	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,59

(Fonte: Saaty, 2005b p.374)

⁴ Na realidade, este índice mostra o grau de inconsistência das respostas.

Para os dados da tabela 4.1, obtém-se uma razão de consistência de 0,059, como indicam os cálculos abaixo. Este valor é menor que o máximo admissível de 0,08 para matrizes de ordem 4, sendo as avaliações da tabela 4.1 julgadas consistentes.

$$CR = [(4,1580 - 4)/(4 - 1)]/0,89 = 0,059$$

O tratamento de matrizes inconsistentes será abordado na seção 4.2.5.3 O algoritmo do procedimento para o cálculo da razão de consistência para uso no Excel encontra-se no Apêndice C2.

4.2.4 Etapa 4: Síntese das Prioridades Globais das Alternativas

A última etapa do método AHP consiste em sintetizar as prioridades. Para isso, suponha que todas as cinco matrizes de comparação aos pares tenham sido obtidas e tenha se aplicado o procedimento anteriormente descrito a todas elas. Considere que os valores obtidos tenham sido aqueles mostrados na figura 4.2.

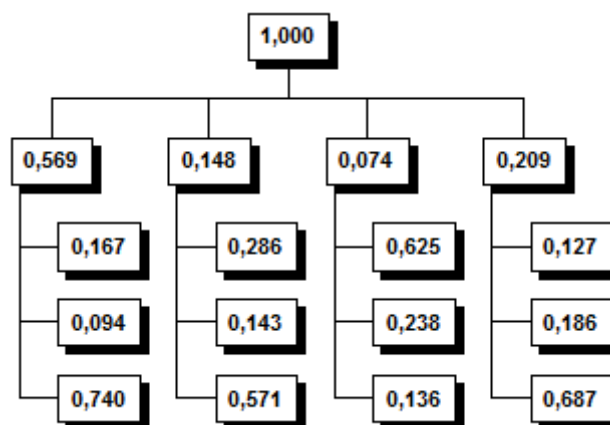


Figura 4.2 – Vetores de Prioridades para o Exemplo da Compra da Máquina
(Fonte: Adaptado de Goodwin & Wright, 2004 p. 418)

A nota final para a alternativa A será:

$$0,569 \times 0,167 + 0,148 \times 0,286 + 0,074 \times 0,625 + 0,209 \times 0,127 = 0,210$$

Aplicando o mesmo procedimento obtém-se para as alternativas B e C as notas 0,131 e 0,659, respectivamente. Portanto, a alternativa C deveria ser escolhida.

A síntese do impacto das alternativas no objetivo é feita por meio de um modelo aditivo linear. De forma genérica, se houver i critérios e j alternativas, como indica o quadro 4.3, a nota final de uma alternativa m qualquer N_m é dada pela equação 4.4.

Quadro 4.3 – Procedimento de Cálculo para o Modelo Aditivo Linear

	Pesos	Notas			
		Alternativa 1	Alternativa 2		Alternativa j
Critério 1	w_1	a_{11}	a_{12}		a_{1j}
Critério 2	w_2	a_{21}	a_{22}		a_{2j}
Critério i	w_i	a_{i1}	a_{i2}		a_{ij}
<i>NOTA FINAL</i>		N_1	N_2		N_j

(Fonte: Elaborado pelo Autor)

$$N_m = \sum_{k=1}^i (w_k \times a_{km}) \text{ sujeito a: } \sum_{k=1}^i w_k = 1 \quad (4.4)$$

4.2.5 Tópicos Adicionais

A teoria vista até este ponto consiste dos fundamentos do AHP. Entretanto, para sua aplicação prática, são necessários alguns detalhes adicionais, que variam entre as aplicações. Nesta seção, não se pretende esgotar o assunto, apenas apresentar cinco tópicos importantes para a aplicação prática do AHP nesta tese. Estes tópicos são relativos a: normalização dos autovetores para o cálculo das prioridades das alternativas; tratamento de atributos cuja estrutura de valor é invertida; tratamento de matrizes de comparações aos pares cujas razões de consistência são maiores que os valores permissíveis (isto é, matrizes inconsistentes); o tratamento de matrizes cujas algumas comparações estão ausentes (matrizes incompletas); e o procedimento de síntese para hierarquias incompletas.

4.2.5.1 Normalização dos Autovetores: Modo Distributivo e Modo Ideal

O primeiro tópico consiste de uma maneira diferente de se normalizar os autovetores para o cálculo das prioridades das alternativas. Na seção 4.2.3, as prioridades das

alternativas foram calculadas normalizando-se os autovetores pela sua soma. Este é o chamado modo distributivo de síntese. Há um segundo modo, denominado de modo ideal de síntese, onde cada um dos autovetores é dividido pelo maior dos valores presentes. Isto é equivalente a dividir as prioridades do modo distributivo pela maior delas. Tomando-se os dados da figura 4.2 seção 4.2.4, os vetores de prioridade w das alternativas sob o critério confiabilidade seriam no modo de síntese ideal:

$$w_A = 0,167/0,740 = 0,226$$

$$w_B = 0,094/0,740 = 0,127$$

$$w_C = 0,740/0,740 = 1,000$$

Dessa forma, utilizando agora o modo ideal, o exemplo da figura 4.2 se alteraria para os seguintes dados, como indica a figura 4.3 abaixo.

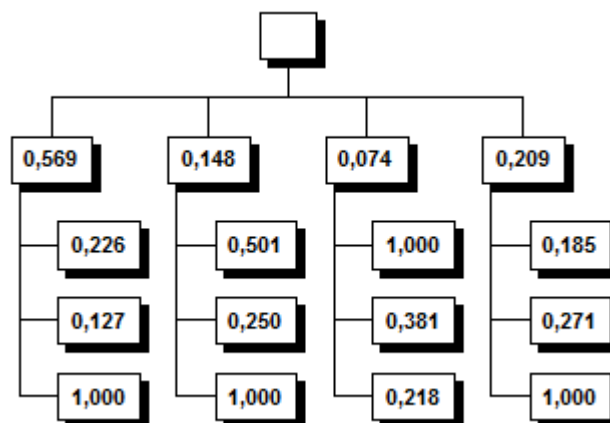


Figura 4.3 – Vetores de Prioridades para o Exemplo da Compra da Máquina pelo Modo Ideal de Síntese

(Fonte: Adaptado de Goodwin & Wright, 2004 p. 418)

O procedimento para a síntese das alternativas é idêntico. A nota final da alternativa A será:

$$0,569 \times 0,226 + 0,148 \times 0,501 + 0,074 \times 1,000 + 0,209 \times 0,185 = 0,315$$

Aplicando o mesmo procedimento obtém-se para as alternativas B e C as notas 0,194 e 0,942, respectivamente. De acordo com Millet & Saaty (2000), estes valores finais não devem ser renormalizados para somar 1. Isto porque os escores finais refletem o quão bem as alternativas desempenharam nos critérios. Por exemplo, o escore final de 0,942 da alternativa C indica que ela está muito próxima de ser a melhor em quase todos os critérios (caso uma alternativa seja a melhor em todos os critérios, ela terá nota máxima 1). Este é o motivo deste modo de síntese se chamar ideal; a melhor alternativa em cada critério é a unidade de referência daquele critério.

A questão que naturalmente surge é o motivo de haver a necessidade de dois modos de síntese diferentes. Pelo exemplo anterior, ficou claro que a única alteração se deu no cálculo dos vetores de prioridade das alternativas apenas. As matrizes de comparações aos pares são independentes do modo de síntese e representam o desempenho das alternativas umas contra as outras. O que mudou foi a derivação das preferências das alternativas a partir de seu desempenho.

No modo distributivo, a preferência por cada alternativa depende do desempenho comparado com todas as demais, pois se divide cada uma delas pela sua soma. Isto implica dependência entre as alternativas. Já no modo ideal, a preferência por cada alternativa se dá pela sua comparação apenas com o desempenho da melhor alternativa sob cada critério. Assim, o modo distributivo indica a dominância de cada alternativa sobre as demais e o modo ideal indica o desempenho de cada alternativa relativo ao *benchmark* de cada critério (MILLET & SAATY, 2000).

De acordo com Forman & Selly (2001), o modo distributivo é equivalente a um sistema fechado, no sentido que a prioridade global do objetivo é 1 e esta prioridade é distribuída aos ramos inferiores da hierarquia. Se novas alternativas são adicionadas ou retiradas, as existentes perderão ou ganharão prioridades, pois a soma é fixa. Assim, no modo distributivo, a escassez e a abundância são relevantes. Por exemplo, a escassez é relevante quando a alta administração vai alocar recursos fixos aos vários departamentos da empresa ou quando ela vai dividir certa quantia para financiar diversos projetos em paralelo. Outro exemplo é em uma eleição para cargo majoritário. Por simplicidade, suponha inicialmente dois candidatos com perfis diferentes. Se um novo candidato entrar na disputa, haverá uma redistribuição de votos. É possível até que o candidato que inicialmente estava em primeiro lugar possa ser ultrapassado pelo segundo. Para isso, basta que o novo candidato tenha um perfil muito parecido com aquele que estava inicialmente na frente. Isso pode ocorrer devido ao fato deste novo candidato tomar proporcionalmente mais votos do primeiro que do segundo.

Forman & Selly (2001) explicam que no modo ideal, ao invés de se distribuir a unidade de prioridade do objetivo aos ramos inferiores, a alternativa preferida sob cada critério recebe a totalidade da prioridade daquele critério e as demais recebem sua quota proporcionalmente a essa alternativa “ideal”. Logo, se alternativas são adicionadas, as prioridades das demais não se alteram (exceto nos critérios que essa nova alternativa porventura for a ideal). Além disso, neste caso, a soma das prioridades aumenta. Dessa forma, este modo de síntese é equivalente a um sistema aberto, onde prioridades podem ser

adicionadas e retiradas e a escassez não é relevante. Assim, se ao se escolher uma das alternativas, as demais são descartadas ou impedidas de serem executadas em paralelo, o modo ideal faz mais sentido (MILLET & SAATY, 2000).

Forman & Selly (2001) apresentam um teste para determinar o modo de síntese mais adequado. Se o propósito da análise for fazer previsões ou priorizar alternativas, o modo distributivo deve ser utilizado. Se o propósito for escolher uma única alternativa, o modo distributivo somente será mais adequado se as demais alternativas ainda forem relevantes após a escolha. Caso contrário, o modo ideal deverá ser o preferido.

O algoritmo do procedimento para o cálculo dos vetores de prioridade no modo ideal para uso no Excel encontra-se no Apêndice C3.

4.2.5.2 Atributos com Estrutura de Valor Invertida

O segundo tópico adicional é relativo ao tratamento de atributos cuja estrutura de valor é invertida. No exemplo apresentado anteriormente da escolha da melhor máquina (ver figura 4.1), todos os critérios apresentados eram positivos, isto é, do tipo quanto maior seu valor, melhor. Ou seja, notas maiores eram mais desejáveis. Entretanto, há variáveis que são exatamente o oposto e o objetivo é minimizá-las (por exemplo, custo de aquisição). Entretanto, o AHP sempre utiliza o menor elemento do par de comparações como a unidade de medida, nunca o contrário. Logo, não devem ser feitas perguntas do tipo “qual é a alternativa mais barata, e quanto mais barata?”, mas perguntas do tipo “qual é a alternativa mais cara, e quanto mais cara?”. Dessa maneira, acaba-se com prioridades maiores representando valores mais indesejáveis. Assim, na síntese dos resultados, essas prioridades não podem ser diretamente agregadas com as demais conforme mostrado anteriormente. Para tratar desta questão, há duas soluções possíveis, dependendo da situação enfrentada. O exemplo a seguir pretende clarificar quando cada uma das duas soluções é a mais adequada.

Considere que se esteja comparando diversos projetos de investimento, cada qual possuindo uma combinação diferente de aspectos positivos e negativos. Análises de investimento normalmente geram conclusões relativas à viabilidade dos projetos, isto é, indicam se os aspectos positivos são maiores ou menores que os negativos. Projetos são

aceitos ou rejeitados com base na diferença ou na razão entre tais aspectos. Todos os projetos podem se mostrar viáveis, inviáveis ou alguma combinação desses resultados.

Por outro lado, suponha agora que se esteja fazendo uma análise tal como o exemplo da compra da máquina da figura 4.1 e, juntamente com os critérios confiabilidade, pós-vendas, rapidez e customização, o custo de aquisição também esteja sendo considerado. Diferentemente do caso anterior, aqui a preocupação não é se a alternativa gera lucros ou prejuízos; o interesse consiste em se determinar aquela que renda a melhor combinação dos custos com os benefícios dos outros critérios. O foco não é aceitar ou rejeitar alternativas; algum curso de ação será impreterivelmente tomado, isto é, alguma das máquinas será comprada. Neste tipo de situação, se todos os critérios fossem negativos, o objetivo seria escolher a alternativa com o menor impacto global.

A solução para o primeiro caso consiste em se alocar prioridades negativas às alternativas nos critérios do tipo quanto maior, pior. (MILLET & SCHONER, 2005; SAATY & OZDEMIR, 2003). Neste procedimento, as alternativas são comparadas com relação a quanto elas são piores que as outras nos critérios negativos, as prioridades são derivadas normalmente pelo modo distributivo ou ideal e, ao final, os valores obtidos são multiplicados por -1 . Se após a síntese, uma alternativa possuir uma prioridade global negativa, seus aspectos negativos ultrapassam os positivos e a alternativa será rejeitada. Ou, alternativamente, se a relação (em módulo) entre os benefícios e os custos for menor que 1, a alternativa também será rejeitada. Para proceder com esta síntese, divide-se a hierarquia em duas sub-hierarquias, uma para os critérios positivos, e outra para os negativos, combinando os resultados por meio de pesos derivados para ponderar cada sub-hierarquia (SAATY & OZDEMIR, 2003). Outra possibilidade é utilizar um método desenvolvido por Millet & Schoner (2005), denominado de AHP bipolar. Tal método é especialmente útil no caso de existência de critérios “mistos”, isto é, critérios onde algumas alternativas possuem prioridades positivas, enquanto outras possuem prioridades negativas.

No segundo caso, o sinal algébrico não importa e quanto mais baixo o valor da desvantagem da alternativa no critério cujo valor é invertido, maior é a sua vantagem. Neste procedimento, as prioridades das alternativas, depois de derivadas, devem ser invertidas. O exemplo a seguir ilustra como é o seu funcionamento.

Suponha 3 objetos A, B e C, que serão comparados com relação ao seu peso, sendo esse atributo um demérito, isto é, quanto maior seu valor, pior a situação. Seguindo o procedimento delineado nas seções anteriores, comparam-se os três objetos, dois a dois, por meio de questões da forma “qual dos dois objetos é mais pesado e quanto mais?”, utilizando-

se a escala de números absolutos. A tabela 4.2 mostra uma matriz de comparação hipotética e suas respectivas prioridades calculadas por meio dos modos de síntese distributivo e ideal.

Tabela 4.2 – Matriz de Comparações aos Pares para o Exemplo Hipotético do Peso de Três Objetos

Peso	A	B	C	Prioridades (Distributivo)	Prioridades (Ideal)
A	1	1,25	5	0,5	1,0
B	1/1,25	1	4	0,4	0,8
C	1/5	1/4	1	0,1	0,2

Inconsistência: 0,000

(Fonte: Elaborada pelo Autor)

Para inverter essas prioridades, de forma que o objeto mais pesado tenha a menor prioridade, devem ser empreendidos os cálculos mostrados a seguir. Para o modo de síntese distributivo, calculam-se os recíprocos de cada prioridade e os normalizam por sua soma:

$$w_A = \frac{1/0,5}{1/0,5 + 1/0,4 + 1/0,1} = 0,138$$

$$w_B = \frac{1/0,4}{1/0,5 + 1/0,4 + 1/0,1} = 0,172$$

$$w_C = \frac{1/0,1}{1/0,5 + 1/0,4 + 1/0,1} = 0,690$$

Para o modo de síntese ideal, calculam-se os recíprocos de cada prioridade e os normalizam pelo maior valor:

$$w_A = \frac{1/0,5}{1/0,1} = 0,20$$

$$w_B = \frac{1/0,4}{1/0,1} = 0,25$$

$$w_C = \frac{1/0,1}{1/0,1} = 1,00$$

Dessa forma, invertem-se as prioridades, mantendo-se sua proporcionalidade original.

O algoritmo do procedimento para o cálculo dos vetores de prioridade invertidos no modo distributivo e ideal para uso no Excel encontra-se no Apêndice C4 e C5, respectivamente.

4.2.5.3 Matrizes de Comparações Inconsistentes

O terceiro tópico adicional trata das matrizes de comparações aos pares inconsistentes, ou seja, cujas razões de consistência são maiores que os valores permissíveis, conforme explicado na seção 4.2.3. Saaty (2003) revisa dois métodos cuja ideia principal é identificar e alterar o elemento da matriz que provoca a maior perturbação no maior autovetor da matriz de comparações aos pares. Contudo, de acordo com Zeshui (2004) e Lamata & Pelaez (2002), este tipo de estratégia, além de ser extremamente lenta e ineficiente, pois vários elementos podem estar causando a inconsistência, também tem o revés de basear os cálculos apenas neste(s) elemento(s) problemático(s). Um modo mais eficiente consiste em utilizar toda a informação contida na matriz para processar os cálculos e, adicionalmente, alterar todos os elementos da matriz simultaneamente. Por meio de um processo iterativo constituído de pequenos passos, chega-se até uma matriz com consistência pré-estabelecida que retém o máximo de informação da matriz original.

Nesta linha de abordagens, um método prático e eficiente foi proposto por Zeshui & Cuiping (1999). Resumidamente, este método consiste dos seguintes passos:

- Passo 1: fazer $k = 0$;
- Passo 2: determinar o maior autovalor $\lambda_{máx}$ da matriz $A^{(k)} = a_{ij}^{(k)}$, seus respectivos autovetores normalizados $w_1^k, w_2^k, \dots, w_n^k$ e a razão de consistência $CR^{(k)}$.
- Passo 3: se a razão de consistência $CR^{(k)}$ for maior que a desejada, determinar a matriz $A^{(k+1)}$ por meio da expressão $a_{ij}^{(k+1)} = \left(a_{ij}^{(k)}\right)^\alpha \left(\frac{w_i^{(k)}}{w_j^{(k)}}\right)^{1-\alpha}$ ($0,9 < \alpha < 1$), somar 1 a k e retornar ao início do passo 2.

Ao final desse processo iterativo, termina-se com uma matriz consistente que pode ser utilizada para a determinação dos vetores de prioridade desejados. O algoritmo deste procedimento para uso no Excel encontra-se no Apêndice C6.

4.2.5.4 Matrizes de Comparações Incompletas

O quarto tópico adicional consiste no tratamento de matrizes de comparações incompletas, isto é, matrizes contendo algumas comparações ausentes.

O método AHP se caracteriza por exigir que os elementos de um mesmo nível hierárquico sejam comparados dois a dois com relação ao seu impacto no nível imediatamente superior a que eles se unem. Dessa forma, uma matriz de comparações de n elementos necessita de $n(n-1)/2$ comparações aos pares. Isto se deve aos fatos de a diagonal da matriz ser sempre 1 e que $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Na realidade, se todas as comparações fossem perfeitamente consistentes, só haveria a necessidade de $n-1$ comparações; as demais seriam totalmente dispensáveis. Entretanto, o método parte do pressuposto que, em se tratando de critérios intangíveis, uma consistência perfeita é impossível. Dessa forma, a redundância fornecida pelas comparações adicionais serve para diminuir o impacto da inconsistência das respostas. É nesse ponto que Saaty (2005b) frisa a necessidade do cálculo do maior autovalor da matriz. Este seria o único método de derivação de prioridades que tem o efeito de “tirar a média” dessas inconsistências⁵. O autor demonstra que as prioridades calculadas a partir do maior autovalor são insensíveis a desvios moderados da consistência perfeita (representados pela razão de consistência da matriz). Este é o motivo de o tópico adicional anterior versar sobre o tratamento de matrizes cuja inconsistência ultrapassava o limite.

Contudo, este aspecto positivo do AHP, de possibilitar a derivação de prioridades a partir de julgamentos moderadamente inconsistentes, em algumas situações práticas se torna um ônus, pois o número de comparações aos pares pode ser muito elevado. Isto é, para se mitigar a inconsistência, faz-se grande número de comparações redundantes. Por outro lado, o grande número de comparações acaba por cansar e confundir o respondente, de forma que isso induz um aumento na inconsistência de suas respostas. Dessa forma, têm sido estudados diversos métodos de derivação de prioridades e/ou síntese de resultados que objetivam diminuir a quantidade de comparações aos pares exigidas para se resolver dado problema.

De acordo com Carmone, Kara & Zanakis (1997) o método proposto originalmente por Harker⁶ é um dos mais práticos para a derivação de prioridades de matrizes incompletas. Estes autores demonstraram, por meio de um extensivo estudo de simulação de Monte Carlo, que neste método é possível deixar de responder aleatoriamente até 50% das

⁵ Há outros métodos de derivação de prioridades baseados na minimização de uma função erro, tal como o método dos mínimos quadrados e mínimos quadrados logarítmicos. Este assunto não será abordado devido ao fato de ser um tema controverso. Saaty (2003) não aceita outro método além do maior autovalor.

⁶ HARKER, P.T. Incomplete Pairwise Comparisons in the Analytic Hierarchic Process. *Mathematical Modeling*, 9 (11), 837–848, 1997.

comparações aos pares e, ainda assim, derivar vetores de prioridade muito próximos daqueles de uma matriz completa. Obviamente, quanto maior o número de comparações, mais próximos daqueles da solução completa serão os vetores de prioridade obtidos.

Resumidamente, o método substitui todos os elementos que faltam por zeros. A seguir, contabiliza-se o número de zeros por linha da matriz. Esse valor é somado ao elemento da diagonal desta linha. Para essa nova matriz, calcula-se seu maior autovalor e respectivos autovetores normalizados pela sua soma. Os elementos faltantes são aproximados pelo valor $a_{ij} = w_i/w_j$, onde w representa o autovetor normalizado. De posse desta matriz reconstruída, é possível empreender todas as operações estudadas até agora. A figura 4.4 ilustra resumidamente este processo. O algoritmo deste procedimento para uso no Excel encontra-se no Apêndice C7.

$$\begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 \\ \frac{1}{3} & 1 & * & * \\ \frac{1}{5} & * & 1 & 3 \\ \frac{1}{7} & * & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 \\ \frac{1}{3} & \boxed{3} & \boxed{0} & \boxed{0} \\ \frac{1}{5} & \boxed{0} & \boxed{2} & 3 \\ \frac{1}{7} & \boxed{0} & \frac{1}{3} & \boxed{2} \end{pmatrix} \Rightarrow w = \begin{pmatrix} 0,59 \\ 0,19 \\ 0,15 \\ 0,07 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 \\ \frac{1}{3} & 1 & \frac{0,19}{0,15} & \frac{0,19}{0,07} \\ \frac{1}{5} & \frac{0,15}{0,19} & 1 & 3 \\ \frac{1}{7} & \frac{0,07}{0,19} & \frac{1}{3} & 1 \end{pmatrix}$$

Figura 4.4 – Diagrama Esquemático do Método de Harker
(Fonte: Elaborada pelo Autor)

4.2.5.5 Hierarquias Incompletas e Ajuste Estrutural

Por fim, o quinto e último tópico adicional consiste no procedimento de síntese para hierarquias incompletas. De acordo com Wedley (1990), hierarquias completas são aquelas onde todos os elementos de um nível têm os mesmos itens abaixo deles. Por outro lado, hierarquias incompletas possuem alguns ou todos os elementos inferiores diferentes. A figura 4.5 ilustra uma hierarquia completa e a figura 4.6 uma hierarquia incompleta.

Segundo Wedley (1990), no caso de hierarquias incompletas, faz-se necessário introduzir um ajuste estrutural para refletir o diferente número de elementos nos níveis inferiores. Se este ajuste for ignorado, estar-se-ia alocando prioridade excessiva aos ramos com poucos elementos e penalizando-se aqueles com grande quantidade deles.

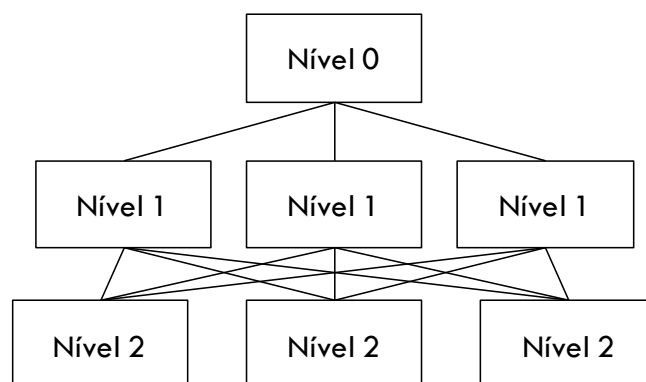


Figura 4.5 – Exemplo de Hierarquia Completa
(Fonte: Elaborada pelo autor)

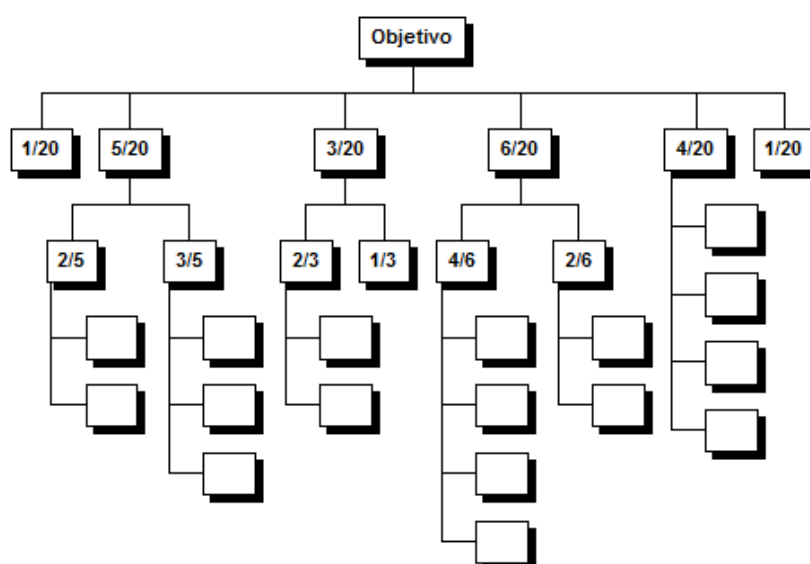


Figura 4.6 – Exemplo de Hierarquia Incompleta
(Fonte: Elaborada pelo autor)

Como se pode notar na figura 4.6, exceto os 6 elementos do primeiro nível que se unem todos ao objetivo, os demais não possuem os mesmos elementos de controle. Na referida figura, há 20 elementos terminais (não possuem nenhum elemento ou nível adicional abaixo). Tome, por exemplo, o segundo elemento da esquerda para a direita do nível 1 da hierarquia. Abaixo dele existem 5 elementos terminais. Portanto sua prioridade (peso) deve ser multiplicada por 5/20. Esse segundo elemento é adicionalmente subdividido em dois na hierarquia. Estas subdivisões também terão o suas prioridades ajustadas, neste caso pelos números 2/5 e 3/5.

Para ilustrar os cálculos envolvidos no procedimento de ajuste estrutural, considere que o vetor de prioridade dos 6 elementos do nível 1 da hierarquia da figura 4.6 sejam, da esquerda para a direita:

- $w_1 = 0,40$; $w_2 = 0,10$; $w_3 = 0,10$; $w_4 = 0,20$; $w_5 = 0,15$ e $w_6 = 0,05$.

Esses valores devem multiplicados pelos números indicados na figura 4.6 dentro dos retângulos do nível 1 da hierarquia e, a seguir, renormalizados para somar 1. Isso gera os seguintes resultados:

$$w_1 = 0,40 \times 1/20 = 0,02$$

$$w_2 = 0,10 \times 5/20 = 0,025$$

$$w_3 = 0,10 \times 3/20 = 0,015$$

$$w_4 = 0,20 \times 6/20 = 0,06$$

$$w_5 = 0,15 \times 4/20 = 0,03$$

$$w_6 = 0,05 \times 1/20 = 0,0025$$

$$\sum_{i=1}^6 w_i = 0,1525$$

$$w'_1 = 0,02/0,1525 = 0,131$$

$$w'_2 = 0,025/0,1525 = 0,164$$

$$w'_3 = 0,015/0,1525 = 0,098$$

$$w'_4 = 0,06/0,1525 = 0,393$$

$$w'_5 = 0,03/0,1525 = 0,197$$

$$w'_6 = 0,0025/0,1525 = 0,016$$

Esse procedimento deve ser executado para os demais ramos da hierarquia, utilizando-se os vetores de prioridade derivados das comparações aos pares e os números indicados na figura 4.6.

Aqui termina a apresentação do AHP. No próximo capítulo estes conceitos serão aplicados para a estruturação do método proposto nesta tese.

5 PROPOSTA DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CONCEITOS DE PRODUTOS

A presente tese tem como objetivo conceber e estruturar um método de avaliação ambiental de conceitos de produtos baseado nas estratégias do DfE e no AHP. Este objetivo foi alcançado por meio de duas etapas. A primeira etapa consistiu basicamente de proposição do método e a outra no seu teste, como ilustra a figura 5.1.

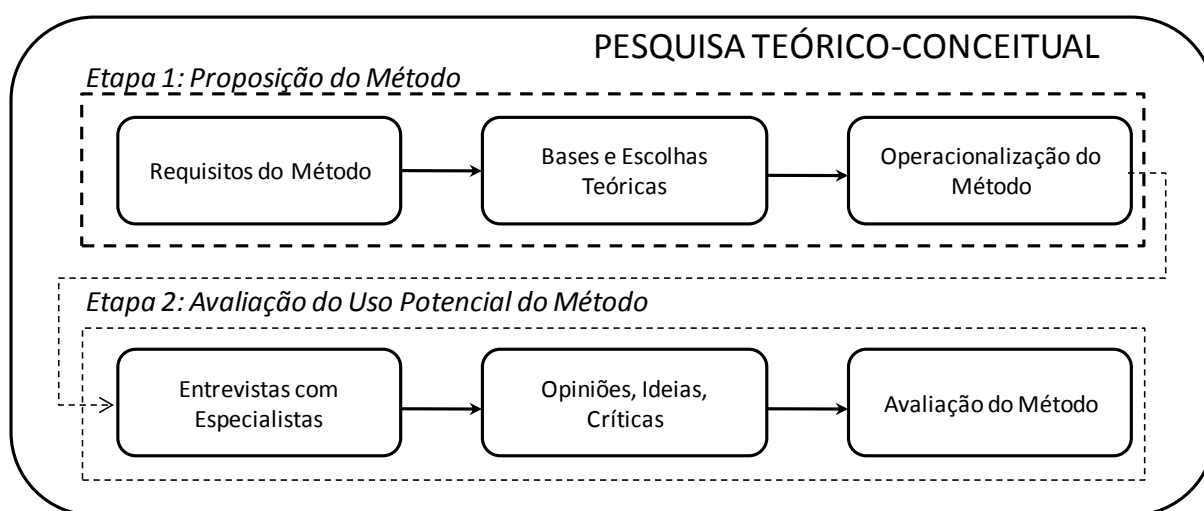


Figura 5.1 – Etapas da Pesquisa
(Fonte: Elaborada pelo autor)

Este capítulo contempla a primeira etapa da figura 5.1, onde será apresentado o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos elaborado a partir da revisão da literatura e guiado pelos requisitos e pelas bases e escolhas teóricas que serão apresentados a seguir. A segunda etapa será abordada no capítulo 6, onde foi avaliado o potencial de utilização prática do método por meio de entrevistas com profissionais ligados ao desenvolvimento de produtos de três empresas e com um consultor em DfE.

Este capítulo está dividido em três seções: os requisitos para a proposição do método, as bases e escolhas teóricas sobre as quais ele foi construído e a sua operacionalização. Essa divisão entre fundamentação teórica e operacionalização tem como objetivo facilitar tanto a exposição do método quanto sua aplicação prática.

5.1 Requisitos para o Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos

Para a definição dos requisitos que iriam orientar o desenvolvimento do método, foi utilizada a ideia de Grubisic (2009). A autora desenvolveu os requisitos para seu método de gerenciamento de riscos por meio de analogia com os requisitos da metodologia de projeto de Pahl *et al.* (2007). O mesmo foi feito aqui e o resultado desse processo encontra-se descrito no quadro 5.1 a seguir.

Quadro 5.1 – Requisitos para o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos

Requisitos para uma metodologia de projeto (Pahl et al., 2007).	Requisitos para o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos (desenvolvidos por analogia)
Permitir um procedimento orientado por problemas, ou seja, deve ser aplicável a qualquer tipo de atividade de projeto, independentemente da especialidade envolvida.	Permitir um procedimento orientado por problemas, ou seja, deve ser aplicável a uma gama de produtos físicos.
Orientar e facilitar a busca de soluções ótimas para produtos técnicos, estimulando a criatividade e a compreensão do problema.	Facilitar a estruturação do problema e orientar o usuário, passo a passo, no processo de avaliação do conceito do produto que mais bem atenda aos critérios do DfE, dentro de um a perspectiva de ciclo de vida do produto.
Ser compatível com conceitos, métodos e conhecimentos de outras disciplinas.	Ser compatível com os conhecimentos consolidados das áreas de gerenciamento de projetos, gestão do PDP, DfE e do raciocínio de ciclo de vida.
Não gerar soluções por acaso.	Ter precisão e não gerar soluções por acaso.
Permitir a transferência de informações sobre o desenvolvimento de produtos entre projetos similares.	Permitir a transferência de informações e conhecimento do DfE entre projetos similares, formalizando e explicitando o conhecimento tácito de seus usuários.
Ser de fácil implementação computacional.	O método deve ser de fácil implementação computacional.
Possibilitar o ensino e a aprendizagem da metodologia.	Oferecer uma forma sistemática de armazenar o conhecimento, facilitando o processo de ensino e aprendizagem do método.
Facilitar o trabalho, economizar tempo e evitar decisões erradas.	Organizar o trabalho, reduzir tempo e evitar decisões inapropriadas, de maneira a harmonizar as demandas ambientais com os demais requisitos do produto.
Facilitar o planejamento e gerenciamento do trabalho em equipe em um PDP integrado e multidisciplinar	Facilitar o trabalho da equipe em um ambiente de desenvolvimento de produto integrado e multidisciplinar
Servir de orientação e diretriz para gerentes de projetos de equipes de desenvolvimento de produtos.	Servir de orientação e diretriz para gerentes de projetos de produtos introduzirem os princípios do DfE no desenvolvimento de produtos.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

O requisito 1 expressa que o método não deve ter um escopo muito restrito de aplicação, caso contrário seu potencial de contribuição é pequeno. Por outro lado, desenvolver algo muito genérico, além de desafiador devido à grande quantidade de variáveis envolvidas, é de pouco uso prático. Assim, faz-se necessário um recorte no objeto de estudo de forma a tornar o método operacional. Como esta tese se utiliza do modelo de gestão do PDP de

Rozenfeld et al. (2006), optou-se por focar o mesmo tipo de produto a que esse modelo se dirige: produtos físicos, principalmente bens de consumo duráveis e bens de capital.

O requisito 2 declara que o ponto de partida para desenvolver os critérios para a avaliação de conceitos são as estratégias do DfE descritas no capítulo 3 (a justificativa encontra-se abaixo nos requisitos 9 e 10). Adicionalmente, deve-se considerar todo o ciclo de vida do produto, evitando-se a soluções subótimas do ponto de vista ambiental. Além disso, deve facilitar a estruturação do problema e orientar o usuário, passo a passo, na sua solução. Por isso, optou-se por dividir a apresentação do método em duas partes. A primeira consistindo das bases e escolhas teóricas e a segunda consistindo da sua operacionalização. Em uma aplicação prática, o usuário pode ir recorrendo à primeira na medida em que essa for necessária. Isto tem cunho didático, facilitando o ensino e a aprendizagem do método, em consonância com o requisito de número 7.

No requisito 3 são expostas as áreas de conhecimento sobre as quais o método se baseia.

Do requisito 4 decorre uma das justificativa pela escolha do AHP como base para o método proposto: ele conjuga rigor matemático com um método intuitivo de estruturação e resolução de problemas com múltiplos critérios.

Os requisitos 5 e 6 exigem que o método torne explícito o conhecimento gerado e, dessa forma, possa ser armazenado computacionalmente e facilmente transferido e reaproveitado. Uma ferramenta computacional fácil, intuitiva e amplamente difundida é a planilha eletrônica. Assim, optou-se por implementar os cálculos do AHP no Microsoft Excel programando-se fórmulas na sua linguagem, o *Visual Basic*. Os algoritmos dessas fórmulas, na referida linguagem de programação, encontram-se no Apêndice C. Foi criado um protótipo de planilha para ser apresentado na ocasião da avaliação do método junto aos profissionais do PDP.

O requisito 8 exige que o método deva ser eficiente e que de alguma maneira seus resultados possam ser agregados a análises sobre o mérito dos conceitos relativamente a outros critérios tais como custo, qualidade etc.. Isso está de acordo com a preocupação do DfE, cujo objetivo é melhorar o desempenho ambiental dos produtos sem comprometer outros critérios fundamentais do produto.

Os requisitos 9 e 10 versam sobre o público-alvo do método. Eles são gerentes de projeto e profissionais de diversas funções ligados ao desenvolvimento de produtos. Isto tem uma implicação importante. O método deve ser expresso de maneira acessível às especialidades envolvida no desenvolvimento, proporcionando uma base comum para o

entendimento e modelagem do problema. Além disso, em sua aplicação, o método não deve exigir demasiada *expertise* ambiental, para que seja possível uma real integração da equipe de projeto em torno da questão ambiental. Portanto, ele deve estar ligado às variáveis sob o controle e o âmbito de atuação desses profissionais e que cuja manipulação seja justamente a solução do problema. Por essa razão, o método proposto nesta tese foi baseado nas Estratégias de DfE e não nas ACV Simplificadas, conforme exposto na seção 3.3.

Dados os requisitos que nortearam o desenvolvimento do método, o próximo passo consiste em combinar os conhecimentos adquiridos das estratégias de DfE com os conhecimentos do AHP. Esta união forma a base científica do método proposto.

5.2 Bases e Escolhas Teóricas

Esta seção visa apresentar as bases e escolhas teóricas do método, geradas a partir da síntese da literatura. As fases a serem explicitadas são a estruturação do problema, cujo principal resultado é a hierarquia, e a construção do modelo de preferência, este contendo a maneira pela qual serão medidas as alternativas e os critérios de avaliação, bem como a síntese das prioridades das alternativas.

5.2.1 Estruturação do Problema

A estruturação do problema inclui definir e organizar os objetivos de forma a se comparar as alternativas. Uma hierarquia é a principal ferramenta na fase de estruturação do problema, pois captura os aspectos considerados importantes para a seleção e ordenamento das alternativas e os dispõem de uma maneira que mostra sua inter-relação.

No AHP, um ponto de partida para a estruturação do problema pode consistir em organizar o problema em três níveis genéricos: objetivo, critérios e alternativas. Caso seja necessário, os critérios podem ser agrupados em critérios mais amplos ou divididos em subcritérios, conforme a necessidade.

Neste trabalho, o objetivo sempre consiste em se avaliar os conceitos com relação aos critérios ambientais. As alternativas também são sempre os conceitos de produtos gerados pela equipe de projeto conforme foi explicado na seção 2.4.1.

Já os critérios para a avaliação das alternativas devem ser derivados das estratégias do DfE apresentadas na seção 3.3. De acordo com Giudice, La Rosa & Risitano (2006), as estratégias do DfE da maneira como foram apresentadas na seção 3.3 são aplicáveis nas etapas de projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado. Na etapa de projeto conceitual elas são úteis para duas coisas. Primeiramente, para se introduzir considerações ambientais no processo de geração dos conceitos dos produtos. Em segundo lugar, elas podem ser condensadas em princípios que formarão a base dos critérios que auxiliarão o projetista a triar e a escolher dentre as ideias geradas inicialmente.

Dado que a eficiência ambiental de um produto depende diretamente do projeto, é de fundamental importância que qualquer estratégia a ser seguida seja relacionada com os parâmetros-chave do projeto. Entretanto, nem todas as estratégias compiladas na seção 3.3 podem ser relacionadas a estratégias de projeto adequadas. Na realidade, algumas delas consistem de intervenções não diretamente ligadas às escolhas de projeto, conforme é explicado a seguir.

Algumas daquelas estratégias relacionam-se com o projeto dos processos produtivos ou com a sua operação. Muito embora a projeto do processo seja de suma importância e intimamente ligado ao desenvolvimento de produto, ele não é diretamente relevante aos objetivos desta tese.

Uma segunda categoria de estratégias a serem desconsideradas são aquelas direcionadas à redução dos recursos utilizados na fabricação do produto e incluem todas as intervenções e escolhas que favorecem a redução do uso de materiais e de recursos energéticos na produção. Em termos gerais, elas podem ser direcionadas a um largo espectro de expedientes relativos não somente ao projeto do produto, mas também ao planejamento dos processos produtivos. Essa categoria também inclui estratégias tais como a desmaterialização e o arrendamento e podem ser alocadas ao domínio das estratégias de negócio.

Na presente tese, a atenção está focada no projeto do produto, este considerado como um objeto material – um conjunto de componentes materiais projetados de forma a constituir um sistema funcional que satisfaz certos requisitos. As dimensões da entidade produto diretamente ligadas às escolhas feitas nas etapas de projeto do produto e cujos parâmetros são atribuíveis de forma precisa às dimensões físicas do produto são: materiais,

formas e dimensões de componentes, arquitetura do sistema, interconexões e junções (GIUDICE, LA ROSA & RISITANO, 2006).

Seguindo a proposta de Giudice, La Rosa & Risitano (2006), serão consideradas apenas as estratégias relacionadas à dimensão física da entidade produto e expressas pelo uso e consumo de recursos materiais. De acordo com esses autores:

“...esta visão parcial do problema ambiental pode parecer limitada, mas na realidade é bem abrangente; o único aspecto completamente ignorado é aquele intervindo sobre os vários processos tecnológicos que constituem o ciclo de vida. (...) Com relação ao modo com que o conteúdo energético e de emissões dos materiais contribuem para os impactos ambientais, ambos são claramente atribuíveis ao fluxo de materiais. Relativamente à energia utilizada para abastecer os processos produtivos e às emissões diretas advindas da mesma, ambas também podem ser geralmente atribuídas aos volumes de materiais ou a parâmetros de processo dependentes de propriedades físicas ou geométricas dos materiais. Estes todos podem ser gerenciados por meio de escolhas no projeto do produto; a definição de materiais e os principais parâmetros geométricos condicionam a escolha dos processos e como esses processos são executados”.

Este foco no fluxo de materiais e, portanto, na dimensão física da entidade produto, permite que sejam excluídas as seguintes estratégias de DfE tratadas na seção 3.3:

- Estratégia 11: identificar materiais e incluir instruções sobre o descarte;
- Estratégia 13: minimizar o consumo de energia dos processos;
- Estratégia 14: minimizar o consumo de energia no transporte e armazenagem;
- Estratégia 17: fonte de energia do processo – utilizar fontes renováveis ou mais limpas de energia;
- Estratégia 30: substituir produto por serviço; arrendar o produto ao invés de vendê-lo;
- Estratégia 34: minimizar a quantidade, o volume e o peso da embalagem;
- Estratégia 35: especificar materiais adequados, padronizar, reciclar e reutilizar a embalagem;
- Estratégia 36: minimizar a geração de resíduos sólido, efluentes líquidos e emissões gasosas durante a produção;
- Estratégia 37: aumentar a eficiência do processo; diminuir, reutilizar e/ou reciclar perdas, reduzir quantidade de materiais;
- Estratégia 38: implantar sistema de gestão de suprimentos verde.

Após essas exclusões, as estratégias restantes foram agrupadas em função da sua relação com os tipos de produtos tratados na seção 3.3, visando determinar quais poderiam ser agregadas em um único critério, como indica o quadro 5.2. Como visto no

capítulo 4, deve-se evitar redundância nos critérios a serem utilizados em aplicações de análise multicriterial.

Deste processo de agrupamento, duas estratégias foram excluídas (não mostradas no quadro 5.2) por estarem contidas em outras mais abrangentes. Foram elas: utilizar materiais melhores e tratamentos superficiais para proteger o produto de sujeira, corrosão e desgaste (estratégia 10), por sua relação com durabilidade (estratégia 25); e concentrar elementos tóxicos, perigosos ou valiosos (estratégia 31), devido a sua relação com desmontagem do produto (estratégia 32).

Quadro 5.2 – Relação entre as estratégias do DfE restantes e os tipos de produtos

Estratégias	Tipo de Produto				
	A	B	C	D	E
1 Minimizar quantidade de materiais e partes e reduzir o peso do produto.	X		X		
33 Reduzir o volume do produto.			X		
3 Utilizar materiais reciclados.	X				
12 Utilizar materiais com baixo conteúdo energético	X				
2 Diminuir a variedade de materiais.	X				X
4 Utilizar materiais recicláveis, compatíveis entre si e com tecnologia de reciclagem eficiente.	X				X
9 Evitar materiais incompatíveis entre si, compósitos, ligas e materiais misturados que não possam ser separados	X				X
5 Evitar o uso de materiais escassos e preferir materiais abundantes ou renováveis.	X				X
18 Selecionar materiais atóxicos e inofensivos e evitar o uso de materiais ou substâncias tóxicas nos componentes.	X				X
6 Restaurar e reutilizar partes e componentes (entre produtos do mesmo modelo ou entre famílias de produtos).	X	X			X
7 Padronizar materiais e componentes	X	X			X
15 Minimizar o consumo de energia em uso.				X	
16 Fonte de energia do produto: dar preferência a fontes de energia renováveis.				X	
8 Eliminar ou minimizar a quantidade dos itens consumíveis do produto.				X	
19 Evitar a utilização dos itens consumíveis tóxicos no produto.				X	
20 Garantir o uso seguro do produto e eliminar o potencial de dano ambiental em caso de falha				X	
21 Minimizar a geração de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas durante o uso do produto.				X	
25 Aumentar a durabilidade do produto	X	X			X
22 Facilitar a manutenção.	X	X		X	
24 Facilitar a atualização e a adaptação do produto a mudanças no desempenho.	X	X		X	
26 Aumentar a confiabilidade.	X	X		X	
29 Otimizar a funcionalidade (projetar produtos multifuncionais).	X	X		X	
23 Facilitar o reparo.	X	X			X
27 Facilitar o reuso do produto.	X	X			X
28 Facilitar a remanufatura do produto.	X	X			X
32 Facilitar a desmontagem do produto.	X	X			X

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Algumas das estratégias do quadro 5.2 foram agrupadas em torno de critérios de avaliação mais genéricos, enquanto outras apenas foram renomeadas de forma adequada,

gerando, então, os critérios para a avaliação ambiental dos conceitos de produtos, como indica o quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Derivação dos critérios para avaliação ambiental dos conceitos de produtos

Estratégias	Critério
1 Minimizar quantidade de materiais e partes e reduzir o peso do produto	1. Peso dos materiais.
33 Reduzir o volume do produto.	2. Volume do produto.
3 Utilizar materiais reciclados.	3. Fração de materiais reciclados no produto.
12 Utilizar materiais com baixo conteúdo energético	4. Energia incorporada nos materiais do produto.
2 Diminuir a variedade de materiais. 4 Utilizar materiais recicláveis, compatíveis entre si e com tecnologia de reciclagem eficiente. 9 Evitar materiais incompatíveis entre si, compósitos, ligas e materiais misturados que não possam ser separados.	5. Grau de reciclagem dos materiais do produto.
5 Evitar o uso de materiais escassos e preferir materiais abundantes ou renováveis.	6. Grau de escassez dos materiais do produto.
18 Selecionar materiais atóxicos e inofensivos e evitar o uso de materiais ou substâncias tóxicas nos componentes.	7. Grau de toxicidade dos materiais do produto.
6 Restaurar e reutilizar partes e componentes (entre produtos do mesmo modelo ou entre famílias de produtos). 7 Padronizar materiais e componentes.	8. Grau de reuso de partes e componentes
15 Minimizar o consumo de energia em uso.	9. Consumo de energia do produto em uso.
16 Fonte de energia do produto: dar preferência a fontes de energia renováveis.	10. Fonte de energia do produto.
8 Eliminar ou minimizar a quantidade dos itens consumíveis do produto. 19 Evitar a utilização dos itens consumíveis tóxicos no produto. 20 Garantir o uso seguro do produto e eliminar o potencial de dano ambiental em caso de falha. 21 Minimizar a geração de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas durante o uso do produto.	11. Impacto ambiental do produto em uso.
25 Aumentar a durabilidade do produto	12. Durabilidade
22 Facilitar a manutenção.	13. Facilidade de manutenção
24 Facilitar a atualização e a adaptação do produto a mudanças no desempenho.	14. Adaptabilidade do produto
26 Aumentar a confiabilidade.	15. Confiabilidade
29 Otimizar a funcionalidade (projetar produtos multifuncionais).	16. Multifuncionalidade
23 Facilitar o reparo.	17. Facilidade de reparo
27 Facilitar o reuso do produto.	18. Grau de reuso do produto.
28 Facilitar a remanufatura do produto.	19. Facilidade de remanufatura
32 Facilitar a desmontagem do produto.	20. Facilidade de desmontagem.

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Por fim, o quadro 5.4 a seguir relaciona estes critérios com os tipos de produtos, segundo a nomenclatura adotada na seção 3.3.

Após a derivação dos critérios de análise, a próxima etapa é a construção da hierarquia. Uma possível solução seria utilizar apenas três níveis: objetivo, critérios e alternativas. Entretanto, há um grande número de critérios a serem considerados na decisão.

Muito embora, dependendo do tipo de produto (quadro 5.4), esse número possa diminuir substancialmente, há a possibilidade de ser necessário utilizar uma quantidade bem próxima do máximo de 20 critérios apresentados no quadro 5.4. Dessa forma, fica impraticável colocar todos os critérios em um mesmo nível hierárquico. Isso porque há a necessidade de se comparar os critérios aos pares de acordo com seu impacto no objetivo. É difícil obter uma consistência adequada para matrizes de comparações aos pares com muitos elementos. Wedley (1990) cita que trabalhos na área da psicologia demonstraram que as pessoas não conseguem processar comparações com mais de 9 elementos simultaneamente. Assim, Wedley (1990) recomenda que se houver mais de 9 itens relevantes, estes devem ser agrupados em dois ou mais conjuntos de natureza similar.

Quadro 5.4 – Relação entre as os critérios de avaliação ambiental de conceitos e os tipos de produtos

Critérios	Tipo de Produto				
	A	B	C	D	E
1. Peso dos materiais.	X		X		
2. Volume do produto			X		
3. Fração de materiais reciclados no produto.	X				
4. Energia incorporada nos materiais do produto.	X				
5. Grau de reciclagem dos materiais do produto.	X				X
6. Grau de escassez dos materiais do produto.	X				X
7. Grau de toxicidade dos materiais do produto.	X				X
8. Grau de reuso de partes e componentes	X	X			X
9. Consumo de energia do produto em uso.				X	
10. Fonte de energia do produto.				X	
11. Impacto ambiental do produto em uso.				X	
12. Durabilidade	X	X			X
13. Facilidade de manutenção	X	X		X	
14. Adaptabilidade do produto	X	X		X	
15. Confiabilidade	X	X		X	
16. Multifuncionalidade	X	X		X	
17. Facilidade de reparo	X	X			X
18. Grau de reuso do produto.	X	X			X
19. Facilidade de remanufatura	X	X			X
20. Facilidade de desmontagem.	X	X			X

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Considerando-se o conhecimento obtido na revisão bibliográfica empreendida e, adicionalmente, os trabalhos de Giudice, La Rosa & Risitano (2006), Kobayashi (2005),

Rombouts (1998), Rose, Ishii & Stevels (2002) e Rose, Stevels & Ishii (2000), propõe-se o seguinte agrupamento de critérios:

1. Volume do produto (critério 2).
2. Materiais.
 - 2.1. Quantidade de materiais.
 - 2.1.1. Peso de materiais (critério 1).
 - 2.1.2. Fração de reciclados (critério 3).
 - 2.2. Tipos de materiais.
 - 2.2.1. Energia incorporada nos materiais (critério 4).
 - 2.2.2. Escassez dos materiais (critério 6).
 - 2.2.3. Toxicidade dos materiais (critério 7).
3. Uso
 - 3.1. Energia
 - 3.1.1. Consumo de energia (critério 9).
 - 3.1.2. Fonte de energia (critério 10).
 - 3.2. Impacto ambiental em uso (critério 11).
4. Vida Útil
 - 4.1. Vida Física
 - 4.1.1. Durabilidade (critério 12).
 - 4.1.2. Facilidade de Manutenção (critério 13)
 - 4.1.3. Confiabilidade (critério 15).
 - 4.1.4. Facilidade de Reparo (critério 17).
 - 4.2. Vida Tecnológica
 - 4.2.1. Adaptabilidade (critério 14).
 - 4.2.2. Multifuncionalidade (Critério 16).
5. Fim de Vida
 - 5.1. Grau de reciclagem de materiais (critério 5).
 - 5.2. Grau de reuso de partes e componentes (critério 8).
 - 5.3. Grau de reuso do produto (critério 18).
 - 5.4. Facilidade de Remanufatura (critério 19).
6. Facilidade de Desmontagem (critério 20)

A figura 5.2 mostra graficamente este agrupamento. Logicamente, em uma aplicação do método aqui proposto, essa hierarquia poderá ter alguns ou vários elementos eliminados da análise.

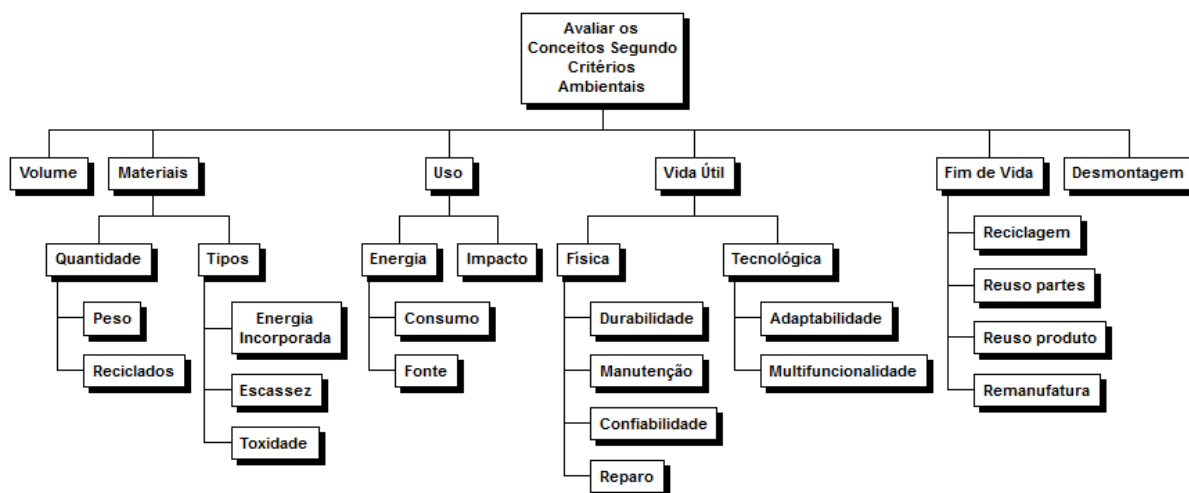


Figura 5.2 – Hierarquia do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Montada a hierarquia, faz-se necessário analisar se a mesma é uma representação adequada do problema. Para realizar este julgamento, recorreu-se aos critérios apresentados na seção 4.2.1. Eram eles: totalidade, operacionalidade, decomposição, ausência de redundância e tamanho mínimo.

Com relação à totalidade, considera-se que todos os atributos de interesse foram incluídos, pois os critérios apresentados foram derivados de uma compilação de estratégias de DfE executada a partir de uma ampla revisão bibliográfica.

Com relação à operacionalidade, considera-se que os critérios são suficientemente específicos para poderem ser avaliados e comparados. No processo de escolha das referências bibliográficas para a compilação das estratégias de DfE (ver seção 3.3.2) houve as seguintes considerações, que garantem a operacionalidade: as estratégias estariam voltadas para os profissionais de desenvolvimento de produtos, isto é, elas estariam relacionadas com decisões tomadas por esses profissionais; as estratégias não seriam apenas altas aspirações morais, mas maneiras úteis de se melhorar o projeto do produto; as estratégias deveriam ser aplicáveis a um número diverso de produtos.

Com relação à decomposição, alguns dos critérios derivados das estratégias de DfE não são totalmente independentes entre si. O critério desmontagem influencia a manutenção, o reparo, a recuperação de partes e componentes para reuso e a reciclagem. A

durabilidade do produto depende da manutenção e da confiabilidade. Manutenção e reparo facilitam o reuso. Portanto, a hierarquia apresentada atende parcialmente ao critério de decomposição. Segundo Lootsma (1999), na prática é muito difícil atender plenamente a esse critério e sobreposições acabam ocorrendo, principalmente em situações complexas, onde há muitos critérios de decisão.

Com relação à ausência de redundância, considera-se que os critérios não duplicam outros, pois houve a preocupação de agregar aqueles que eram comuns, como se pode observar no quadro 5.3.

Com relação ao tamanho mínimo, considera-se que a quantidade de critérios é adequada para se avaliar a questão ambiental na etapa de projeto conceitual. Durante todo o processo de conversão das estratégias de DfE para os critérios de avaliação ambiental de conceitos, houve a preocupação de síntese. As 38 estratégias compiladas originalmente foram reduzidas para 20 critérios. Além disso, como indica o quadro 5.4, não necessariamente todos os critérios serão utilizados simultaneamente.

Resumindo, em face dessas considerações, conclui-se que a hierarquia apresentada na figura 5.2 é uma representação adequada do objeto de estudo. Dessa forma, é possível avançar para o próximo tópico, a construção do modelo de preferência.

5.2.2 Construção do Modelo de Preferência

A segunda etapa das escolhas teóricas é a construção do modelo de preferência. As decisões que devem ser tomadas nesta fase são relativas a:

- Como o desempenho das alternativas (os conceitos dos produtos) será medido em relação aos critérios que compõe o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos representado na hierarquia da figura 5.2;
- Como determinar a importância relativa (pesos) dos critérios da figura 5.2 e como agregar as prioridades até o nível mais alto da hierarquia, ou seja, como calcular o índice global das alternativas para efeito de seu ordenamento e análise de seus pontos fortes e fracos.

Para se medir as alternativas com relação aos critérios, é necessária a definição operacional de cada um deles, bem como, em alguns casos, os parâmetros a serem utilizados para sua avaliação.

O critério 1 compara a relação estimada entre os pesos das alternativas sendo consideradas. Produtos para os quais este critério é relevante são os do tipo A e do tipo C (ver quadro 5.4). Para eles, esta variável tem a estrutura de valor invertida, ou seja, quanto maior a quantidade de materiais, pior é a situação, pois há maior necessidade de extração e processamento de matérias-primas e, além disso, produtos mais pesados gastam mais energia para o seu transporte.

Aqui cabe fazer uma observação com relação à medição do critério 1, mas que serve aos demais critérios. No AHP necessita-se apenas de uma estimativa da razão entre os pares de elementos utilizando-se a escala de números absolutos, que é qualitativa. A natureza aproximada da escala é compensada pela redundância das diversas comparações aos pares e pela insensibilidade do autovalor a desvios moderados da consistência, conforme visto no capítulo 4. Dessa forma, não é necessário saber os pesos e fazer a divisão, mas apenas ter-se a noção qualitativa de quanto um é maior que o outro. O peso é um critério tangível, mas na etapa de projeto conceitual ele pode não ser exatamente conhecido. Ou seja, ele é equivalente a um critério intangível. Esta é a vantagem do uso do AHP na etapa de projeto conceitual: a ferramenta não exige dos dados uma precisão que não é possível de ser alcançada nesta fase do projeto do produto, pois todos os critérios podem ser tratados como se fossem intangíveis.

O critério 2 compara os volumes estimados das alternativas, sendo, também invertido, pois produtos volumosos ocupam maior espaço nos meios de transporte, causando maior gasto energético para seu traslado.

O critério 3 compara a fração de materiais reciclados incorporada nas alternativas. Quanto maior essa fração, menor a demanda pela extração e processamento de matérias-primas novas. Portanto, este critério tem estrutura de valor positiva, ou seja, quanto maior o seu valor, melhor sua avaliação⁷. Entretanto, neste critério, é possível haver alternativas com alguma fração de reciclados e outras não (isto é, 0%). Estas últimas não devem ser comparadas aos pares com as demais, mas receber diretamente prioridade 0. Se nenhuma das alternativas possuir reciclados, este critério pode ser eliminado.

O critério 4 compara a energia incorporada nos materiais das alternativas. Quanto maior a energia incorporada, maior quantidade de energia é necessária na fabricação

⁷ Supõe-se que o material reciclado tenha propriedades físicas adequadas à aplicação. O pressuposto é que seja viável substituir o material puro por certa quantidade de material reciclado.

dos materiais do produto (ver quadro 3.10, seção 3.3.2.2), aumentando os impactos ambientais desses materiais. Portanto, esse critério é do tipo invertido.

O critério 5 é relativo ao grau de reciclagem dos materiais das alternativas, ou seja, a proporção dos materiais que podem ser reciclados. Este critério é do tipo positivo, pois quanto maior esse grau, menor é a necessidade do processamento de novos materiais e menor a quantidade de materiais descartados (por exemplo, em aterros). O grau de reciclagem é influenciado pela variedade de materiais presentes no produto, a existência de combinações de materiais incompatíveis entre si (ver quadro 3.8 e 3.9, seção 3.3.2.1) e as tecnologias de reciclagem existentes. Aqui valem as mesmas observações relativas ao critério 3 com respeito à existência de algumas ou todas alternativas com 0% de grau de reciclagem.

O critério 6 compara o grau de escassez dos materiais que compõem as alternativas. Materiais escassos são aqueles cujo tempo de depleção (tempo das reservas conhecidas) é curto (ver quadro 3.7, seção 3.3.2.1). É um critério invertido, pois, do ponto de vista ambiental, o ideal é a utilização de materiais renováveis ou que não tenham previsão de restrição de fornecimento em curto e em médio prazo.

O critério 7 avalia a toxicidade dos materiais das alternativas. Dependendo dos tipos de conceitos de produtos existentes na análise, este critério deve ser avaliado de maneira diferente dos anteriores. Há três situações distintas.

O primeiro caso é se nenhum dos conceitos contiver substâncias tóxicas ou perigosas. Nesta situação, o critério não é importante e pode ser eliminado.

O segundo caso é se todos os conceitos contiverem substâncias tóxicas. Uma suposição é que a sua presença se deva a necessidades tecnológicas do produto. Ou seja, a ausência de conceitos sem substâncias tóxicas indica a impossibilidade de se abrir mão de seu uso. Sob esta hipótese, este critério pode ser tratado como um critério invertido, sendo a maior nota alocada ao “menor dos males”.

O terceiro caso é aquele onde alguns conceitos não contêm substâncias tóxicas, enquanto outros as possuem por proporcionarem ganhos em outros critérios. Por exemplo, lâmpadas fluorescentes contêm elementos tóxicos (mercúrio), mas possuem maior eficiência energética durante o uso do que as lâmpadas incandescentes (THOMPSON, 1999). Aqui, foi necessário adaptar o procedimento proposto Millet & Schoner (2005). Inicialmente, as alternativas são separadas em dois grupos, as que contêm e as que não contêm elementos tóxicos. As alternativas que não contêm elementos tóxicos são opções neutras. Por isso, não são comparadas aos pares e recebem prioridade 0. Para as demais, o procedimento é derivar as prioridades como se o critério fosse positivo e no final multiplicá-las por -1 (seção 4.2.5.2).

Dessa forma, a pior alternativa, no modo de síntese ideal, fica com prioridade -1 . A pergunta que deve ser feita é do tipo: “qual alternativa é pior (maior toxicidade), e quanto mais?”.

O critério 8 compara o grau de possibilidade de reuso de partes e componentes das alternativas. Do quadro 5.3 nota-se que este critério é influenciado pelo grau de padronização das peças e componentes. É um critério positivo, pois quanto maior este grau, menos partes novas serão necessárias, diminuindo o uso de recursos e o impacto ambiental devido ao descarte. Sob este critério, assim como os de números 3 e 5, as alternativas podem apresentar possibilidade de reuso zero, valendo, assim, as mesmas considerações relativas a aqueles critérios.

O critério 9 é importante para produtos que consomem energia durante o uso. Quanto maior o consumo de energia, maior o impacto ambiental do produto. A avaliação desse critério é similar à avaliação da toxicidade. Se todas as alternativas consomem energia, o critério é invertido. Se algumas consumirem energia e outras não, as primeiras recebem prioridades negativas e as últimas prioridade 0.

O critério 10 também é importante para produtos ativos e compara o quanto um tipo de fonte de energia de um produto é mais benigno que outra sendo, portanto, um critério positivo. Logicamente, este critério só é importante caso haja alternativas com fontes de energia diferentes. Segundo Graedel & Grenville (2005) as seguintes fontes de energia são em ordem crescente de impacto ambiental: fontes renováveis exceto hidroelétrica, incluindo aquelas derivadas de hidrogênio não originário de hidrocarbonetos; hidroelétrica e hidrogênio originário de hidrocarbonetos; gás e nuclear; petróleo e carvão.

O critério 11 compara o impacto ambiental das alternativas que utilizam itens consumíveis (quantidade e toxicidade), que podem representar potencial de dano ambiental em caso de falha ou que geram resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas durante seu uso. Sua avaliação é similar aos critérios 7 e 9. Caso todas as alternativas causarem esses problemas, o critério é invertido. Se algumas forem problemáticas e outras não, as primeiras recebem prioridades negativas e as últimas prioridades zero.

O critério 12 compara a durabilidade das alternativas. Produtos para os quais este critério é relevante são os do tipo A, B e E (ver quadro 5.4). Para tais produtos, esta variável tem a estrutura de valor positiva; quanto maior a durabilidade, menor a necessidade da extração e processamento de novos materiais e menor a quantidade de materiais descartados.

O critério 13 compara a facilidade de manutenção relativa das alternativas. Uma manutenção apropriada ajuda a evitar os impactos ambientais de reparos, do descarte e

da produção de um novo produto. Como foi visto na seção 3.3.2.4, as seguintes diretrizes podem auxiliar na avaliação da facilidade de manutenção das alternativas: facilidade de acesso e de desmontagem dos componentes que passarão por manutenção; facilidade de acesso às partes a serem limpas; o arranjo e a facilidade de substituição de partes que se deterioram mais rapidamente; o grau de agrupamento de componentes de acordo com as propriedades físicas, mecânicas, níveis de confiabilidade e funções compartilhadas; facilidade de diagnóstico de quais são as partes que irão necessitar de manutenção; os tipos ferramentas de manutenção necessários (fáceis de utilizar, padronizados, etc.); e projetos que impliquem menos manutenção. Este critério é do tipo positivo.

O critério 14 compara a facilidade com que as alternativas são adaptáveis e podem ser atualizadas. Como a adaptação e a atualização podem estender a vida do produto, diminuindo, dessa maneira, o consumo de recursos e a geração de resíduos, este é um critério do tipo positivo. As seguintes diretrizes auxiliam na avaliação deste critério (seção 3.3.2.4): grau de modularidade do design; grau com que a arquitetura do produto é reconfigurável, permitindo sua adaptação a diferentes ambientes; grau com que função, desempenho e estética são adaptáveis à evolução e mudanças do usuário.

O critério 15 é relativo à confiabilidade. Uma vez que produtos mais confiáveis devem ser consertados ou substituídos com menor frequência, este critério é do tipo positivo. Na seção 3.3.2.4, foi visto que a confiabilidade é influenciada pelo número de componentes, pela complexidade do produto e pelos tipos de uniões entre os componentes.

O critério 16 relaciona-se com a multifuncionalidade das alternativas. Produtos multifuncionais são melhores do ponto de vista ecológico na medida em que a mesma quantidade de material proporciona um nível maior de funcionalidade. Logo, este é um critério do tipo positivo.

O critério 17 compara a facilidade de reparo das alternativas. As vantagens ambientais do reparo são semelhantes às da manutenção. Da mesma maneira que aquele critério, este também é positivo. Na seção 3.3.2.4 foram fornecidas diretrizes que podem auxiliar na avaliação deste critério: facilidade de acesso a partes a serem reparadas; intercambiabilidade e padronização das partes; facilidade de remoção e remontagem de componentes críticos sujeitos à deterioração e avarias; facilidade de diagnosticar a necessidade de reparos; e facilidade de reparo *in loco*.

O critério 18 é relativo ao reuso direto do produto. O reuso permite obter os benefícios ambientais advindos da redução do processamento de materiais e partes novas. Provavelmente, antes de ser utilizado novamente, o produto deverá ser checado e reparado.

Dessa forma, este critério avalia viabilidade das alternativas consideradas serem reutilizadas. Por isso, este é um critério positivo. Na seção 3.3.2.4, foram fornecidas as seguintes diretrizes relativas ao reuso do produto: resistência dos componentes irrecuperáveis passíveis de danos; facilidade de acesso e remoção dos componentes recuperáveis; modularidade, padronização e grau de substituição de componentes; possibilidade de utilização secundária do produto.

O critério 19 avalia a facilidade de remanufatura das alternativas. A remanufatura é o processo de recondicionar produtos desgastados pelo uso e retorná-los a uma condição próxima a de um novo. Os benefícios da remanufatura são semelhantes ao do reuso, porém em menor grau. É, também, um critério positivo. As seguintes diretrizes podem ser úteis para se avaliar a facilidade de remanufatura do produto: facilidade de remoção e substituição de componentes recuperáveis; facilidade de separar as partes estruturais dos componentes externos; facilidade de acesso aos componentes a serem remanufaturados.

O critério 20 avalia a facilidade com que as alternativas podem ser completamente desmontadas. É um critério com impacto em manutenção, reparo, recuperação de partes e componentes para reuso e reciclagem. Como visto na seção 3.3.2.5, a facilidade de desmontagem depende dos seguintes parâmetros: quantidade de uniões e interfaces; simplicidade da arquitetura do produto, quantidade de componentes e número de partes em cada nível de desmontagem; facilidade de acesso aos componentes; sequência de desmontagem; facilidade de separação de componentes e materiais, incluindo os incompatíveis; reversibilidade dos sistemas de união; número de paralelismos presentes no processo de desmontagem; e facilidade de identificação dos materiais contidos no produto pelo indivíduo que procederá com o desmonte. É um critério positivo.

Por fim, com respeito à avaliação das alternativas com relação aos critérios ambientais, cabe lembrar que o modo de síntese adequado é o modo de síntese ideal, pois uma vez que o conceito seja escolhido e a equipe de projeto avance para a próxima etapa do projeto do produto, as alternativas preteridas não são mais importantes (ver seção 4.2.5.1).

Tendo finalizado a questão da medição do desempenho das alternativas com relação aos critérios que compõem o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos, o próximo passo consiste em se determinar como a importância relativa (pesos) dos critérios será obtida e como as prioridades serão agregadas até o nível mais alto da hierarquia.

Prescritivamente, o ideal seria fornecer os pesos de todos os critérios e de seus agrupamentos em função dos tipos de produtos adotados (tipo A, tipo B, etc.). Contudo, do ponto de vista da aplicação do método, isso tiraria do usuário a possibilidade de priorizar os critérios que mais se alinham à estratégia de seu desenvolvimento de produto. Por exemplo, e

se o método fornecesse um alto peso para o reuso de componentes, mas isso no momento não fosse viável para a empresa, ou se a mesma não tivesse um sistema para pegar de volta essas partes? A prescrição de uma estratégia adequada é mais importante para gerar ideias para melhorias futuras do que na avaliação dos conceitos, onde outros aspectos devem ser considerados. Neste exemplo, a situação ideal não coincide com o que pode ser feito no momento.

Do ponto de vista operacional, também é complicado fornecer pesos fixos e absolutos. Isso é contrário à proposta da decisão multicriterial, que visa prover um arcabouço teórico para que a pessoa que esteja tomando a decisão modele o seu problema e ganhe *insights* em como resolvê-lo da melhor forma possível dada as suas condições de contorno. E as condições nas quais a decisão é tomada são fundamentais. Por exemplo, de forma absoluta, o critério toxicidade é extremamente importante. Contudo, se todas as opções a disposição tiverem o mesmo grau de toxicidade, o critério perde importância frente aos demais.

Aliado a isso, o estágio atual do conhecimento na área não permite que se afirme o que é melhor de ser feito em cada situação específica. O autor desta tese empreendeu diversas buscas na bibliografia na tentativa de determinar a importância relativa dos critérios que fazem parte do método aqui proposto. Foi possível apenas encontrar sugestões de priorização de alguns critérios e, ainda assim, sob condições muito genéricas. A determinação empírica do peso relativo dos critérios ambientais sob condições específicas demanda pesquisas com este foco apenas. Isso foge do escopo do presente trabalho. Dessa forma, optou-se por compilar e apresentar na forma de sugestões a importância relativa de alguns dos critérios, cabendo a decisão final ao usuário do método.

Com relação aos materiais, Rombouts (1998) fornece dados que permitem determinar os pesos relativos dos agrupamentos Quantidade de Materiais e Tipos de Materiais. Muito embora o autor não tenha utilizado a mesma tipologia adotada aqui, foi possível deduzir quais eram. Pelo quadro 5.4 nota-se que esta ponderação só é necessária para produtos do tipo A. Para esses produtos, a quantidade de materiais é um pouco mais importante que o tipo de materiais. Se for utilizado o número 2 da escala absoluta do AHP, ter-se-ia os pesos $2/3$ e $1/3$ para a quantidade e o tipo de materiais, respectivamente.

A partir dos trabalhos de Giudice, La Rosa & Risitano (2006), Kobayashi (2005) e Rose, Ishii & Stevels (2002) é possível tecer considerações a respeito da importância relativa dos agrupamentos Vida Física e Vida Tecnológica e sobre a importância relativa dos critérios do agrupamento Fim de Vida. Grosso modo, tal importância é dependente de duas variáveis: o ciclo tecnológico do produto e o tempo até o seu desgaste físico. O primeiro é um

fator externo, enquanto o segundo é dependente do projeto. A figura 5.3 ilustra o ciclo tecnológico versus o tempo de desgaste para alguns produtos. O ciclo tecnológico indica quanto tempo leva até o produto ficar tecnologicamente obsoleto. O tempo de desgaste é o tempo até a deterioração física do produto.

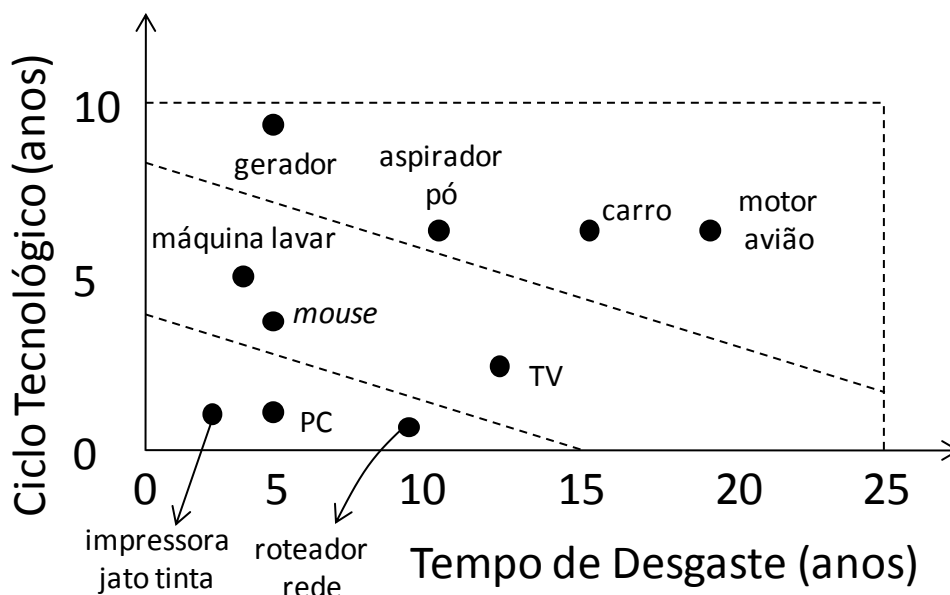


Figura 5.3 – Ciclo Tecnológico e Tempo de Desgaste para Alguns Produtos
(Fonte: Adaptado de Rose, Stevels & Ishii, 2000 p. 102)

A combinação entre ambos os tempos indica quais critérios devem ser priorizados. A figura 5.4 é relativa ao agrupamento vida física e vida tecnológica e a figura 5.5 é relativa aos critérios de fim de vida.

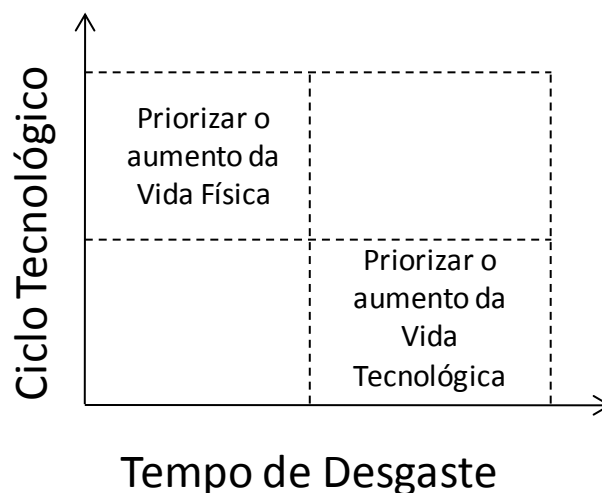


Figura 5.4 – Priorização entre Vida Física e Vida Tecnológica
(Fonte: Elaborada pelo Autor a partir de Giudice, La Rosa & Risitano, 2006, Kobayashi, 2005 e Rose, Ishii & Stevels, 2002).

A figura 5.4 mostra que produtos que se tornam obsoletos rapidamente, mas cujos componentes são duráveis o bastante, são candidatos a aumento de vida tecnológica por meio de atualização ou projeto para multifuncionalidade. Ou seja, esses dois critérios são mais importantes que os outros. Por outro lado, são candidatos a prolongamento de vida útil (por meio de manutenção, reparo, aumento de durabilidade e de confiabilidade) aqueles produtos cujo ciclo tecnológico é longo, mas que possuem partes e conjuntos que se deterioram rapidamente. As lacunas na figura 5.4 indicam que produtos que têm ciclo tecnológico compatível com o tempo de desgaste (ambos curtos ou longos) estão em uma situação “eficiência ambiental” (GIUDICE, LA ROSA & RISITANO, 2006).

Segundo Giudice, La Rosa & Risitano (2006) e Rose (2001), do ponto de vista ambiental, as melhores estratégias de fim de vida são, em ordem decrescente de importância, o reuso do produto, sua remanufatura, reuso de componentes e a reciclagem. Entretanto, nem sempre esta ordem é estritamente seguida, pois, em algumas situações, nem todas são adequadas, como indica a figura 5.5.

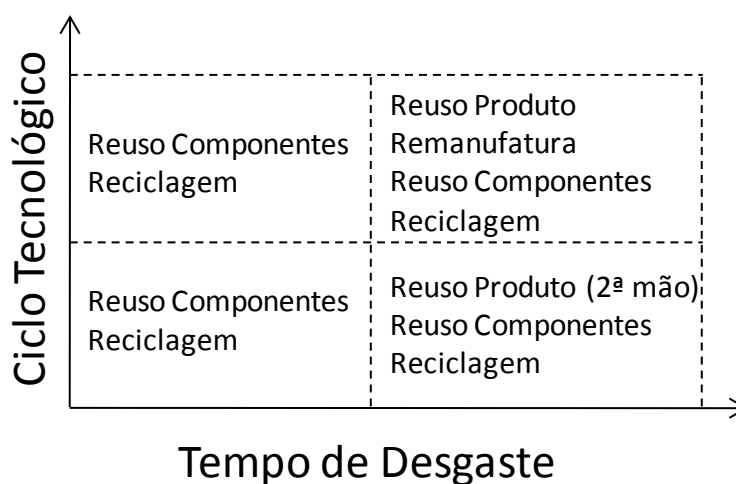


Figura 5.5 – Priorização entre Critérios de Fim de Vida

(Fonte: Elaborada pelo Autor a partir de Giudice, La Rosa & Risitano, 2006, Kobayashi, 2005 e Rose, Ishii & Stevels, 2002).

Quando o tempo de desgaste é rápido e o ciclo tecnológico também, não há como reutilizar o produto diretamente, pois suas partes estão desgastadas. Trocar essas partes (remanufatura) não é viável, pois elas são em grande quantidade e o produto ficou obsoleto. Logo, deve-se tentar reciclar os materiais e reutilizar algumas partes que porventura estejam em bom estado. No geral, provavelmente a reciclagem é mais importante que o reuso de componentes, pois, como o produto ficou obsoleto, estes poucos componentes que restarem terão que ser reaproveitados em outro modelo de produto, o que nem sempre é possível.

Quando o tempo de desgaste é curto e o ciclo tecnológico é longo, não há como reutilizar o produto. A remanufatura não é economicamente viável devido à necessidade de troca de muitos componentes. Novamente, a reciclagem e o reuso de componentes são viáveis. Mas, ao contrário do caso anterior, aqui é possível reutilizar as partes que porventura estejam boas no mesmo modelo de produto, pois este muda mais lentamente.

No caso de ciclo tecnológico curto e desgaste lento, o reuso do produto é possível na seguinte situação particular: o produto foi lançado originalmente como topo de linha, ficou rapidamente obsoleto e pode ser reutilizado como um produto no segmento médio; ou o produto era do segmento médio e pode ser reutilizado no segmento popular (ROSE, STEVELS & ISHII, 2000). Em ambos os casos, sua reutilização é como um produto de segunda mão. Novamente, é possível reutilizar componentes em outros produtos e reciclar materiais. Como a quantidade de componentes reutilizáveis é maior neste caso, seria interessante a empresa projetar partes intercambiáveis entre suas famílias de produtos, visando à possibilidade de tal reuso.

Por fim, quando tanto o tempo de desgaste e o ciclo tecnológico são longos, todas as estratégias de fim de vida são viáveis.

A última atividade da etapa de construção do modelo de preferência é determinar como agregar as prioridades até o nível mais alto da hierarquia, ou seja, como calcular o índice global das alternativas para efeito de seu ordenamento e análise de seus pontos fortes e fracos. O AHP utiliza para síntese o modelo aditivo linear. No entanto, a hierarquia dos critérios ambientais é incompleta (ver figura 5.2). Dessa maneira, o ajuste estrutural explicado na seção 4.2.5.5 deve ser aplicado. Porém, dependendo da aplicação do método aqui proposto, a quantidade de critérios é variável. Assim, o ajuste estrutural também o é. Para facilitar, no protótipo de planilha criado para a execução dos cálculos do AHP, também foi montada uma tabela, utilizando as funções do Excel, que automaticamente calcula a quantidade de critérios, aplica o ajuste estrutural e a síntese pelo modelo aditivo linear (ver exemplo numérico na seção 5.3 a seguir e no Anexo D).

Aqui termina a etapa de escolhas teóricas. A seguir, o método de avaliação ambiental de conceitos é operacionalizado.

5.3 Operacionalização do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos

A operacionalização do método tem como objetivo orientar o usuário, passo a passo, na sua execução. Esta seção visa descrever, em ordem sequencial, as fases, etapas e atividades necessárias para a aplicação prática do método de avaliação ambiental de conceitos de produtos. Adicionalmente às atividades, também é preciso deixar claro quais tipos de decisões o usuário terá de tomar ao longo da aplicação, bem como as ferramentas adequadas em cada etapa. De forma a tornar isso possível, inicialmente o método foi modelado por meio da notação IDEF0.

Segundo Vernadat (1996), o IDEF0 é uma notação composta de símbolos gráficos e texto, sendo muito prática para definir a funcionalidade de um sistema utilizando o princípio da decomposição funcional. A notação é composta de dois construtos: uma caixa de função para representar atividades e setas para conectá-las. A caixa de função representa uma atividade ou grupo de atividades percebidas como um todo, que transforma entradas em saídas sob a influência de um controle utilizando os mecanismos fornecidos, como indica a figura 5.6.

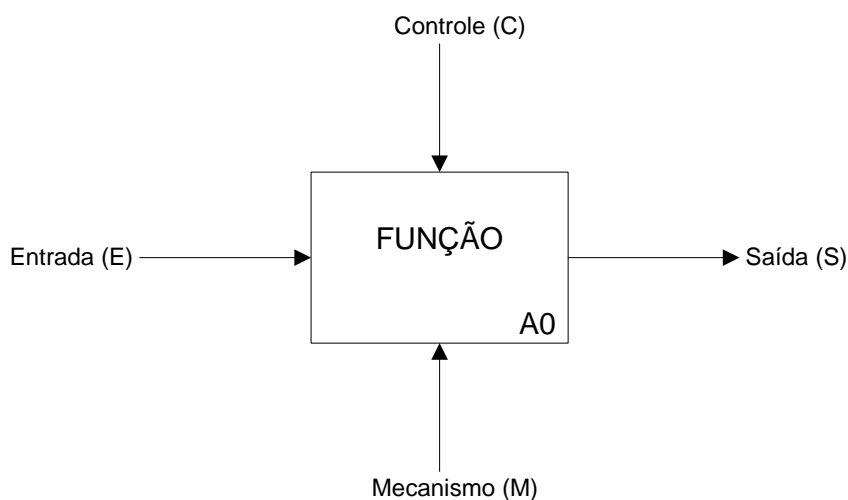


Figura 5.6 – A Caixa de Função ECSM do IDEF0
(Fonte: Vernadat, 1996 p. 128)

A caixa de função é um construto recursivo, que pode ser utilizado para representar tanto processos quanto atividades, em qualquer nível de detalhe. As entradas são os objetos a serem processados ou transformados pela função e podem ser informações ou objetos físicos. Os controles são definidos na forma de informação. Eles são utilizados para ativar, regular ou sincronizar a função. Os mecanismos podem representar informação e/ou recursos físicos. Exemplos incluem bancos de dados, máquinas, sistemas e operadores humanos. As saídas são objetos processados ou transformados pela função e podem ser

informações ou objetos físicos. As saídas de uma função podem ser utilizadas como entradas de outras. Se a saída for uma informação, ela pode ser utilizada como entrada, controle ou mecanismo por outra função. Caso seja um objeto físico, ela só pode ser utilizada como entrada ou mecanismo por outra função.

Na modelagem por meio do IDEF0, inicia-se com um diagrama que fornece uma visão macroscópica do sistema (diagrama A0) e, na medida em que se faz necessário, este é detalhado em diagramas posteriores. Esses diagramas são numerados e apresentados sequencialmente. Por exemplo, o diagrama A2 é o detalhamento da segunda atividade do diagrama A0; o diagrama A2.1 é o detalhamento da primeira atividade do diagrama A2, e assim sucessivamente. Para modelar o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos, foram utilizados os seguintes diagramas:

- Diagrama A0: Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos (Figuras 5.7 e 5.8);
 - Diagrama A1: Montagem da Hierarquia (Figura 5.9);
 - Diagrama A2: Derivação das Prioridades das Alternativas e dos Critérios (Figura 5.10);
 - Diagrama A2.1: Derivação das Prioridades das Alternativas (Figura 5.11);
 - Diagrama A2.2: Derivação das Prioridades dos Critérios e Agrupamentos de Critérios (Figura 5.12);
 - Diagrama A3: Síntese dos Resultados – Prioridade Global das Alternativas com Relação ao Objetivo (Figura 5.13).

A modelagem pela notação IDEF0 é simples de ser lida e entendida. Entretanto, ela não deixa muito claro os pontos onde ocorrem decisões e quais são os cursos alternativos de ação devido a essas decisões. Para esse fim, foi utilizado um fluxograma, como indica a figura 5.14.

A seguir, as atividades e decisões para a operacionalização do método são explicitadas. Também é mostrado um exemplo numérico que ilustra parcialmente a aplicação do método para um produto hipotético, de forma a facilitar o entendimento das suas fases e etapas e como utilizar as planilhas em Excel que o implementa computacionalmente. O exemplo numérico completo encontra-se no Anexo D. Neste exemplo, assume-se que há 4 conceitos sendo avaliados e que o produto em questão é um produto do tipo E (intensivo no descarte).

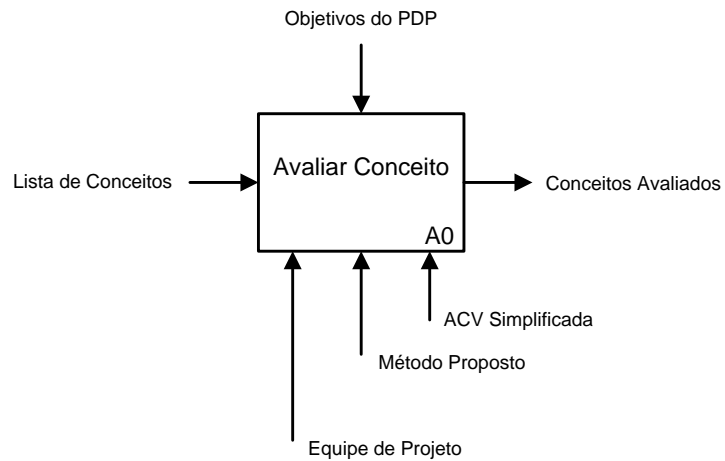


Figura 5.7 – Visão Geral do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos
(Fonte: Elaborada pelo autor)

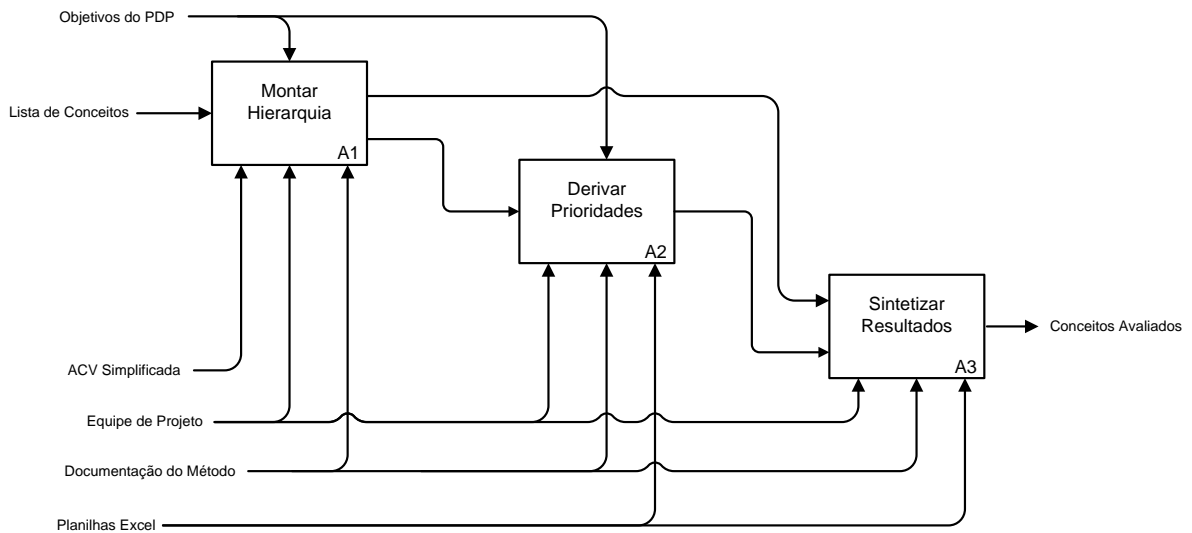


Figura 5.8 – Visão Detalhada das Fases do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos
(Fonte: Elaborada pelo autor)

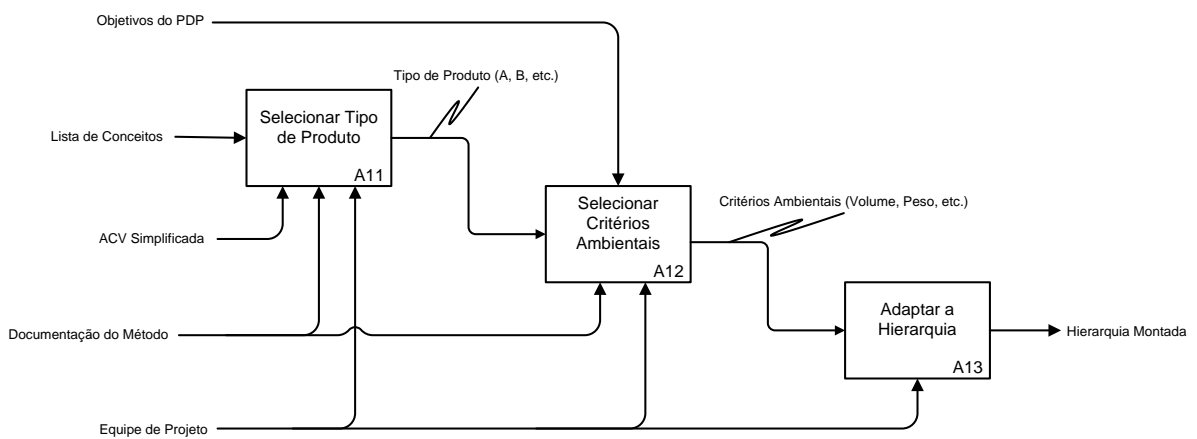


Figura 5.9 – Fase de Montagem da Hierarquia
(Fonte: Elaborada pelo autor)

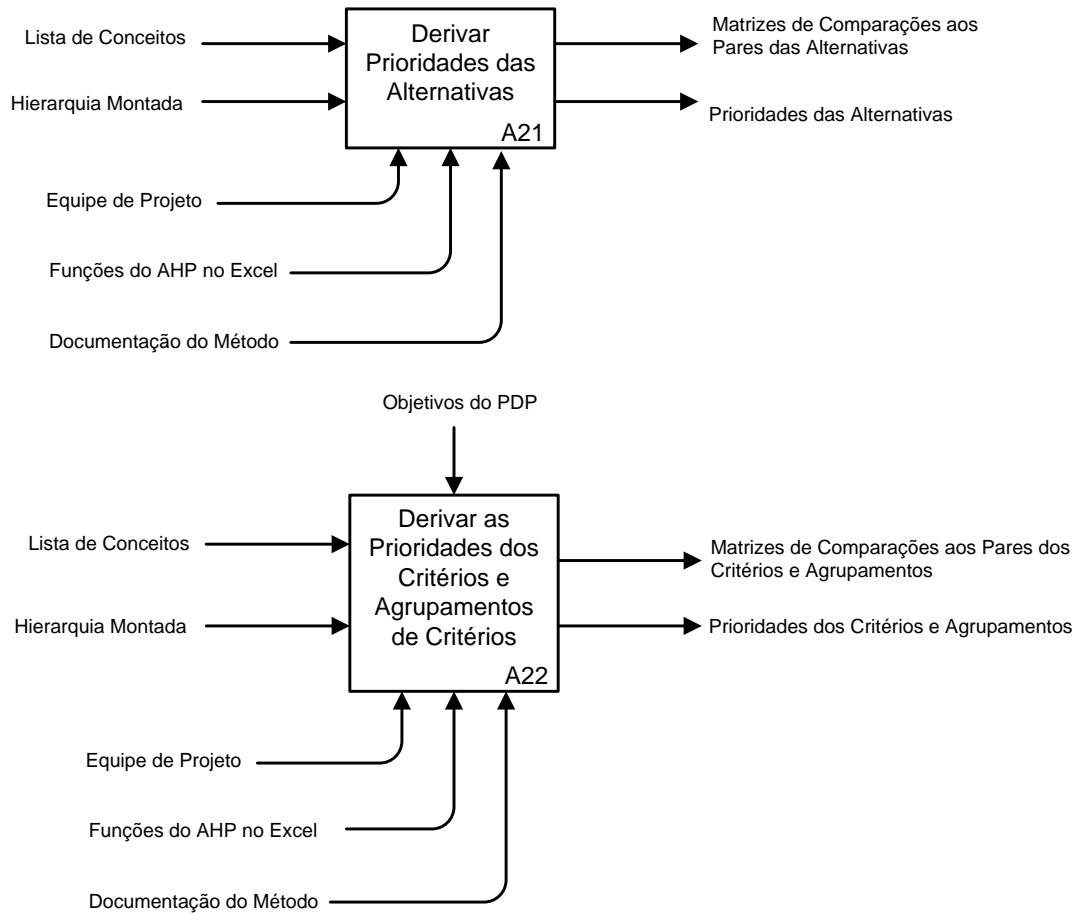


Figura 5.10 – Fase de Derivação das Prioridades das Alternativas e dos Critérios
(Fonte: Elaborada pelo autor)

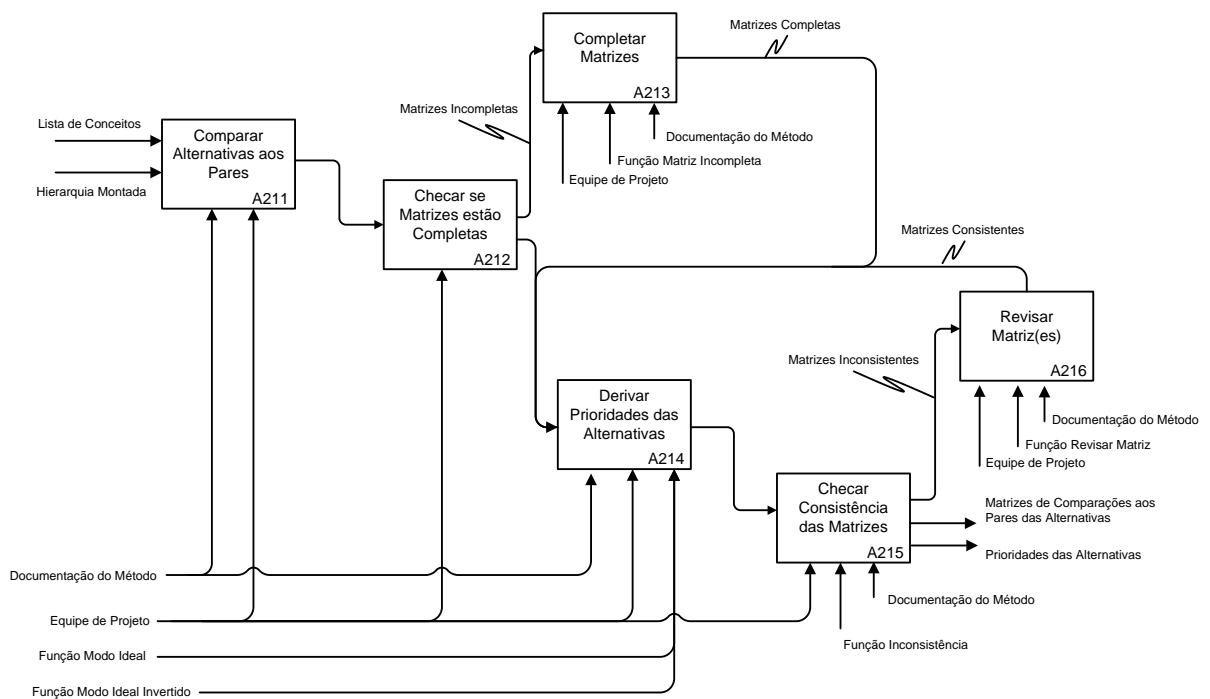


Figura 5.11 – Etapa de Derivação das Prioridades das Alternativas
(Fonte: Elaborada pelo autor)

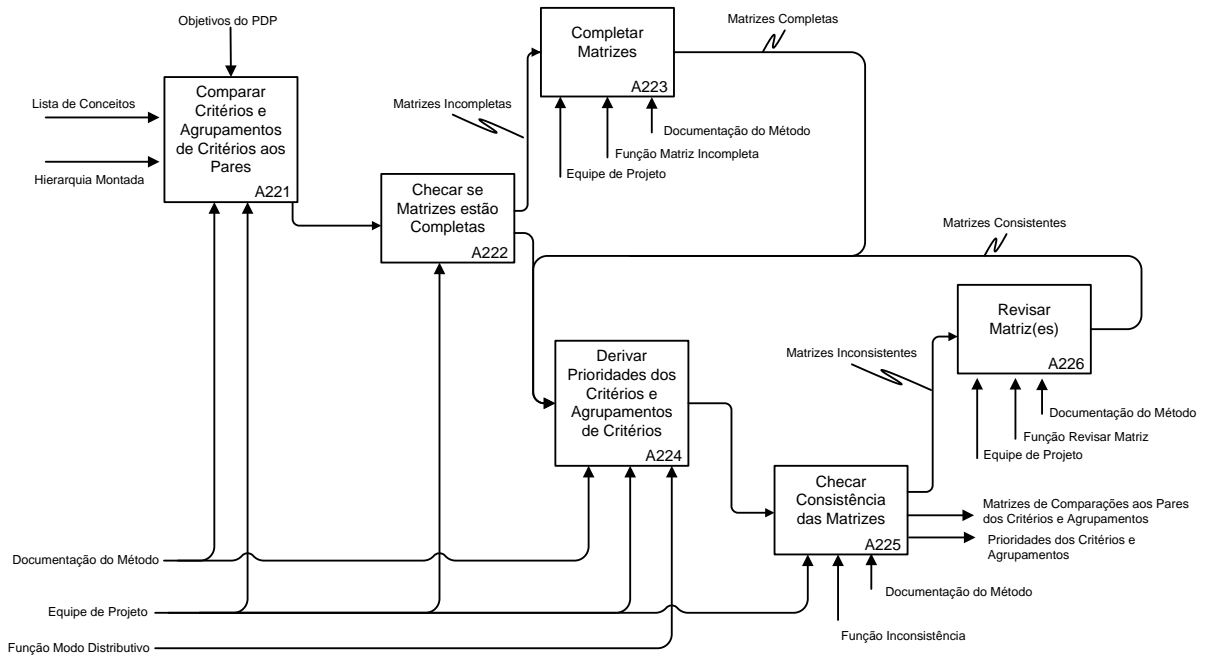


Figura 5.12 – Etapa de Derivação das Prioridades dos Critérios e Agrupamentos de Critérios
(Fonte: Elaborada pelo autor)

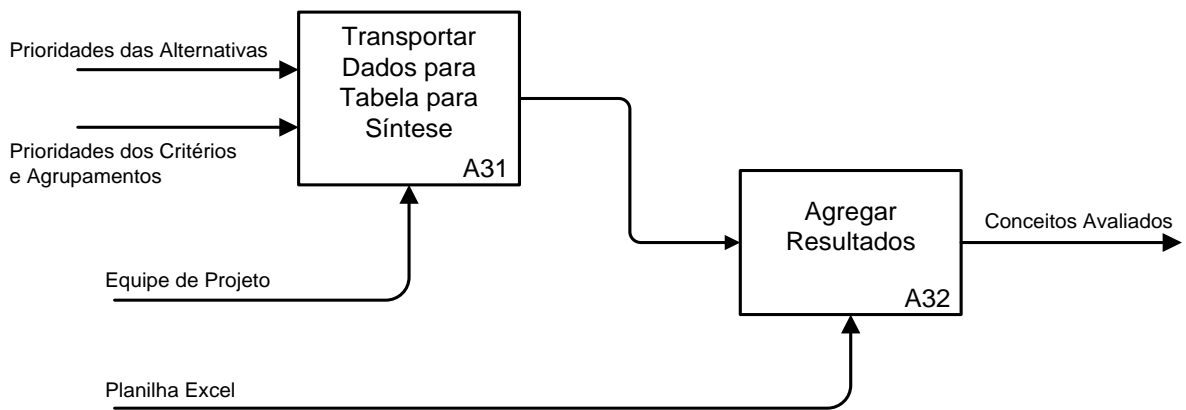


Figura 5.13 – Fase de Síntese dos Resultados
(Fonte: Elaborada pelo autor)

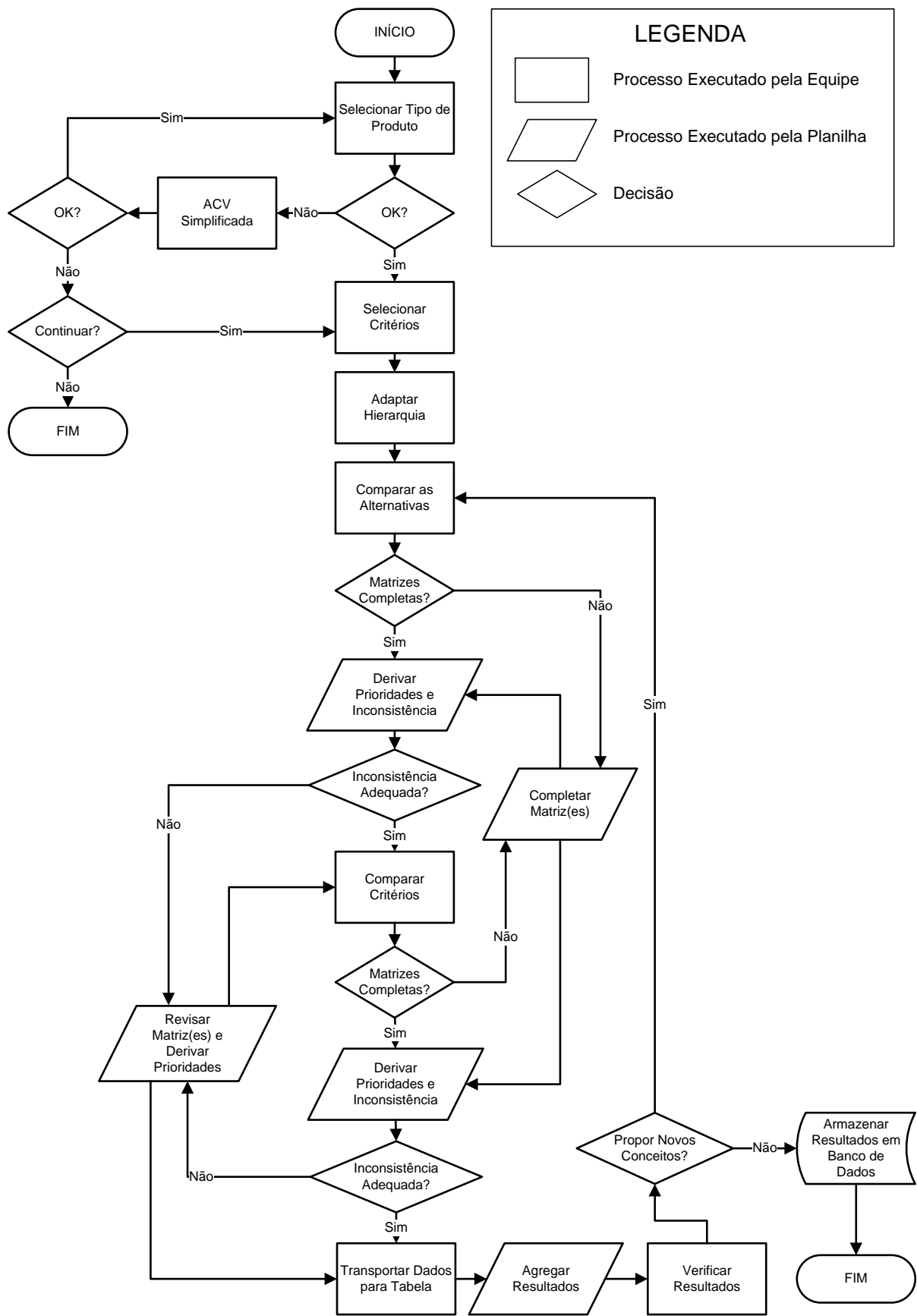


Figura 5.14 – Fluxograma do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos
 (Fonte: Elaborada pelo autor)

5.3.1 Fase 1: Montagem da Hierarquia

Como indica a figura 5.8, a primeira fase do método é a montagem da hierarquia. Esta fase é composta de três atividades: selecionar o tipo de produto, selecionar os critérios ambientais e adaptar a hierarquia (ver figura 5.9).

A análise se inicia tendo como entrada a lista de conceitos de produtos gerados anteriormente pela equipe de projeto (ver seção 2.4). Dados esses conceitos, a equipe tentará determinar, por meio de sua experiência e das informações contidas na seção 3.3.1, se é possível enquadrá-los em um ou mais dos tipos básicos (A, B, etc.) apresentados. Como indica a figura 5.14, se essa atividade for bem sucedida, pode-se passar para a próxima, a seleção dos critérios ambientais. Porém, se as informações fornecidas na seção 3.3.1 não forem suficientes para permitir a classificação dos conceitos nos tipos básicos, a equipe pode tentar pesquisar na bibliografia trabalhos que contenham avaliações ambientais de produtos similares. Persistindo a dúvida, a solução consiste em executar uma ACV simplificada. Considerando-se a revisão bibliográfica empreendida (ver seção 3.2.1), sugere-se a utilização da matriz ERPA. As questões necessárias para sua aplicação encontram-se no Anexo 1 e as instruções para a confecção da matriz estão na seção 3.2.1. Aqui, novamente, há outro ponto de decisão. A equipe pode ou não ser bem sucedida na aplicação da ACV simplificada. Em caso afirmativo, ela deve voltar à tarefa de selecionar o tipo de produto, utilizando os resultados da matriz ERPA como referência. Caso contrário, ou a equipe decide parar com a aplicação do método, ou ela seleciona os critérios ambientais sem se basear na tipologia ambiental de produtos. Entretanto, se a decisão da equipe for escolher os critérios sem o apoio dos tipos de produtos sugeridos, ela deve ter muita cautela, pois, como já foi frisado anteriormente, alguns dos critérios apresentados podem ser irrelevantes e até contraproducentes para certos tipos de produtos.

Uma vez selecionado o(s) tipo(s) de produto(s), a próxima atividade consiste em selecionar os critérios ambientais adequados. Para isso, basta consultar o quadro 5.4. Como mostra a figura 5.9, esta atividade tem como controle os objetivos do PDP. Ou seja, a equipe deve analisar criticamente os critérios propostos pelo método de avaliação ambiental de conceitos de produtos e decidir se tais critérios fazem sentido com relação aos objetivos do projeto e políticas da empresa.

Por fim, selecionados os critérios adequados, tanto do ponto de vista ambiental, quanto dos objetivos do PDP, a última atividade é a adaptação da hierarquia da figura 5.2. Isto

consiste em se redesenhar aquela figura apenas com os critérios selecionados na atividade anterior. É importante traçar novamente a hierarquia, pois esta facilita o processo posterior de comparações aos pares, principalmente entre os critérios e seus agrupamentos superiores.

O apêndice D ilustra esta etapa para o caso do exemplo do produto hipotético do tipo E. Como se pode notar neste apêndice, mais especificamente na figura D1, a hierarquia da figura 5.2 foi redesenhada utilizando-se apenas os 9 critérios ambientais relevantes para produtos do tipo E que constam do quadro 5.4 (grau de reciclagem dos materiais do produto, grau de escassez dos materiais do produto, grau de toxicidade dos materiais do produto, grau de reuso de partes e componentes, durabilidade, facilidade de reparo, grau de reuso do produto, facilidade de remanufatura e facilidade de desmontagem).

5.3.2 Fase 2: Derivação das Prioridades

Como indica a figura 5.8, a segunda fase do método aqui proposto é a derivação das prioridades de todos os elementos da hierarquia abaixo do objetivo. Esta fase é dividida em duas etapas: derivar as prioridades das alternativas e derivar as prioridades dos critérios e de seus agrupamentos (ver figura 5.10). Estas etapas são paralelas no sentido que o resultado de uma não serve diretamente como entrada para a execução da outra. Contudo, é necessário derivar as prioridades das alternativas antes. Isto porque o conhecimento a priori das alternativas influencia a determinação da importância relativa dos critérios. De acordo com Forman & Selly (2001), em alguns problemas de decisão, a importância dos critérios podem depender das alternativas. Esta dependência pode ser acomodada por meio de cálculos formais de feedback ou intuitivamente pelo decisor. A maneira formal é utilizar o ANP ao invés do AHP. Porém, é possível utilizar o AHP se as alternativas forem julgadas antes dos critérios. Dessa forma, o feedback é feito mentalmente pelo tomador de decisão. Por exemplo, um critério pode ser julgado o mais importante de todos de maneira absoluta. Entretanto, se todas as alternativas desempenharem igualmente bem neste critério, este tem peso zero, pois não discrimina as alternativas. Assim, conhecendo as alternativas antes de se julgar a importância relativa dos critérios, é possível fazer mentalmente este ajuste.

5.3.2.1 *Etapa 1: Derivação das Prioridades das Alternativas*

Como mostra a figura 5.11, esta etapa é composta de seis atividades. Quatro delas são obrigatórias: comparar as alternativas aos pares, checar se as matrizes de comparações aos pares estão completas, derivar as prioridades das alternativas com relação aos critérios ambientais e checar a razão de consistência das matrizes. As outras duas atividades, completar matrizes incompletas e revisar matrizes inconsistentes, só ocorrem caso haja, respectivamente, matrizes faltando elementos ou matrizes cuja razão de consistência seja maior que o limite especificado na seção 4.2.3.

Inicialmente, para cada um dos critérios da hierarquia, monta-se uma matriz cujos elementos são as comparações dos conceitos aos pares com relação ao seu impacto no critério, utilizando a escala de números absolutos, conforme relatado na seção 4.2.2. Para completar as matrizes, deve-se responder a perguntas do tipo: “dados um par de conceitos e o critério ambiental em questão, qual dos dois conceitos possui mais daquele atributo e quanto mais?”. Modelos de matrizes com ordens variando de 2 até 7 para tais comparações encontram-se no arquivo em Excel que implementa computacionalmente o método⁸. Haverá tantas matrizes quanto o número de critérios. Adicionalmente, todas as matrizes terão uma quantidade de linhas e colunas igual ao número de conceitos sendo avaliados.

A segunda atividade consiste em se checar se cada uma das matrizes montadas anteriormente está completa, ou seja, se elas possuem todas as comparações aos pares. Se houver elementos ausentes, a equipe deve executar a atividade “A2.13 Completar Matrizes”. Elementos podem estar faltando por dois motivos. Primeiramente, a equipe pode estar em dúvida com relação a algumas comparações específicas. Em segundo lugar, caso haja muitas comparações a serem efetuadas, é possível deixar de responder algumas delas, conforme foi explicado na seção 4.2.5.4. Em ambos os casos, é necessário fornecer uma estimativa desses elementos. Para tanto, deve-se aplicar nessas matrizes a função “Matriz_Incompleta” que consta da planilha em Excel que implementa o método e cujo algoritmo encontra-se documentado no Apêndice C7.

De posse de todas as matrizes completas, a próxima atividade consiste da derivação das prioridades das alternativas com relação aos critérios ambientais. O método correto é o modo ideal. Contudo, como foi explicado na seção 5.2.2, há prioridades positivas,

⁸ No arquivo em Excel existe uma planilha nomeada “1. Modelo de Matrizes”.

invertidas e, em algumas situações específicas relatadas naquela seção, negativas ou nulas. Para derivar as prioridades positivas, deve-se utilizar a função “Modo_Ideal” (Apêndice C.3). Para as invertidas, a função “Modo_Ideal_Invertido” (Apêndice C.5). Prioridades negativas são derivadas como positivas, por meio da função “Modo_Ideal”, e seu resultado é multiplicado por -1 . Alternativas com prioridades nulas simplesmente assumem o valor zero e não são comparadas aos pares com as demais com relação àquele critério.

Derivadas as prioridades, a próxima atividade consiste em se determinar o grau de inconsistência das comparações aos pares, por meio do cálculo da razão de consistência. Os valores admissíveis para a inconsistência são no máximo 0,05 (5%) para matrizes de ordem 3, no máximo 0,08 (8%) para matrizes de ordem 4 e no máximo 0,1 (10%) para matrizes de ordem mais alta. O cálculo da inconsistência é feito pela função “Inconsistência” (Apêndice C2). Havendo matrizes com inconsistência superior ao máximo permitido, deve-se executar a atividade “A216 Revisar Matrizes”. Para tanto, deve-se aplicar a essas matrizes a função “Revisar Matriz” (Apêndice C.6) e, na sequência, derivar as prioridades novamente, conforme foi explicado no parágrafo anterior.

Para o exemplo numérico do Apêndice D, uma vez que há 4 conceitos e 9 critérios ambientais, são necessárias 9 matrizes de ordem 4. Neste apêndice são mostradas as matrizes de comparações aos pares, as prioridades derivadas utilizando-se o modo de síntese adequado, a razão de consistência de cada matriz e também o tipo de pergunta que deve ser feito para se completar essas matrizes. A figura 5.15 a seguir mostra como uma dessas 9 matrizes é montada no arquivo em Excel.

G4		fx {=Modo_Ideal_Invertido(C4:F7)}					
	A	B	C	D	E	F	G
1							
2		Critério:	Conceito 1	Conceito 2	Conceito 3	Conceito 4	Prioridades:
3		Escassez					Modo Ideal Invertido
4		Conceito 1	1	2	2	5	0,2031
5		Conceito 1	1/2	1	1	3	0,3866
6		Conceito 1	1/2	1	1	2	0,4278
7		Conceito 1	1/5	1/3	1/2	1	1,0000
8		Inconsistência =					0,58%
9							
10							
11							

Figura 5.15 – Exemplo de Matriz de Comparações para os Conceitos de um Produto Hipotético
(Fonte: Elaborada pelo autor)

5.3.2.2 Etapa 2: Derivação das Prioridades dos Critérios e seus Agrupamentos

Como indica a figura 5.12, esta etapa também é composta de seis atividades, quatro delas obrigatórias e duas dependentes do resultado das anteriores. Como a figura deixa claro, as atividades “A.2.2.2 Checar se Matrizes estão Completas” e “A.2.2.5 Checar Consistência das Matrizes”, são idênticas às atividades da etapa anterior (ver figura 5.11). Logo, sua explicação é omitida.

Inicialmente, de posse da hierarquia adaptada, cada nível da mesma deve ser comparado aos pares com respeito ao seu impacto no nível imediatamente superior a que eles se ligam na hierarquia. Por exemplo, tomemos na figura 5.2 o ramo “Vida Útil” da hierarquia e todos os elementos abaixo do mesmo. Assim, os critérios “Adaptabilidade” e “Multifuncionalidade” seriam comparados aos pares com relação à sua importância no agrupamento “Vida Tecnológica”. Da mesma forma, os critérios “Durabilidade”, “Facilidade de Manutenção”, “Confiabilidade” e “Facilidade de Reparo” seriam comparados aos pares com relação aos seus impactos no agrupamento “Vida Física”. A seguir, os agrupamentos “Vida Física” e “Vida Tecnológica” seriam comparados com relação à sua importância relativa no agrupamento “Vida Útil”. Por fim, o agrupamento “Vida Útil” seria comparado com os outros agrupamentos que se unem ao objetivo de escolher o melhor conceito (“Volume”, “Materiais”, “Uso”, “Fim de Vida” e “Desmontagem”). A pergunta a ser respondida é sempre do tipo: “dado um par de critérios ou de agrupamentos, qual é o mais importante e quanto mais importante com relação aos seus impactos no elemento imediatamente acima da hierarquia a que eles se unem?”. Aqui deve-se ressaltar, novamente, que o conhecimento do desempenho das alternativas nos critérios influencia a importância relativa dos critérios. Isto é, o peso dos critérios não é absoluto, mas dependente de cada aplicação.

Checadas as matrizes para avaliar se as mesmas estão completas e completando aquelas com elementos ausentes, derivam-se as prioridades dos critérios e dos agrupamentos de critérios por meio do modo distributivo. Para tanto, deve-se utilizar a função “Modo_Distributivo” (Apêndice C.1). Como na etapa anterior, deve-se checar a consistência das matrizes, corrigir aquelas cujas inconsistências porventura sejam inadequadas e derivar suas prioridades novamente.

No apêndice D são mostradas as matrizes de comparações aos pares dos critérios e dos agrupamentos de critérios para o exemplo numérico hipotético, bem como as

prioridades derivadas utilizando-se o modo de síntese adequado, a razão de consistência de cada matriz e também o tipo de pergunta que deve ser feito para se completar a matrizes. A figura 5.16 a seguir mostra como uma dessas matrizes é montada no arquivo em Excel.

	A	B	C	D	E
1					
2		Tipos de Materiais	Escassez	Toxidade	Prioridades:
3					Modo Distributivo
4		Escassez	1	1/5	0,1667
5		Toxidade	5	1	0,8333
6		Inconsistência =			0,00%
7					

Figura 5.16 – Exemplo de Matriz de Comparações para os Critérios Ambientais de um Produto Hipotético

(Fonte: Elaborada pelo autor)

5.3.3 Fase 3: Síntese dos Resultados

A última etapa consiste em sintetizar os resultados, ou seja, determinar a prioridade global das alternativas com relação ao objetivo da análise. Para tanto, como indica a figura 5.13, as prioridades das alternativas e as prioridades dos critérios e agrupamento devem ser transportados para as células adequadas no arquivo em Excel que implementa o método. As prioridades das alternativas devem ser transportadas para a planilha “2. Prioridades das Alternativas”. As prioridades dos critérios e agrupamentos devem ser transportadas para a planilha “3. Prioridade dos Critérios”. O resultado final da análise aparece na planilha “4. Síntese dos Resultados” nos campos “Notas Finais”. Nesta planilha é possível observar tanto a prioridade global das alternativas quanto suas prioridades por critérios. Dessa maneira, pode-se também analisar os pontos fortes e fracos de cada conceito, visando à geração de novos conceitos que unam pontos positivos dos anteriores.

Assim, se a equipe, a partir desses resultados, propor novos conceitos, reinicia-se a análise a partir da comparação das alternativas (ver figura 5.14). Nesta situação, faz-se necessário comparar apenas o novo conceito com os demais e reconsiderar se os pesos dos critérios sofrerão alterações face à introdução desta nova alternativa. Caso não sejam propostos novos conceitos ou finalizando-se a análise, aceitam-se os resultados, o arquivo em Excel é salvo em um banco de dados e finaliza-se a aplicação do método.

As figuras 5.17, 5.18 e 5.19 a seguir mostram como ficariam, respectivamente, as planilhas “2. Prioridades das Alternativas”, “3. Prioridade dos Critérios” e “4. Síntese dos Resultados” para o exemplo numérico do Apêndice D.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Prioridades das Alternativas									
2		C1	C2	C3	C4						
3	Volume do Produto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
4	Peso de Materiais	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
5	Fração de Reciclados	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
6	Energia Incorporada nos Materiais	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
7	Escassez dos Materiais	0,2031	0,3866	0,4278	1,0000						
8	Toxicidade dos Materiais	1,0000	0,2147	0,1024	0,3234						
9	Consumo de Energia em Uso	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
10	Fonte de Energia do Produto	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
11	Impacto Ambiental em Uso	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
12	Durabilidade	1,0000	0,2453	0,4828	0,1350						
13	Facilidade de Manutenção	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
14	Confiabilidade	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
15	Facilidade de Reparo	0,2500	1,0000	0,2500	0,2500						
16	Adaptabilidade	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
17	Multifuncionalidade	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000						
18	Grau de Reciclagem dos Materiais	1,0000	0,1997	0,1231	0,3322						
19	Grau de Reuso de Partes e Componentes	0,2246	0,2246	0,6117	1,0000						
20	Grau de Reuso do Produto	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000						
21	Facilidade de Remanufatura	1,0000	0,1881	0,3065	0,7048						
22	Facilidade de Desmontagem	0,1170	1,0000	0,5250	0,2646						
23											
24											
25											
26											
27											

Figura 5.17 – Exemplo de Planilha de Prioridades de Alternativas de um Produto Hipotético
(Fonte: Elaborada pelo Autor)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		ESTRATÉGIAS	Prioridades							
2		Volume do Produto	0,0000							
3		Materiais	0,3750							
4		Uso	0,0000							
5		Vida útil	0,3750							
6		Fim de Vida	0,1250							
7		Facilidade de Desmontagem	0,1250							
8		SOMA	1,0000							
9										
10		MATERIAIS	Prioridades		QUANTIDADE DE MATERIAIS	Prioridades		TIPOS DE MATERIAIS	Prioridades	
11		Quantidade de Materiais	0,0000		Peso de Materiais	0,0000		Energia Incorporada nos Materiais	0,0000	
12		Tipo de Materiais	1,0000		Fração de Reciclados	0,0000		Escassez dos Materiais	0,1667	
13		SOMA	1,0000		SOMA	0,0000		Toxicidade dos Materiais	0,8333	
14								SOMA	1,0000	
15										
16		USO	Prioridades		ENERGIA	Prioridades				
17		Energia	0,0000		Consumo de Energia	0,0000				
18		Impacto Ambiental em Uso	0,0000		Fonte de Energia	0,0000				
19		SOMA	0,0000		SOMA	0,0000				
20										
21		VIDA ÚTIL	Prioridades		VIDA FÍSICA	Prioridades		VIDA TECNOLÓGICA	Prioridades	
22		Vida Física	1,0000		Durabilidade	0,7500		Adaptabilidade	0,0000	
23		Vida Tecnológica	0,0000		Facilidade de Manutenção	0,0000		Multifuncionalidade	0,0000	
24		SOMA	1,0000		Confiabilidade	0,0000		SOMA	0,0000	
25					Facilidade de Reparo	0,2500				
26					SOMA	1,0000				
27										
28		FIM DE VIDA	Prioridades							
29		Grau de Reciclagem de Materiais	0,0954							
30		Grau de Reuso de Partes e Componentes	0,1601							
31		Grau de Reuso do Produto	0,4673							
32		Facilidade de Remanufatura	0,2772							
33		SOMA	1,0000							
34										
35										
36										

Figura 5.18 – Exemplo de Planilha de Prioridade de Critérios de um Produto Hipotético
(Fonte: Elaborada pelo Autor)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1					Prioridades das Alternativas				
2		Critério			PESOS	C1	C2	C3	C4
3		Volume do Produto			0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	Materiais	Quantidade de Materiais	Peso de Materiais	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
5			Fração de Reciclados	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
6		Tipos de Materiais	Energia Incorporada nos Materiais	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
7	Escassez dos Materiais		0,059	0,203	0,387	0,428	1,000		
8	Toxicidade dos Materiais		0,294	1,000	0,215	0,102	0,323		
9	Uso	Energia	Consumo de Energia	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
10			Fonte de Energia	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
11		Impacto Ambiental em Uso	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
12	Vida Útil	Vida Física	Durabilidade	0,265	1,000	0,245	0,483	0,135	
13			Facilidade de Manutenção	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
14			Confiabilidade	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
15		Vida Tecnológica	Facilidade de Reparo	0,088	0,250	1,000	0,250	0,250	
16			Adaptabilidade	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
17			Multifuncionalidade	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
18	Fim de Vida	Grau de Reciclagem de Materiais		0,022	1,000	0,200	0,123	0,332	
19		Grau de Reuso de Partes e Componentes		0,038	0,225	0,225	0,612	1,000	
20		Grau de Reuso do Produto		0,110	1,000	1,000	1,000	1,000	
21		Facilidade de Remanufatura		0,065	1,000	0,188	0,307	0,705	
22	Facilidade de Desmontagem			0,059	0,117	1,000	0,525	0,265	
23	NOTAS FINAIS			1,000	0,8058	0,4330	0,3918	0,4283	
24									
25									
26									

Figura 5.19 – Exemplo de Planilha de Síntese de Resultados de um Produto Hipotético
(Fonte: Elaborada pelo Autor)

Aqui termina a proposição do método de avaliação ambiental de conceitos de produtos. No próximo capítulo ele é avaliado.

6 AVALIAÇÃO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE CONCEITOS DE PRODUTOS

O método de avaliação ambiental de conceitos de produtos foi submetido primeiramente a uma avaliação crítica com relação aos requisitos que serviram de base para o seu desenvolvimento. Posteriormente, o método proposto foi analisado por profissionais ligados ao desenvolvimento de produtos de três empresas e por um consultor em DfE para avaliar sua adequação e grau de aplicação prática. Os resultados são mostrados a seguir.

6.1 Considerações dos Requisitos do Método

Nesta seção, o método proposto é avaliado sob o enfoque dos requisitos definidos no Capítulo 5. Esta avaliação é qualitativa e discute-se se o método atende ou não ao requisito em questão do ponto de vista da teoria utilizada para o seu desenvolvimento.

Requisito 1 – permitir um procedimento orientado por problemas, ou seja, deve ser aplicável a uma gama de produtos físicos: este requisito é atendido, uma vez que a tipologia ambiental de produtos adotada (A, B, C, D, E) e que está no âmago do método permite que uma grande variedade de produtos físicos seja analisada.

Requisito 2 – facilitar a estruturação do problema e orientar o usuário, passo a passo, no processo de avaliação do conceito do produto que mais bem atenda aos critérios do DfE, dentro de uma perspectiva de ciclo de vida do produto: o método facilita a estruturação do problema e orienta passo a passo o usuário pois ele é dividido em fases, etapas e atividades, todas dispostas em uma ordem lógica, como mostra o fluxograma da figura 5.14. Os critérios do DfE são atendidos, pois os critérios de avaliação de conceitos incluídos no método foram construídos a partir da compilação de diversas estratégias de DfE propostas na literatura. A perspectiva de ciclo de vida foi contemplada, pois um dos critérios para a inclusão das estratégias de DfE na revisão bibliográfica da seção 3.3.2 era que as mesmas deveriam ter como objetivo reduzir o impacto ambiental do ciclo de vida do produto.

Requisito 3 – ser compatível com os conhecimentos consolidados das áreas de gerenciamento de projetos, gestão do PDP, DfE e do raciocínio de ciclo de vida: este requisito é atendido, porque estes tópicos foram contemplados na revisão bibliográfica que antecedeu a construção do método e todos foram incorporados na sua confecção.

Requisito 4 – ter precisão e não gerar soluções por acaso: do ponto de vista teórico, este requisito é atendido, pois o método é baseado no AHP, um método de análise multicriterial consagrado pela prática. Sipahi & Timor (2010) relatam que entre 2005 e 2009, um total de 169 artigos sobre AHP foram publicados em periódicos com alto fator de impacto e que este número foi crescente durante o período considerado. Adicionalmente, Saaty (2005a) mostra diversos exemplos onde o AHP foi utilizado com sucesso na prática. Em síntese, o que este autor mostrou é que o AHP é um método válido desde que os critérios mais relevantes para a decisão estejam incorporados na hierarquia. Uma vez que a hierarquia do método de avaliação ambiental de conceitos de produtos foi resultado de uma compilação das principais estratégias de DfE presentes na literatura, conclui-se que os critérios mais importantes foram contemplados.

Requisito 5 – permitir a transferência de informações e conhecimento do DfE entre projetos similares, formalizando e explicitando o conhecimento tácito de seus usuários: este requisito é atendido em razão de o método oferecer uma maneira estruturada de a equipe abordar e registrar o processo de avaliação ambiental dos conceitos. O arquivo em Excel desenvolvido para dar suporte computacional ao método também facilita esta tarefa. Além disso, o AHP é uma maneira estruturada de traduzir a experiência e informações qualitativas para dados quantitativos, mais fáceis de serem guardados e resgatados para uso posterior.

Requisito 6 – o método deve ser de fácil implementação computacional: este requisito é atendido, pois todas as etapas quantitativas do método foram implementadas no arquivo em Excel desenvolvido.

Requisito 7 – oferecer uma forma sistemática de armazenar o conhecimento, facilitando o processo de ensino e aprendizagem do método: este requisito é atendido, pois a lógica do método de avaliação ambiental de conceitos de produtos é baseada no AHP, que é um método sistemático de abordar e resolver problemas com múltiplos critérios. Adicionalmente,

Lootsma (1999) explica que grande parte da popularidade do AHP se deve ao fato deste ser mais intuitivo e fácil de entender e de aprender do que outros métodos da MADM. Além do mais, o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos é dividido em fases, etapas e atividades, o que favorece a aprendizagem e a transmissão do conhecimento. Adicionalmente, foi desenvolvido um arquivo em Excel que facilita o aprendizado e a aplicação do método pelos usuários.

Requisito 8 – organizar o trabalho, reduzir tempo e evitar decisões inapropriadas, de maneira a harmonizar as demandas ambientais com os demais requisitos do produto: a modelagem do processo de avaliação ambiental de conceitos cria um padrão, uma sequência lógica de atividades, uma linguagem comum e a garantia de que certas práticas e ferramentas serão sempre aplicadas durante este processo. Isto facilita a organização do trabalho a ser executado. Embora a aplicação prática do AHP seja demorada, devido à necessidade de grande quantidade de comparações aos pares, certamente a existência de um modelo para a avaliação ambiental de conceitos torna a execução deste processo mais rápida do que na ausência completa de um modelo. O método também orienta a tomada da decisão mais apropriada, visto que contempla as informações necessárias para a análise do conceito mais bem atenda aos critérios do DfE, dentro de um a perspectiva de ciclo de vida do produto. Por fim, uma característica importante do método é a sua estrutura hierárquica e modular. Dessa maneira, podem ser agregadas à hierarquia da figura 5.2 outras hierarquias, cada qual contemplando um aspecto da decisão, tais como custos, qualidade etc. O peso de cada um destes aspectos seria derivado pelo AHP, bem com a síntese final das prioridades dos conceitos. Logo, é possível harmonizar as demandas ambientais com os demais requisitos do produto. Dessa forma, conclui-se que este requisito também é atendido.

Requisito 9 – facilitar o trabalho da equipe em um ambiente de desenvolvimento de produto integrado e multidisciplinar: o método proposto fornece meios e ferramentas, inclusive computacionais, para a determinação dos melhores conceitos do ponto de vista ambiental, logo o trabalho da equipe fica facilitado com relação a esse aspecto. Adicionalmente, na etapa de proposição do método, partiu-se do pressuposto que este deveria ser acessível às diversas especialidades envolvidas no desenvolvimento e não exigir demasiada *expertise* ambiental. Assim, as principais decisões foram utilizar tipos de produto ao invés de etapas do ciclo de vida, utilizar as estratégias de DfE ao invés das ACV simplificadas e utilizar o AHP ao invés

de outras técnicas mais complexas e menos intuitivas da decisão multicriterial. Portanto, este requisito é atendido.

Requisito 10 – servir de orientação e diretriz para gerentes de projetos de produtos introduzirem os princípios do DfE no desenvolvimento de produtos: este requisito é atendido, porque o método identifica o que deve ser feito (atividades) e como deve ser feita (ferramentas) a avaliação ambiental de conceitos, esta construída em torno da compilação de estratégias de DfE condensadas em critérios de avaliação.

Diante do exposto, conclui-se que do ponto de vista teórico o método proposto atende a todos os requisitos apresentados. A segunda parte deste capítulo irá complementar estas considerações por meio de entrevistas e questionários aplicados a profissionais ligados ao desenvolvimento de produtos de três empresas e com um consultor em DfE.

6.2 Avaliação do Método junto a Especialistas

Nesta seção, o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos foi avaliado com relação à sua adequação e grau de aplicação prática por profissionais ligados ao desenvolvimento de produtos de três empresas e por um consultor em DfE. Para proceder com esta avaliação, inicialmente foram derivados 17 critérios. Estes critérios foram obtidos combinando-se os 10 requisitos da seção 6.1 com os 11 critérios de avaliação de modelos de referência propostos por Vernadat (1996). Esta combinação encontra-se no quadro 6.1. A primeira coluna deste quadro contém os critérios de Vernadat (1996), a segunda coluna, os requisitos do método e a terceira, o critério derivado. Por exemplo, o critério escopo de Vernadat (1996) é equivalente ao requisito 2 (o método facilita a estruturação do problema e orienta o usuário, passo a passo, no processo de avaliação do conceito do produto que mais bem atenda aos critérios do DfE, dentro de uma perspectiva de ciclo de vida do produto). Já o critério profundidade de Vernadat (1996) não tem um requisito semelhante e, portanto, gerou sozinho o critério de avaliação, e assim sucessivamente. A partir destes critérios, montou-se o questionário para a avaliação do método, que se encontra no Apêndice E.

Quadro 6.1 – Critérios para Avaliação do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos
(continua)

Critérios de Vernadat (1996)	Requisitos do Método	Critérios de Avaliação Derivados
1. Escopo (amplitude): esta característica relaciona-se com as áreas cobertas pelo modelo.	2. O método facilita a estruturação do problema e orienta o usuário, passo a passo, no processo de avaliação do conceito do produto que mais bem atenda aos critérios do DfE, dentro de um a perspectiva de ciclo de vida do produto?	1. O método facilita a estruturação do problema e orienta o usuário, passo a passo, no processo de avaliação do conceito do produto que mais bem atenda aos critérios ambientais, dentro de um a perspectiva de ciclo de vida do produto?
2. Profundidade: relaciona-se com o nível de detalhe do modelo em termos de sua decomposição (por exemplo, decompõe até qual nível?)		2. O nível de detalhamento do método é adequado para auxiliar a avaliação do conceito do produto ambientalmente mais correto?
3. Precisão: define o grau de detalhamento do modelo em termos de poder de representação.	4. Ter precisão e não gerar soluções por acaso.	3. O método é preciso, isto é, representa bem a realidade modelada e evita a geração de soluções por acaso?
4. Generalidade: esta característica avalia a amplitude de utilização do modelo.	1. O método é aplicável a diversos tipos de produtos físicos?	4. O método é aplicável a diversos tipos de produtos físicos?
5. Competência: é relativa aos domínios técnicos cobertos, isto é, é relevante para uma disciplina ou resolve problema de várias?	3. O método é compatível com os conhecimentos das áreas de gerenciamento de projetos, gestão do PDP, DfE e do raciocínio de ciclo de vida?	5. O método é compatível com os conhecimentos das áreas de gerenciamento de projetos, gestão do PDP, DfE e do raciocínio de ciclo de vida?
6. Eficiência: habilidade de resolver os problemas sem a necessidade de nenhuma alteração no modelo.		6) O método é eficiente, ou seja, possibilita a resolução do problema sem a necessidade de nenhuma alteração ou adaptação em sua estrutura básica?
7. Clareza: habilidade de ser facilmente entendido pelo usuário.		7. A estrutura de representação (texto, figuras, quadros) do método e do protótipo computacional (interfaces) são claros e objetivos?
8. Adaptabilidade: habilidade de o modelo ser transformado de uma representação para outra, mais adequada para a aplicação.		8. O método pode ser adaptado para diferentes tipos de projetos ou empresas?
9. Capacidade de extensão: habilidade de o modelo ser expandido.		9. O método permite a sua expansão, ou seja, a identificação, análise e tratamento de novas categorias de critérios ambientais no projeto conceitual?
10. Consistência: capacidade de o modelo expressar-se de forma unívoca.		10. O método apresenta lógica e consistência no fluxo de informações?
11. Completeza: relacionado à capacidade do modelo conter toda a informação necessária para resolver o problema proposto.		11. O método contém toda a informação necessária para a escolha do conceito ambientalmente mais correto?
	5. O método permite a transferência de informações e conhecimento do DfE entre projetos similares, formalizando e explicitando o conhecimento de seus usuários?	12. O método permite a transferência de informações e conhecimento do DfE entre projetos similares, formalizando e explicitando o conhecimento de seus usuários?

Quadro 6.1 – Critérios para Avaliação do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos (conclusão)

Critérios de Vernadat (1996)	Requisitos do Método	Critérios de Avaliação Derivados
	6. A implantação computacional do método é satisfatória?	13. A implantação computacional do método é satisfatória?
	7. O método oferece uma forma sistemática de armazenar o conhecimento e é fácil de aprender e de ensinar?	14. O método oferece uma forma sistemática de armazenar o conhecimento e é fácil de aprender e de ensinar?
	8. O método pode ajudar a evitar decisões inapropriadas, de maneira a harmonizar as demandas ambientais com os demais requisitos do produto?	15. O método pode ajudar a evitar decisões inapropriadas, de maneira a harmonizar as demandas ambientais com os demais requisitos do produto?
	9. O método pode facilitar o trabalho da equipe em um PDP integrado e multidisciplinar?	16. O método pode facilitar o trabalho da equipe em um ambiente de desenvolvimento de produto integrado e multidisciplinar?
	10. O método pode servir de orientação e diretriz para gerentes de projetos de produtos introduzirem os princípios do DfE no desenvolvimento de produtos?	17. O método pode servir de orientação e diretriz para gerentes de projetos de produtos introduzirem os princípios do DfE no desenvolvimento de produtos?

(Fonte: Elaborado pelo autor)

Cada um dos critérios derivados foram avaliados segundo uma escala ordinal com 6 pontos, com o seguinte significado: 5 – o método atende plenamente a este critério; 4 – o método atende em muitos aspectos a este critério; 3 – o método atende parcialmente a este critério; 2 – o método atende somente em uns poucos aspectos a este critério; 1 – o método não atende a este critério; 0 – não gostaria de responder a essa questão.

O procedimento para a coleta de dados consistiu de dois passos. Primeiramente foram agendadas entrevistas com os profissionais. As entrevistas duraram em torno de duas horas e seguiram uma ordem fixa. Inicialmente, por meio de *slides*, foi apresentada a teoria na qual o método se baseia. Foram abordados os temas PDP e suas macrofases, a fase de projeto conceitual, a etapa de seleção de conceitos, o AHP, o ciclo de vida do produto e o DfE. A seguir, foi apresentado o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos, segundo a ordem ditada pelo fluxograma da figura 5.14. Por fim, foi trabalhado um exemplo numérico para ilustrar o funcionamento do arquivo em Excel que implementa o método (ver Apêndice D). Concomitantemente à apresentação, o entrevistado podia manifestar suas dúvidas e opiniões. Por fim, foi dada ao entrevistado a oportunidade de avaliar de forma global o método.

Em um segundo momento, o entrevistado recebeu uma cópia eletrônica dos *slides*, do questionário de avaliação (Apêndice E) e da planilha Excel mais um documento escrito. Este documento continha 27 páginas, sendo composto por um resumo do capítulo 5 da

presente tese, um resumo da seção 3.3.1 (classificação ambiental de produtos), o quadro 4.1 (escala de Saaty), o Apêndice D (exemplo numérico) e o Anexo 1 (matriz ERPA). Foi pedido aos entrevistados que posteriormente lessem o resumo, respondessem ao questionário e o remetessem por correio eletrônico em um período de 7 a 10 dias. Foram dadas instruções em como preencher o questionário, qual o seu objetivo e quais tipos de informações estavam sendo buscadas com aquele instrumento. Após eventuais dúvidas e comentários por parte do respondente, a entrevista foi dada como encerrada.

A seguir, são apresentados e analisados os resultados obtidos para cada pergunta do questionário (ver Apêndice E). O quadro 6.2 mostra o perfil de cada um dos profissionais entrevistados. Na tabela 6.1 constam as notas dadas por cada avaliador, bem como a média aritmética por critério, por avaliador e geral. A figura 6.1 mostra a amplitude das notas e a nota média por critério. Na figura 6.2, as notas obtidas por critério e a média aritmética por critério são representados em um gráfico de linhas. A figura 6.3 mostra as notas por avaliador e as médias por avaliador também em um gráfico de linhas e, por fim, no quadro 6.3 são apresentadas as respostas às questões qualitativas do questionário.

Serão considerados bons resultados as médias iguais ou superiores a 4,0, de acordo com a escala de 6 pontos definida anteriormente. Resultados iguais ou superiores a 4,0 sugerem que o método atende totalmente, ou em muitos aspectos o critério avaliado, não necessitando de correções. Médias inferiores a 4,0 e maiores ou iguais a 3,0 indicam que o critério necessita de correções ou aperfeiçoamentos leves. Por fim, médias inferiores a 3,0 significam que o critério apresenta grandes deficiências segundo a opinião dos avaliadores, devendo o método ser modificado com relação aos critérios deficientes.

Quadro 6.2 – Perfil dos Profissionais que Avaliaram o Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos

Avaliador	Perfil
A	Graduado e mestre em engenharia mecânica e doutor em engenharia de produção. Sócio-diretor de empresa de consultoria que assessora empresas a estruturarem suas ações de sustentabilidade por meio do conceito <i>Life Cycle Management</i> (LCM) focado na definição de estratégias e programas de ecodesign.
B	Graduado e mestre em engenharia mecânica. Trabalha como gerente sênior de tecnologia de produtos em uma empresa multinacional de linha branca, divisão de lavadoras.
C	Graduado e mestre em engenharia de produção. Trabalha como gerente de projetos em uma empresa nacional de máquinas e implementos agrícolas.
D	Graduado em engenharia mecânica. Atua há 17 anos como projetista de produtos e atualmente trabalha como engenheiro de desenvolvimento e projetos de bombas centrifugas especiais em uma empresa multinacional.

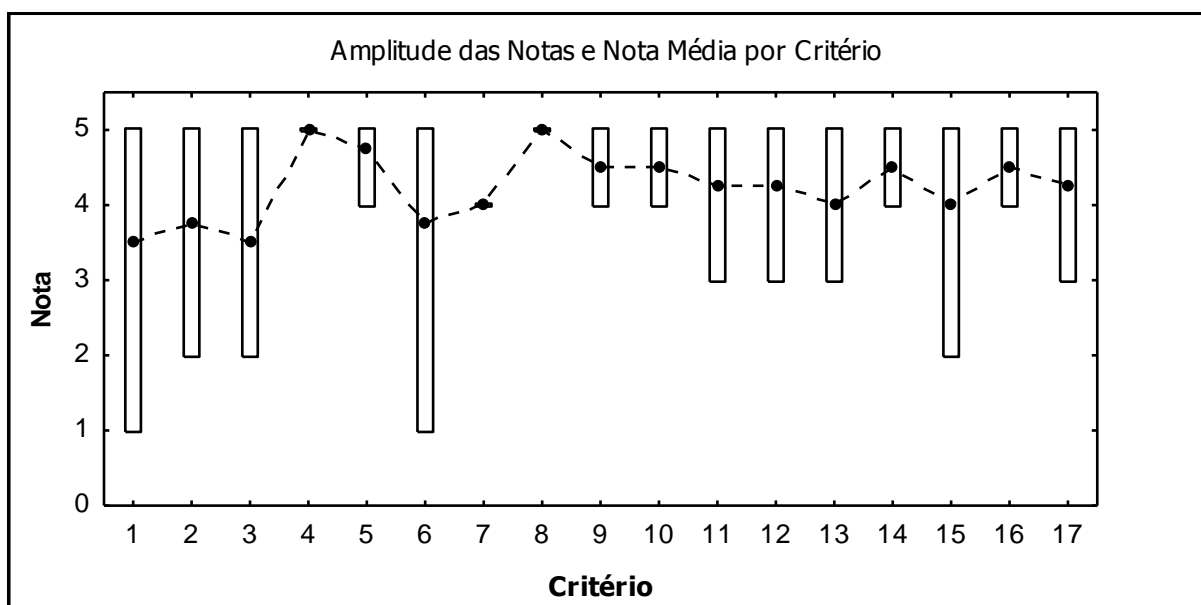
(Fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 6.1 – Respostas da Avaliação do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos

Critérios	Avaliadores				Média/ Critério
	A	B	C	D	
1	4	4	5	1	3,50
2	4	2	4	5	3,75
3	3	2	4	5	3,50
4	5	5	5	5	5,00
5	4	5	5	5	4,75
6	4	1	5	5	3,75
7	4	4	4	4	4,00
8	5	5	5	5	5,00
9	4	5	5	4	4,50
10	5	4	5	4	4,50
11	4	3	5	5	4,25
12	3	4	5	5	4,25
13	4	3	4	5	4,00
14	5	4	4	5	4,50
15	4	2	5	5	4,00
16	4	4	5	5	4,50
17	4	3	5	5	4,25
Média/ Avaliador	4,12	3,53	4,71	4,59	4,24

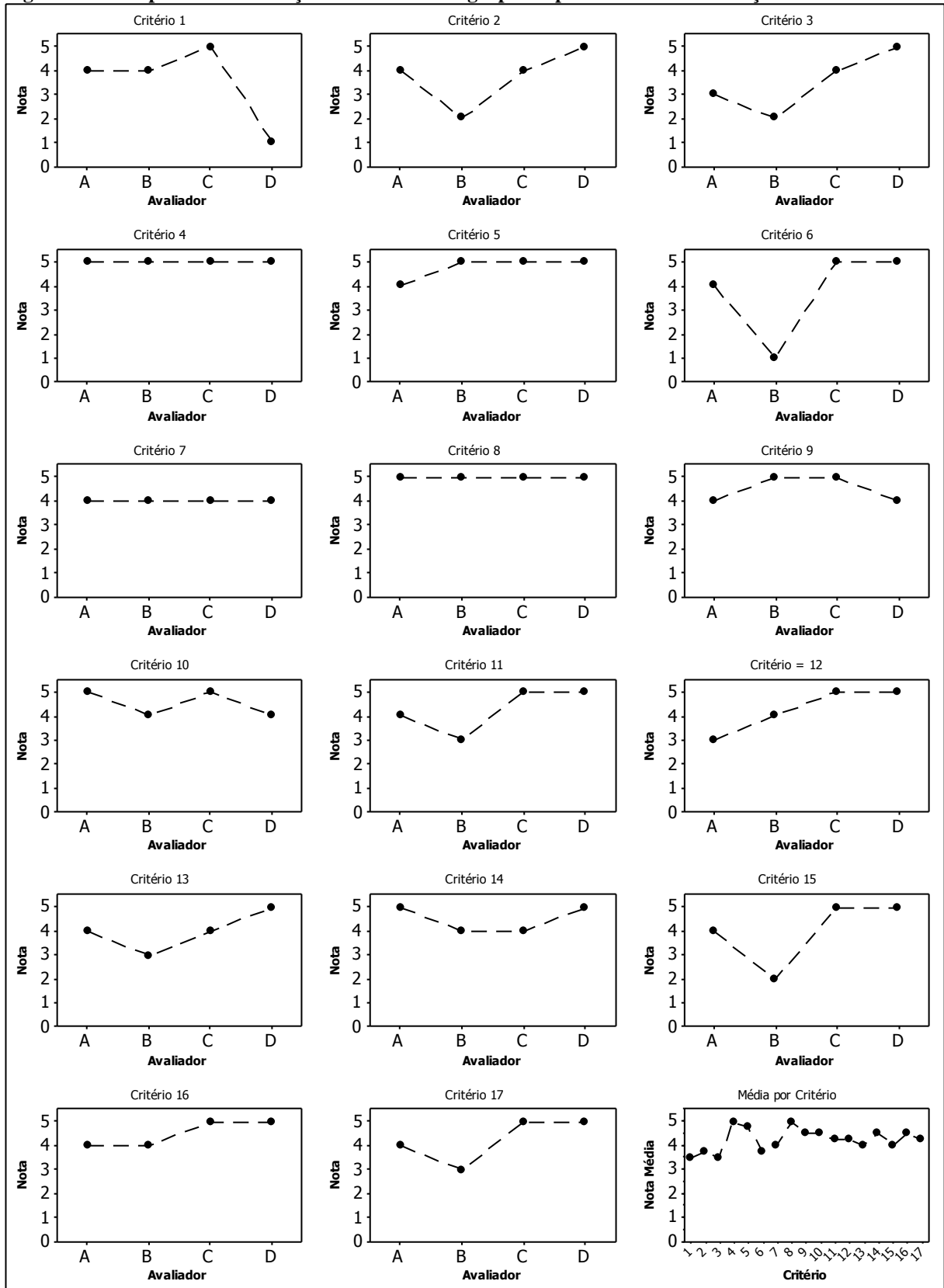
(Fonte: Elaborada pelo autor)

Figura 6.1 – Amplitude das Notas e Nota Média da Avaliação do Método de Avaliação Ambiental de Conceitos de Produtos



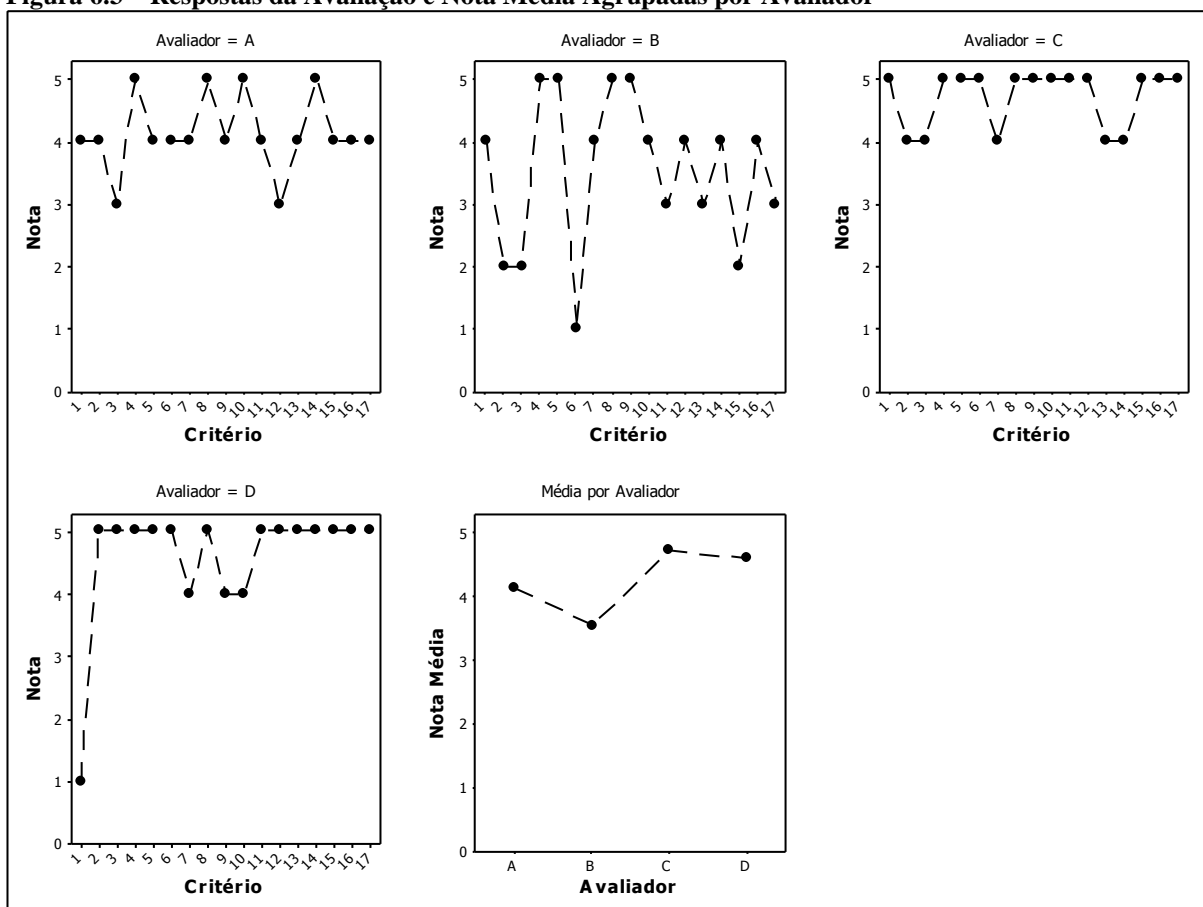
(Fonte: Elaborada pelo autor)

Figura 6.2 – Respostas da Avaliação e Nota Média Agrupadas por Critério de Avaliação



(Fonte: Elaborada pelo autor)

Figura 6.3 – Respostas da Avaliação e Nota Média Agrupadas por Avaliador



(Fonte: Elaborada pelo autor)

Quadro 6.3 – Respostas das Perguntas Qualitativas

(continua)

Questão	Comentário dos Especialistas
01.	<p>C: O método é interessante porque introduz parâmetros quantitativos ao processo de avaliação do conceito, algo que normalmente (pela minha experiência) é feito de forma predominantemente empírica e subjetiva.</p> <p>D: Não. A avaliação do conceito deve ser definida pelo usuário, preferencialmente por pessoas experientes ou por uma equipe multidisciplinar.</p>
02.	<p>B: Os conceitos a serem avaliados em geral precisam ser de natureza muito distinta para que tenhamos uma diferenciação importante nos quesitos ambientais. Os conceitos de produto a serem avaliados em geral apresentam uma interdependência em função da tecnologia já dominada pela empresa, bem como de seu processo produtivo, o que pode levar o método a apresentar pouca discriminação na avaliação dos conceitos. Para tais critérios, talvez o produto já devesse nascer com algumas premissas definidas como requisitos do produto, de forma que os conceitos fossem projetados para aquele fim. Para produtos já concebidos, cuja função seja semelhante, mas que haja uma independência na produção e tecnologia, o método conseguirá distinguir os conceitos de produtos e facilitar o julgamento.</p> <p>C: Talvez fosse interessante orientar de forma um pouco diferente a escolha do tipo de produto, quem sabe com um roteiro de perguntas cuja combinação de respostas (sim ou não) determine qual o tipo mais adequado; poderia ser também uma planilha Excel.</p> <p>D: Sim, desde que tratado por uma equipe multidisciplinar ou por usuários com experiência no ramo, devido à subjetividade das classificações pelo usuário (<i>obs.: classificações se referem ao tipo de produto: A, B, C, D ou E</i>).</p>

Quadro 6.3 – Respostas das Perguntas Qualitativas

(continuação)

Questão	Comentário dos Especialistas
03.	B: Os critérios talvez devessem entrar como requisito, não como critério de avaliação posterior, já que foi investida boa dose de engenharia para se definir um conceito que posteriormente será avaliado. C: Penso que o uso disciplinado do método pode conduzir a respostas consistentes. É preciso um bom discernimento principalmente na comparação entre as alternativas (fase 2). D: Sim, porque traz para a discussão e análise fatores que muitas vezes não são levados em consideração ou são analisados parcialmente na concepção do projeto.
04.	C: Sim, penso que o método tem uma boa abrangência de aplicação. D: Sim, a classificação de A a D e o tipo combinado permite abranger uma amplitude muito grande de produtos.
05.	D: Sim e ainda traz o envolvimento de aspectos econômicos voltados ao meio ambiente.
06.	C: Sim, seguindo-se a sequência proposta é possível determinar o melhor conceito. D: O método é capaz de definir com precisão um conceito de produto ecologicamente viável, porém a eficiência dessa definição dependera dos critérios de avaliação e classificação do usuário ou equipe que aplicou o método.
07.	B: O método exige um treinamento básico para ser corretamente utilizado. Se utilizado em uma escala maior, utilizado por uma gama de engenheiros ou projetistas, seria interessante uma interface mais amigável e autoexplicativa, por exemplo, um aplicativo em HTML. C: Conforme comentado na pergunta 2, a documentação poderia ser melhorada, talvez também com a criação de um <i>software</i> que compreendesse o processo completo, o que facilitaria muito a aplicação do método. (Comentário a parte, pois sai do foco da tese: se o <i>software</i> compreendesse também os demais critérios de avaliação de conceito tais como qualidade, custo, manufatura, poderia até se tornar um produto comercial). D: Um resumo descritivo das terminologias no início da estrutura, um quadro resumo de 1 folha com as ferramentas de apoio (tabelas, fluxograma, organogramas, etc.) e evitar a utilização de sinônimos (<i>por exemplo, evitar utilizar conceito e alternativa de forma intercambiável</i>) para as terminologias ajudaria na rapidez da assimilação do método, bem como sua aplicação.
08.	C: Sim, pois os critérios ambientais são gerais, portanto podem ser aplicados a praticamente qualquer tipo de projeto cujo resultado seja um produto físico. D: Sim, apenas adaptável para diferentes produtos ou empresas, mas também adaptável para processos e empresas que não desenvolvam o produto em si, mas o processo de fabricação.
09.	C: Sim. Penso que poderia inclusive ser expandido para compreender critérios não ambientais, como qualidade, custo, manufatura, etc. D: O método é abrangente, mas sua expansão requer discussões e pessoas especializadas em questões ambientais.
10.	C: Sugestão: no exemplo numérico (<i>apêndice D</i>), mostrar como transportar os dados das planilhas de derivação de prioridades para a planilha que executa a classificação final. D: Os sinônimos precisam ser evitados e as terminologias precisam ser definidas (ver resposta 7).
11.	D: Sim, mas a eficiência do método em determinar o melhor conceito do ponto de vista ambiental fica vinculada à experiência e capacitação do usuário ou equipe que aplicou o método (ver resposta 6).
12.	C: Conforme mencionado na pergunta 14, como o método é matemático, penso que deve ser agregada uma documentação textual auxiliar para o completo entendimento do histórico.
13.	C: Conforme comentado anteriormente, poderia ser desenvolvido um <i>software</i> que abrangesse o método em todas as suas etapas, pois, por exemplo, pode haver dúvidas ou dificuldade na avaliação do tipo de produto e na montagem da hierarquia dos critérios.
14.	C: Como o método é bastante objetivo, talvez seja necessário acrescentar alguma documentação textual ao processo de avaliação para uso e entendimento futuro. Quanto à facilidade de aprender e ensinar, uma boa documentação de apoio com exemplos práticos de aplicação pode ajudar no aprendizado.
15.	C: Sim, o método é uma boa iniciativa para a inclusão de critérios ambientais e não é conflitante com os demais requisitos do produto. D: Sim inclusive com a inter-relação de fatores econômicos.
16.	C: Sim, pois é um método objetivo e reduz a possibilidade de viés das decisões individuais.
17.	D: Sim, é uma ferramenta de grande valor, principalmente por se basear em critérios ambientais, para orientar e dirigir gerentes de projetos para a introdução do DfE no desenvolvimento do produto.

Quadro 6.3 – Respostas das Perguntas Qualitativas

(conclusão)

Questão	Comentário dos Especialistas
18.	A: todos. B: todos, exceto adaptabilidade do produto. C: Com o auxílio da escala fornecida é possível fazer as comparações. Entretanto, para alguns critérios (por exemplo, energia incorporada, grau de escassez e fonte de energia) será necessária uma investigação e conhecimento mais profundo dos materiais utilizados para que a comparação seja consistente. D: todos
19.	B: Pode não haver discriminação entre conceitos. Dificilmente teremos conceitos tão distintos em todos os critérios utilizados, a menos que o produto já seja planejado com tais requisitos. C: Não vejo nenhum ponto negativo, pelo contrário, achei uma proposta bastante interessante. Penso que sua aplicação continuada poderá identificar melhorias, e talvez a sua aplicação se viabilize a partir de um número mínimo de conceitos (4 ou 5). D: Não deve ser aplicado por pessoas sem experiência, por se tratar de classificações e julgamentos subjetivos e não exatos.
20.	B: Permite de uma forma estruturada comparar conceitos perante requisitos ambientais. C: O método se traduz em uma ferramenta bastante interessante para sistematizar a escolha do melhor conceito, e quanto mais para os tipos de projetos que são mais intensivos na proposta de diferentes conceitos. D: (a) a classificação dos conceitos e sua escolha sobre o ponto de vista ambiental no início do desenvolvimento do produto; (b) possibilitar o desenvolvimento de um produto economicamente mais viável, baseado em critérios ambientais; (c) possibilitar o desenvolvimento de um produto ecologicamente classificado ou em sua amplitude total, ecologicamente correto; (d) envolver equipe multidisciplinar no desenvolvimento do produto de uma empresa; (e) identificar pontos de controle ou de melhora do produto ainda na fase conceitual, como manutenção, intercambiabilidade, montagem, etc.; (f) organiza alguns critérios que antes eram levados em consideração isoladamente e permite a comparação entre eles, possibilitando o desenvolvimento do produto voltado aos requisitos ecológicos e não só econômicos.
21.	C: O método é adequado à avaliação do melhor conceito do ponto de vista ambiental, mas seria interessante prever também a integração com os demais requisitos (qualidade, manufatura, custo, etc.), pois pode ser que o melhor conceito do ponto de vista ambiental não seja o melhor quando considerados simultaneamente os demais requisitos. D: (a) o método traz uma ferramenta de desenvolvimento do produto ao encontro das necessidades das empresas responsáveis e voltadas ao desenvolvimento sustentável, que cada vez mais tendem a desenvolver seus produtos e processos de forma a preservar o ambiente; (b) desenvolver um produto ecologicamente viável e também desenvolver um produto economicamente viável.

(Fonte: elaborado pelo autor)

Em linhas gerais, o método foi razoavelmente bem avaliado, obtendo média global 4,24. A média por avaliador foi maior que 4,0 exceto para o avaliador B, cuja média foi 3,53, sugerindo que o método necessita de algumas alterações. Com relação a cada critério, nenhum obteve nota média abaixo de 3,0. Todos ficaram com nota maior ou igual a 4,0, exceto os critérios 1 (escopo), 2 (nível de detalhamento), 3 (precisão) e 6 (eficiência), cujas notas ficaram entre 3,0 e 4,0, indicando a necessidade de se aperfeiçoar o método. As causas da necessidade de se modificar em alguns aspectos o método puderam ser inferidas pelo autor da presente tese a partir das entrevistas e do padrão de resposta do questionário. Inicialmente, são descritas as opiniões dos entrevistados e, na sequência, o que pode ser alterado no método para superar as limitações apontadas.

Durante a entrevista, o avaliador A realçou que a grande virtude do método consiste em ser quantitativo, o que combina muito bem com o estilo de raciocínio analítico de engenheiros e projetistas. Em sua experiência com consultorias em empresas, o avaliador A explicou que o uso de ferramentas quantitativas goza de maior credibilidade junto aos clientes. Por outro lado, o mesmo apontou que a maior deficiência do método consiste na tipologia ambiental adotada. Na sua visão, normalmente não é tarefa trivial para os integrantes de uma equipe de projeto escolher entre os tipos de produto (A, B, C, D ou E), exceto nos casos onde a empresa já tenha um histórico de uso de ACV ou tenha feito estudos ambientais anteriores em produtos similares ao que está sendo projetado. Como se pode observar no fluxograma da figura 5.14, o método propõe que quando não se tem certeza qual é o tipo de produto, que seja utilizada uma ACV simplificada para determiná-lo. Entretanto, o avaliador A explicou que esta ordem de operações não é muito viável, pois não há tempo suficiente para se interromper o processo de avaliação dos conceitos para se executar a ACV simplificada. Portanto, o uso da matriz ERPA ou de qualquer outra ACV simplificada não deve ser parte do método, mas uma entrada necessária para a sua correta execução.

Esta visão é corroborada pelas observações dos avaliadores C e D. Como se pode observar no quadro 6.3, o avaliador C deixa claro na resposta à questão 2 que a escolha do tipo de produto não é satisfatória. O avaliador D também julgou que a escolha do tipo de produto é subjetiva e dependente da experiência do usuário (questão 2) e apontou a mesma preocupação como resposta à questão 19, uma questão aberta que solicitava os principais pontos negativos do método. Na realidade, nenhum dos três profissionais ligados ao PDP de empresas considerou a tipologia difícil de entender. Porém, eles a julgaram difícil de ser determinada, exceto B, cuja empresa claramente manufatura um produto intensivo no uso.

Assim como A, o avaliador C também apontou como um aspecto positivo a característica quantitativa e objetiva do método. O mesmo considerou como um dos pontos fortes do método a sua característica hierárquica e, por consequência, a possibilidade da avaliação ambiental ser combinada com os demais requisitos do produto. Além disso, ele salientou que, independentemente dos critérios ambientais, o AHP parece ser muito útil para a determinação do melhor conceito com relação aos demais requisitos (quadro 6.3, questão 9).

Por outro lado, ainda segundo C, aspectos a serem melhorados, além da seleção do tipo de produto já comentada, são a implementação eletrônica e a documentação do método. Em alguma medida, estes problemas são inter-relacionados. No arquivo Excel que implementa o método, algumas tarefas são manuais. Ou seja, o usuário determina os vetores de prioridade das alternativas, dos critérios e dos agrupamentos de critérios na planilha 1

(“Modelos de Matrizes”). Entretanto, o usuário tem que transportar estes dados manualmente para as planilhas 2 (“Prioridade das Alternativas”) e 3 (“Prioridade dos Critérios”). Isto, além de confuso, precisaria estar mais bem documentado no resumo entregue aos entrevistados. Além do mais, o avaliador C chamou a atenção que a documentação deveria ser mais rica em exemplos numéricos, pois o mesmo sentiu não ser trivial executar a tarefa “adaptar hierarquia” (ver figura 5.14). O avaliador D externou as mesmas considerações durante a entrevista. Ele também ponderou que esta etapa manual complica desnecessariamente o método e reduz a sua utilidade prática. Com relação à documentação do método, ele sugeriu utilizar como exemplo as normas técnicas, onde as terminologias são definidas e seguidas com rigor, evitando-se o uso de sinônimos ou termos que se desviem da terminologia inicial definida.

O avaliador D destacou como aspecto positivo o fato de o método ser concebido para ser utilizado nas etapas iniciais do projeto do produto e também a natureza dos critérios de avaliação. Na visão de D, os critérios baseados nas estratégias do DfE são fáceis de serem entendidos pelos responsáveis pelo projeto, pois estão relacionados aos parâmetros do produto. Ainda segundo D, como a melhoria destes critérios, além de trazer benefícios ao ambiente, tem impactos econômicos, isto seria um fator facilitador para a sua adoção prática (quadro 6.3, questões 5 e 20). Adicionalmente aos pontos negativos já citados, o avaliador D também teceu quatro comentários (quadro 6.3, questões 1, 2, 9 e 19) relativos à necessidade de se ter experiência e conhecimento especializado em questões ambientais para operar o método. Isto sugere que o fluxo de informações e a documentação necessitam de aperfeiçoamentos.

Por fim, tem-se a entrevista e o questionário do avaliador B. Como principal ponto positivo, B realçou que método é muito bem estruturado. Durante a entrevista, o avaliador B, assim como D (ver quadro 6.3, questão 8), viu potencial para o método ser aplicado em outros domínios além da avaliação de conceitos, tais como avaliação entre tecnologias concorrentes. Similarmente aos demais, este especialista também avaliou ser possível utilizar o método para uma gama de produtos físicos, bem como não haver dificuldades em se julgar os critérios ambientais na etapa de projeto conceitual (quadro 6.3, questão 18). Contudo, suas maiores críticas foram com relação à implementação computacional (questão 7), à precisão do método (questão 3) e aos resultados quando o método for aplicado a produtos cuja tecnologia de fabricação seja madura e as inovações no produto são do tipo incremental, como é o caso da empresa em que ele atua (questões 2 e 19).

A crítica do avaliador B ao protótipo computacional foi similar às demais já

comentadas anteriormente, sendo, portanto, omitida. Relativamente à precisão, o especialista B comentou: “*os critérios talvez deversem entrar como requisito, não como critério de avaliação posterior...*”. Esta afirmação está correta. Um produto ambientalmente correto deve ser projetado com este propósito. Esta é uma atividade da etapa de geração de conceito, conforme a revisão bibliográfica da seção 2.4.1. O método de avaliação ambiental de conceitos de produtos não tem como objetivo substituir esta etapa, pois seu escopo é a etapa subsequente de seleção de conceitos (seção 2.4.2). Mesmo porque os critérios de avaliação estão em um nível de abstração que não fornece muitas indicações em como proceder para atingi-los na prática. Não obstante, os critérios foram obtidos a partir de regras de projeto denominadas estratégias de DfE (seção 3.3), estas sim maneiras de gerar conceitos (GUELERE FILHO, 2009), que posteriormente serão avaliados com relação ao atendimento dos requisitos ambientais. Um aspecto chave da seção 3.3 é que foram fornecidas quais são as estratégias de DfE mais indicadas dependendo do tipo de produto em desenvolvimento (A, B, C, D ou E). Desta maneira, um subproduto do método proposto nesta tese é um conhecimento que pode ser utilizado também na etapa de geração de conceito, muito embora esse não tenha sido o seu foco principal. Além das estratégias de DfE, há métodos para a geração de conceitos ambientalmente responsáveis baseados no QFD, tais como as propostas de Bove & Wang (2007), Kobayashi (2005), Masui et al. (2003) e Zhang, Wang & Zhang (1999) e a Ecofunction Matrix de Lagerstedt (2003).

Por fim, tem-se a questão se o nível de detalhamento do método é adequado para auxiliar a avaliação do conceito do produto ambientalmente mais correto. O avaliador B manifestou dúvidas se seria possível haver discriminação entre os conceitos no caso de o produto conter tecnologias maduras. Isto é, em sua visão, ao se comparar os conceitos aos pares com relação aos critérios ambientais, todos seriam aproximadamente equivalentes e a nota final de cada um seria muito próxima à dos demais. Esta questão só pode ser totalmente esclarecida por meio da utilização do método em um ou mais casos práticos. Como isto não é exequível aqui neste momento, nem foco da presente tese, duas hipóteses são discutidas.

A primeira hipótese é que, com relação aos critérios ambientais que compõem o método, os conceitos são próximos, mas há a possibilidade de nas comparações aos pares saber qual é marginalmente superior ao outro. Como foi visto no quadro 4.1, seção 4.2.2, o AHP permite a comparação quando os pares são muito próximos utilizando a escala de números absolutos de 1,1 a 1,9. Conforme discutido no capítulo 4, mesmo esta escala sendo aproximada, esta natureza aproximada é compensada pela redundância das diversas

comparações aos pares e pela insensibilidade do autovalor a desvios moderados da consistência.

Ademais, os valores derivados estão em uma escala de razão, que permite todas as operações matemáticas. Por exemplo, se as notas finais dos conceitos forem 0,80 e 0,82, pode-se afirmar que o segundo conceito é 2,5% melhor que o primeiro. Ou seja, há uma teoria matemática que garante que tais operações são válidas e que os números utilizados em tais cálculos são confiáveis. O fato da magnitude da melhoria ser pequena se deve à natureza dos conceitos e não a uma falha do método. Se o método trabalhasse com dados ordinais, a comparação de objetos muito próximos não seria confiável, o que não acontece com o AHP.

Além do mais, como foi explicado na seção 2.4.2 e mostrado na figura 5.14, a etapa de seleção de conceitos é iterativa e novos conceitos podem surgir nesta etapa. Como foi comentado na seção 2.4.2, muito embora a etapa de geração de conceitos tenha sido completada antes do início da etapa de seleção de conceitos, alguns dos refinamentos e melhorias mais criativos ocorrem durante o processo de avaliação e seleção de conceitos, na medida em que a equipe percebe quais são os pontos positivos e negativos de certas características dos conceitos. Portanto, em suma, se esta hipótese for verdadeira, não há necessidade de se alterar os critérios ambientais que compõe o método.

Por outro lado, há uma segunda hipótese, que caso seja verdadeira, exigirá alterações no método. Há a possibilidade da dificuldade de comparação dos conceitos relativamente aos critérios ser devido ao fato de o critério ser muito genérico. Dessa forma, quando se tenta comparar alternativas muito próximas, tal comparação fica inviável devido ao nível de abstração do critério. Nesta situação, há uma solução que foi discutida na seção 4.2.1 e se relaciona com a operacionalidade dos critérios, isto é, se elementos no nível mais baixo da hierarquia são suficientemente específicos para poderem ser avaliados e comparados. Quando um critério não é operacional ele deve ser adicionalmente dividido em subcritérios mais específicos. Na seção 5.2.2, onde foram apresentadas as definições operacionais dos critérios ambientais, alguns critérios eram compostos de uma série de parâmetros a serem utilizados para sua avaliação. Estes parâmetros poderiam ser trabalhadas de forma a se transformarem em subcritérios, assim como foi feito na seção 5.2.1., onde as estratégias de DfE foram transformadas em critérios de avaliação ambiental. Isto demandaria acrescentar um nível à hierarquia da figura 5.2. Por consequência, o arquivo em Excel deveria ser remodelado para acomodar esta alteração.

Contudo, ao se adicionar um nível à hierarquia, o número de comparações aos pares aumentaria. Como se pode observar na figura 5.9, a atividade “A2 – selecionar critério”

tem um filtro duplo, o tipo de produto (A, B, C, D e E) e os objetivos do PDP. Assim, este segundo filtro teria que ser obrigatoriamente utilizado de forma a tornar o método aplicável na prática. Isto consistiria em escolher um subconjunto de critérios baseado nas premissas ambientais do projeto.

Fazendo agora uma avaliação global dos aspectos negativos do método, nota-se que estes podem ser reunidos em dois grandes grupos: as críticas relativas à eficiência do método em gerar resultados úteis (discriminação de conceitos) e a estrutura e documentação do método. A primeira necessitaria de estudos de caso para ser respondida, muito embora uma solução tenha sido proposta caso tal crítica mostre-se fundada. No entanto, esta mesma crítica só foi levantada para produtos do tipo derivado, ou seja, quando as inovações no produto são do tipo incremental. Isto é, nos demais casos, tal aspecto negativo não se faz presente e não há necessidade de alteração no método.

O outro grupo de críticas envolve modificações no método. A primeira consiste em se alterar o fluxograma da figura 5.14 e utilizar a ACV como *input* do método. A segunda se compõe na alteração do protótipo computacional. Na visão do autor da presente tese, as baixas avaliações do método nos critérios 1, 2 e 6 (quadro 6.1) e a maioria das críticas captadas pelos questionários e pelas entrevistas relatadas nesta seção podem ser resolvidas alterando-se o protótipo computacional, o que tornaria o fluxo de informações mais fácil de ser entendido e, por consequência, diminuiria a dificuldade de aplicação do método. Seria necessário um aplicativo que implementasse computacionalmente o fluxograma da figura 5.14. Isto faria com que a sequência de atividades fosse imposta ao usuário. Poderia ser um *software* ou a utilização de páginas da internet, uma ideia que surgiu discutindo-se o método com o avaliador B. Cada tela do *software* ou página da internet seria uma etapa do fluxograma. Ao terminar de completar os formulários na tela/página, o usuário submeteria as informações e seria guiado a outra tela/página e assim sucessivamente. Em cada tela/página haveria *hiperlinks* para telas/páginas contendo ajuda em como completar os formulários e na tela/página inicial haveria a opção de iniciar a avaliação ou ter acesso a um exemplo completo para aprendizagem (o chamado tutorial). Outro aspecto chave desta opção seria a completa eliminação de atividades manuais tais como adaptar a hierarquia. Entretanto, a criação de uma solução computacional completa nesses moldes se constitui em outro problema de pesquisa e não foi o foco desta tese.

Aqui termina o capítulo 6, cujo objetivo foi avaliar o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos. A seguir, no capítulo 7, serão apresentadas as conclusões da tese e as sugestões para trabalhos futuros.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo conceber e estruturar um método de avaliação ambiental de conceitos de produtos baseado nas Estratégias do DfE e no AHP, com foco nos produtos físicos, principalmente os bens de consumo duráveis e os bens de capital. A justificativa por esta escolha se deveu à atualidade da temática da sustentabilidade e, em particular, à premência do tratamento da questão ambiental, sua forte dependência do processo de desenvolvimento de produtos e à necessidade de métodos e ferramentas apropriados para se incorporar as questões ambientais nas fases iniciais do projeto do produto, mais especificamente aqueles adequados à avaliação ambiental de conceitos, devido à escassez deste tipo de métodos na literatura.

Para atingir este objetivo, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica. Primeiramente, o processo de desenvolvimento de produtos foi estudado, com especial ênfase à fase de projeto conceitual, principalmente a etapa de seleção de conceitos. Tal estudo permitiu o entendimento do processo de avaliação e seleção de conceitos, suas peculiaridades, suas entradas e saídas, bem como o conhecimento dos métodos tradicionais de seleção.

No capítulo 3, foram apresentados métodos de avaliação e melhoria ambiental de produtos. Na primeira seção do capítulo, foi dada uma visão geral da ACV, o método mais poderoso para se detectar e melhorar os pontos críticos ambientais do produto. Esta seção também clarificou o grau de dificuldade deste método e forneceu subsídios para o entendimento do conceito de ciclo de vida do produto e das ACV alternativas. A segunda seção do capítulo 3 constituiu-se na primeira contribuição da presente tese. As principais propostas de ACV alternativas foram levantadas e agrupadas segundo o tipo de modificação metodológica proposta na ACV original. Por fim, a terceira seção deste capítulo apresentou uma compilação de estratégias de DfE, que resultou em 38 estratégias agrupadas em torno de 7 temas. Nesta mesma seção, foi exposta uma tipologia ambiental para produtos físicos e seu relacionamento com as estratégias, de forma a não permitir que estratégias sem importância ou mesmo contraproducentes sejam selecionadas. Esta foi a segunda contribuição da presente tese.

O capítulo 4 descreveu o método de análise hierárquica, a estrutura matemática que permitiu que o método desenvolvido fosse quantitativo, uma exigência para que seja possível estabelecer trocas e compensações entre critérios multidimensionais e conflitantes e

onde nenhuma alternativa é a melhor em todos os critérios. Um aspecto chave do AHP é que o mesmo permite tratar critérios intangíveis por meio de uma escala qualitativa, o que se mostrou ideal para o projeto conceitual, pois nesta fase os dados são imprecisos e muitos dos critérios são subjetivos. Outra contribuição da presente tese é o fornecimento dos algoritmos mais importantes do AHP para a utilização com o Excel. Recentemente, tem se notado um crescimento bastante significativo no uso deste método de decisão multicriterial e a disponibilidade de apoio computacional com interface amigável é um facilitador neste processo.

No capítulo 5, o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos foi desenvolvido. O método foi estruturado em fases, etapas e atividades, todas dispostas em uma ordem lógica e construído a partir das estratégias de DfE compiladas no capítulo 3. Foram selecionadas as estratégias relacionadas à dimensão física da entidade produto e expressas pelo uso e consumo de recursos materiais. Posteriormente, estas estratégias foram condensadas em critérios de avaliação, estes relacionados à tipologia ambiental de produtos adotada e agrupados por grau de semelhança, formando uma hierarquia de critérios ambientais para o uso com o AHP. Desta maneira, buscou-se um método aplicável a uma gama de produtos físicos e que orientasse o usuário, passo a passo, no processo de avaliação do conceito do produto que mais bem atendesse aos critérios do DfE, dentro de uma perspectiva de ciclo de vida do produto. Partiu-se do pressuposto que os usuários do método seriam gerentes de projeto e profissionais de diversas funções ligados ao desenvolvimento de produtos. Assim, o mesmo deveria ser acessível às diversas especialidades envolvidas no desenvolvimento de produto e não deveria exigir demasiada *expertise* ambiental. Dessa forma, as principais decisões foram utilizar tipos de produto ao invés de etapas do ciclo de vida do produto, utilizar as estratégias de DfE ao invés das ACV simplificadas e utilizar o AHP ao invés de outras técnicas de decisão multicriterial.

No capítulo 6, o método proposto foi analisado por profissionais ligados ao desenvolvimento de produtos de três empresas e por um consultor em DfE para avaliar sua adequação e grau de aplicação prática. Para a coleta de dados foram utilizadas entrevistas e questionários. Os principais aspectos positivos do método foram:

- Sua natureza objetiva e quantitativa;
- Sua característica hierárquica e, por consequência, a possibilidade da avaliação ambiental ser combinada com os demais requisitos do produto;
- Ser concebido para ser utilizado nas etapas iniciais do projeto do produto;

- A natureza dos critérios de avaliação, que são fáceis de serem entendidos pelos responsáveis pelo projeto, pois estão relacionados aos parâmetros do produto;
- A possibilidade de todos os critérios de avaliação serem avaliados na fase de projeto conceitual;
- A inter-relação dos critérios ambientais com fatores econômicos, facilitando a sua adoção prática;
- O potencial para o método ser aplicado em outros domínios além da avaliação de conceitos, tais como avaliação entre tecnologias concorrentes.

Também foram levantados os principais aspectos negativos do método e, em uma base teórica, todos foram discutidos. Basicamente, a alteração do fluxograma e do protótipo computacional resolveria os principais problemas apontados. Entretanto, uma questão ficou sem resposta: a eficiência do método para projetos de produto do tipo derivado.

Como o foco principal do trabalho foi a proposição do método, não foi possível avaliar de forma direta o seu grau de utilidade na solução de problemas para os quais ele foi desenvolvido. Assim, optou-se por se avaliar o método de maneira indireta, por meio do conhecimento de profissionais ligados à área de desenvolvimento de produto e à área do DfE. Muito embora tenham sido escolhidos apenas respondentes relevantes para o desenvolvimento teórico do assunto, ou seja, profissionais ligados ao PDP de empresas que executam a fase de projeto conceitual e um especialista em DfE, o pouco tempo que os profissionais tiveram para avaliar o método e a falta de uma aplicação prática limitam o alcance de suas avaliações.

Portanto, em face do que foi discutido neste capítulo e considerando as limitações deste trabalho, é possível apresentar algumas recomendações para trabalhos futuros na linha de pesquisa da presente tese.

- Aplicar o método em estudos de caso em empresas que desenvolvam produtos físicos;
- Utilizando dados de ACV completas disponíveis, criar uma tipologia ambiental para produtos físicos mais objetiva. Esta é uma meta importante e desafiadora, dado que Sousa & Wallace (2006) não foram bem sucedidos neste intento;
- Ampliar o método para outros domínios, especialmente para uso na fase de planejamento estratégico de produtos, particularmente para a atividade de análise e seleção do portfólio de produtos da empresa, visto que quanto antes as questões ambientais forem tratadas, melhor o resultado final;

- Adaptar o método para a priorização das estratégias de DfE em função da tipologia ambiental adotada. Isto consistiria em remodelar a hierarquia da figura 5.2 para acomodar as estratégias eliminadas na seção 5.2.1. Uma sugestão é criar algo semelhante ao método Pilot, mas utilizando uma abordagem de priorização baseada no AHP, que é quantitativa e não ordinal;
- Implementar o método utilizando como interface páginas da internet e disponibilizá-lo na rede de forma a torná-lo acessível a uma audiência mais ampla;
- Estabelecer empiricamente a importância relativa dos critérios e agrupamentos de critérios do método em função de variáveis de contorno, como foi esboçado no final da seção 5.2.2;
- Como alguns critérios de avaliação são interdependentes (seção 5.2.1), seria interessante modelar o método aqui proposto pelo Método de Análise em Redes (ANP), que é uma generalização do AHP e, em um segundo momento, comparar os resultados de ambos para determinar se o aumento de complexidade compensa;
- Uma vez que no projeto conceitual as informações são vagas, uma alternativa para pesquisas futuras seria utilizar o AHP/ANP com os números difusos, no que é conhecido como *Fuzzy* AHP/ANP, uma extensão recente do AHP/ANP tradicional e que ultimamente tem recebido bastante interesse por parte de acadêmicos;
- O método proposto na presente tese limita-se a produtos físicos, especificamente bens de consumo duráveis e de capital. Uma linha possível a ser seguida é ampliar, adaptar ou alterar o método para este englobar outros tipos de produtos e/ou serviços;
- O método de avaliação ambiental de conceitos de produtos limita-se a um dos pilares da sustentabilidade. Seria interessante ampliar o seu escopo para abranger os outros pilares, de forma que o método se transformasse em um método de avaliação de conceitos de produtos sustentáveis.

Para finalizar, pode-se dizer que o objetivo do trabalho foi atingido. Assim, o método de avaliação ambiental de conceitos de produtos se constitui em uma contribuição para o desenvolvimento de produtos ambientalmente responsáveis.

REFERÊNCIAS

ABELE, E.; REINER, A.; BIRKHOFFER, H. *Environmentally-friendly product development: methods and tools*. London: Springer, 2005.

ALTING, L.; LEGARHT, J. B. Life Cycle Engineering and Design. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 44 (2), 569–580, 1995

ASIEDU, Y.; GU, P. Product Life Cycle Cost Analysis: state of art review. *International Journal of Production Research*, 36 (4), 883–908, 1998.

AYAĞ, Z.; ÖZDEMİR, R. A hybrid approach to concept selection through fuzzy analytic network process. *Computers Industrial Engineering*, 56, 368–379, 2009.

AZAPAGIC, A.; CLIFT, R. Life cycle assessment and multiobjective optimisation. *Journal of Cleaner Production*, 7, 135–143, 1999.

BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; DA SILVA, J.C. *Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem*. Barueri: Manoele, 2008.

BAXTER, M. *Projeto de Produto: guia prático para o design de novos produtos*. 2ª Ed. São Paulo: Editora Blucher, 2008.

BHANDER, G. S.; HAUSCHILD, M.; MCALOONE, T. Implementing Life Cycle Assessment in Product Development. *Environmental Progress*, 22 (4), 255–268, 2003.

BOGUSKI, T.K.; HUNT, R.G.; CHOLAKIS, J.M.; FRANKLIN, W.E. LCA Methodology. In: CURRAN, M.A.(org.). *Environmental Life-Cycle Assessment*. New York: McGraw-Hill, 1996.

- BOKS, C. The soft side of ecodesign. *Journal of Cleaner Production* , 14, 1346–1356, 2006.
- BOVEA, M.D.; WANG, B. Redesign methodology for developing environmentally conscious products. *International Journal of Production Research*, 45 (18–19), 4057–4072, 2007.
- BROWN, S.L.; EISENHARDT, K.M. Product Development: Past Research, Present Findings, and Future Directions. *Academy of Management Review*, 20 (2), 344–378, 1995.
- BHUSHAN, N.; RAI, K. *Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process*. London: Springer, 2004.
- CARMONE, F.J.; KARA, A.; ZANAKIS, S.H. Monte Carlo investigation of incomplete pairwise comparison matrices in AHP. *European Journal of Operational Research*, 102, 538–553, 1997.
- CHEN, J.; LIAU, C.W. A simple life cycle assessment method for green product conceptual design. *2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01)*, 775–780, Tokyo, Japan, 2001.
- CILIBERTI, F.; PONTRANDOLFO, P.; SCOZZI, B. Investigating corporate social responsibility in supply chains: . *Journal of Cleaner Production* , 16, 1579–1588, 2008.
- CLARK, K.B.; WHEELWRIGHT, S.C. *Managing New Product and Process Development: texts and cases*. Boston: Harvard Business School, 1993.
- COOPER, R.G. Portfolio Management for Product Innovation. In: LEVINE, A.L. *Project Portfolio Management: A Practical Guide to Selecting Projects, Managing Portfolios, and Maximizing Benefits*. San Francisco: Jossey Bass, 2005.
- _____. *Winning at New Products*. 3rd Edition. Cambridge, Massachusetts: Perseus Publishing, 2001.

CRUL, M.; DIEHL, J. *Design for Sustainability: A Practical Approach for Developing Economies*. United Nations Environmental Program (UNEP), 2006.

DEMUTH, H.; BEALE, M. *Neural Network Toolbox for use with Matlab*[®]. User's Guide Version 3.0. Massachusetts: The Mathworks Inc., 1998.

DREYER, L. C.; HAUSCHILD, M. Z.; SCHIERBECK, J. A Framework for Social Life Cycle Impact Assessment. *International Journal of Lyfe Cycle Assessment* , 11 (2), 88 – 97, 2006.

DUNK, A. S. Product life cycle cost analysis: the impact of customer profiling, competitive advantage, and quality of IS information. *Management Accounting Research* , 15, 401–414, 2004.

EAGAN, P.; WEINBERG, L. Application of Analytic Hierarchy Process Techniques to Streamlined Life-Cycle Analysis of Two Anodizing Processes. *Environmental Science and Technology* , 33, 1495–1500, 1999.

EDWARDS, W.; BARRON, F.H. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 60, 306–325, 1994.

ELLRAM, L. M.; TATE, W.; CARTER, C. R. Applying 3DCE to environmentally responsible manufacturing practices. *Journal of Cleaner Production* , 16, 1620–1631, 2008.

_____. Product-process-supply chain: an integrative approach to three-dimensional concurrent engineering. *International Journal of Physical Distribution Logistics Management*, 37 (4), 305–330, 2007.

EVERSHEIM, W.; NEUHAUSEN, J.; SESTERHENN, M. Design-to-Cost for Production Systems. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* , 47 (1), 357–360, 1998.

FIGGE, F.; HAHN, T. Sustainable Value Added – measuring corporate contributions to sustainability beyond eco-efficiency. *Ecological Economics* , 48, 173–187, 2004.

FIKSEL, J. *Design for Environment: A Guide to Sustainable Product Development*. 2nd Edition. New York: Mc Graw Hill, 2009.

FLEISCHER, G.; GERNER, K.; KUNST, H.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G. A Semi-Quantitative Method for the Impact Assessment of Emissions Within a Simplified Life Cycle Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment* , 6 (3), 149–156, 2001.

FLEISCHER, G.; SCHIMIDT, W.P. Iterative Screening LCA in an Eco-Design Tool. *International Journal of Life Cycle Assessment* , 2 (1), 20–24, 1997.

FORMAN, E.; SELLY, M.A. *Decision by Objectives: how to convince others that you are right*. Singapore: World Scientific Publishing, 2001.

FREY, D.D.; HERDER, P.M.; WIJNIA, Y; SUBRAHMANIAN, E.; KATSIKOPOULOS, K.; de NEUFVILLE, R.; OYE, K.; CLAUSING, D.P. Research in engineering design: the role of mathematical theory and empirical evidence. *Research in Engineering Design*, 21, 145–151, 2010.

FREY, D.D.; HERDER, P.M.; WIJNIA, Y; SUBRAHMANIAN, E.; KATSIKOPOULOS, K.; CLAUSING, D.P. The Pugh Controlled Convergence method: model-based evaluation and implications for design theory. *Research in Engineering Design*, 20, 41–58, 2009.

GAUTHIER, C. Measuring Corporate Social and Environmental Performance: The Extended Life-Cycle Assessment. *Journal of Business Ethics* , 59, 199–206, 2005.

GIUDICE, F.; LA ROSA, G.; RISITANO, A. *Product Design for the Environment: A Life Cycle Approach*. Florida: CRC Press, 2006.

GOEDKOOP, M.; SCHRYVER, A.D.; OELE, M. *Introduction to LCA with SimaPro 7*. Report Version 4.2. PRé Consultants B.V., Amersfoort, The Netherlands, 2008.

GONZÁLEZ, B.; DÍAZ, B.A.; TORRE, P.L.T. A fuzzy logic approach for the impact assessment in LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 37, 61–79, 2002.

GOODWIN, P.; WRIGHT, G. *Decision Analysis for Management Judgment*. 3rd Edition. West Sussex: John Wiley & Sons, 2004.

GRAEDEL, T.; ALLENBY, B.R. *Industrial Ecology*. 2nd Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2003.

_____. *Design for environment*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1998.

GRAEDEL, T.E.; GRENVILLE, J.A.H. *Greening the Industrial Facility*. New York: Springer, 2005

GRAEDEL, T.; SAXTON, E. Improving the Overall Environmental Performance of Existing Telecommunications Facilities. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 7 (4), 219–224, 2002.

GRIFFIN, A. PDMA Research on New Product Development Practices: Updating Trends and Benchmarking Best Practices. *Journal of Product Innovation Management*. (14), 429–458, 1997.

GRUBISIC, V.V.F. *Metodologia de Gerenciamento Integrado de Riscos Técnicos e Gerenciais para o Projeto de Produtos*. 2009. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

GUELERE FILHO, A. *Integração do Ecodesign ao Modelo Unificado para a Gestão do Processo de Desenvolvimento de Produtos: Estudo de Caso em uma Grande Empresa de Linha Branca*. 2009. 283 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2009.

GÜERECA, L.P.; AGELL, N.; GASSÓ, S.; BALDASANO, J.M. Fuzzy Approach to Life Cycle Impact Assessment: An Application for Biowaste Management Systems. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12 (7), 488–496, 2007.

GUINÉE, J.B. (Final Ed.). *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. Series: Eco-Efficiency in Industry and Science, Vol. 7. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

HAES, H.A.U. Comments on “Life Cycle Sustainability Assessment of Products”. *International Journal of Life Cycle Assessment* 3 (2), p.95, 2008.

HART, S.L. A Natural-Resource-Based View of the Firm. *The Academy of Management Review*, 20 (4), 986–1014, 1995.

HAUSCHILD, M.Z. Assessing Environmental Impacts in a Life-Cycle Perspective. *Environmental Science & Technology*, 15 (February), 81A–88A, 2005.

HAUSCHILD, M.; DREYER, L.; JØRGENSEN, A. Assessing social impacts in a life cycle perspective – Lessons learned. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 57, 21–24, 2008.

HAUSCHILD, M.; JESWIET, J.; ALTING, L. From Life Cycle Assessment to Sustainable Production: Status and Perspectives. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 54 (2), 1–21, 2005.

_____. Design for Environment – Do We Get the Focus Right? *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 53 (1), 1–4, 2004.

HAUSCHILD, M.; WENZEL, H.; ALTING, L. Life Cycle Design – a Route to the Sustainable Industrial Culture? *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 48 (1), 393–396, 1999.

HAUSCHILD, M.; WENZEL, H. *Environmental Assessment of Products Volume 2: Scientific Background*. London: Chapman & Hall, 1998.

HEIJUNGS, R. (Final Ed.). *Environmental Life Cycle Assessment of Products*. Vol I: Guide. Leiden: CML, Leiden University, 1992a.

_____. (Final Ed.). *Environmental Life Cycle Assessment of Products*. Vol II: Backgrounds. Leiden: CML, Leiden University, 1992b.

_____. A generic method for the identification of options for cleaner products. *Ecological Economics*, 10, 69–81, 1994.

HENDRICKSON, C.T.; HORVATH, A.; JOSHI, S.; KLAUSNER, M.; LAVE, L.B.; McMICHAEL, F.C. Comparing two life cycle assessment approaches: a process model vs. economic input-output-based assessment. *Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 176–181, San Francisco, USA, 1997.

HENDRICKSON, C.T.; LAVE, L.B.; MATTHEWS, H.S. *Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach*. Washington: RFF Press, 2006.

HENSON, R.P.; CULABA, A.B.; MENDOZA, G.A. Evaluating Environmental Performance of Pulp and Paper Manufacturing Using the Analytic Hierarchy Process and Life-Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 6 (1), 15–28, 2002.

HOCHSCHORNER, E.; FINNVEDEN, G. Life Cycle Approach in the Procurement Process: The Case of Defence Materiel. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (3), 200–208, 2006.

_____. Evaluation of Two Simplified Life Cycle Assessment Methods. *International Journal of Life Cycle Assessment* , 8 (3), 119–128, 2003.

HUNG, M.L.; YANG, W. F.; MA, H.W.; YANG, Y.M. A novel multiobjective programming approach dealing with qualitative and quantitative objectives for environmental management. *Ecological Economics*, 56, 584–593, 2006.

HUNKELER, D. Societal LCA Methodology and Case Study. *International Journal of Life Cycle Assessment* , 11 (6), 371–382, 2006.

HUNKELER, D.; REBITZER, G. The Future of Life Cycle Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment* , 10 (5), 305–308, 2005.

_____. Life Cycle Costing – Paving the Road to Sustainable Development? *International Journal of Life Cycle Analysis*, 8 (2), 109–110, 2003.

HUR, T.; LEE, J.; RYU, J.; KWON, E. Simplified LCA and matrix methods in identifying the environmental aspects of a product system. *Journal of Environmental Management* , 75, 229–237, 2005.

HUTCHINS, M. J.; SUTHERLAND, J. W. An exploration of measures of social sustainability and their application to supply chain decisions. *Journal of Cleaner Production* , 16, 1688–1698, 2008.

JANG, J.S.R.; GULLEY, N. *Fuzzy Logic Toolbox for use with Matlab®*. User's Guide Version 2.0. Massachusetts: The Mathworks Inc., 1998.

JOHANSSON, G. Success factors for integration of ecodesign in product development – A review of state of the art. *Environmental Management and Health* , 13 (1), 98–107, 2002.

JOLLIET, O.; MARGNI, M.; CHARLES, R.; HUMBERT, S.; PAYET, J.; REBITZER, G.; ROSENBAUM, R. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8 (6) 324–330, 2003.

JOLLIET, O.; WENK, R.M.; BARE, J.; BRENT, A.; GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; ITSUBO, N.; PEÑA, C.; PENNINGTON, D.; POTTING, J.; REBITZER, G.; STEWART, M.; HAES, H.A.U.; WEIDEMA, B. The LCIA Midpoint-damage Framework of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 9 (6), 394–404, 2004.

JØRGENSEN, A.; HAUSCHILD, M. Z.; JØRGENSEN, M. S.; WANGEL, A. Relevance and feasibility of social life cycle assessment from a company perspective. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 14 (3), 204–214, 2009.

JOSHI, S. Product Environmental Life-Cycle Assessment Using Input-Output Techniques. *Journal of Industrial Ecology*, 3 (2), 95–120, 2000.

KARLSSON, R.; LUTTROPP, C. EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special issue. *Journal of Cleaner Production*, 14, 1291–1298, 2006.

KEOLEIAN, G.A.; MENEREY, D. *Life Cycle Design Guidance Manual: Environmental Requirements and the Product System*. USEPA, 1993.

KAHRAMAN, C. Multi-Criteria Decision Making Methods and Fuzzy Sets. In: _____ (org.). *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making: Theory and Applications with Recent Developments*. New York: Springer, 2008.

KHAN, F.; SADIQ, R.; VEICHT, B. Life cycle iNdeX (LInX): a new indexing procedure for process and product design and decision-making. *Journal of Cleaner Production*, 12, 59–76, 2004.

KLIR, G.J.; YUAN, B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

KLÖPFER, W. Life Cycle Sustainability Assessment of Products (with Comments by Helias A. Udo de Haes p.95). *International Journal of Life Cycle Assessment* , 13 (2), 89–94, 2008

_____. Life-Cycle Based Methods for Sustainable Product Development. *International Journal of Life Cycle Assessment* , 8 (3), 157–159, 2003.

KOBAYASHI, H. Strategic evolution of eco-products: a product life cycle planning methodology. *Research in Engineering Design*, 16, 1–16, 2005.

LABUSCHAGNE, C.; BRENT, A. C. Social Indicators for Sustainable Project and Technology Life Cycle Management in the Process Industry. *International Journal Life Cycle Assessment* , 11 (1), 3–15, 2006.

_____. Sustainable Project Life Cycle Management: the need to integrate life cycles in the manufacturing sector. *International Journal of Project Management* , 23, 159–168, 2005.

LABUSCHAGNE, C.; BRENT, A. C.; ERCK, R. P. Assessing the sustainability performances of industries. *Journal of Cleaner Production* , 13, 373–385, 2005.

LAGERSTEDT, J. *Functional and environmental factors in early phases of product development – Ecofunctional matrix*. 2002. 156 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – KTH Royal Institute of Technology, School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, 2003.

LAMATA, M.T.; PELAEZ, J.I. A Method for Improving the Consistency of Judgements. *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 10 (6), 2002.

LARSON, E.W.; GOBELI, D.H. Matrix Management: Contradictions and Insights. *California Management Review*, 29 (4), 126–138, 1987.

LEE, K.M.; PARK, P.J. *Ecodesign: Best Practice of ISO/TR 14062*. Eco-product Research Institute (ERI), Ajou University, Korea, 2005.

LINDAHL, M.; HJELML, O.; SUNDIN, E.; THURESSON, L. What could be learned from the utilization of Design for Environment within manufacturing companies? *Fourth International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, p.232–237, 2005.

LOOTSMA, F.A. *Multi-Criteria Decision Analysis via Ratio and Difference Judgment*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999.

LUTTROP, C.; LAGERSTEDT J. EcoDesign and The Ten Golden Rules: Generic Advice for Merging Environmental Aspects into Product Development. *Journal of Cleaner Production*, 14, 1396–1408, 2006.

MASCLE, C.; ZHAO, H. P. Integrating environmental consciousness in product/process development based on life-cycle thinking. *International Journal Production Economics*, 112, 5–17, 2008.

MASONI, P.; SCIMÌA, E.; SÁRA, B. VerDEE – A new tool for the adoption of Life Cycle Assessment in Small and Medium-sized Enterprises. *Proceedings of SPIE*, 4193, 252–260, Boston, MA, USA, 2001.

MASUD, A.S.M.; RAVINDRAN. R. Multiple Criteria Decision Making. In: RAVINDRAN, R. (org.). *Operations Research Methodologies*. Boca Raton: CRC Press, 2009.

MASUI, K.; SAKAO, T.; KOBAYASHI, M.; INABA, A. Applying Quality Function Deployment to Environmentally Conscious Design. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 40(1), 90–106, 2003.

MATTHEWS, H.S.; SMALL, M.J. Extending the Boundaries of Life-Cycle Assessment through Environmental Economic Input-Output Models. *Journal of Industrial Ecology*, 4 (3), 7–10, 2001.

MAXWELL, D.; VORST, R. van der. Developing Sustainable Products and Services. *Journal of Cleaner Production*, 11, 883–895, 2003.

MENDES, G.H.S. *O Processo de Desenvolvimento de Produto em Empresas de Base Tecnológica: Caracterização da Gestão e Proposta de Modelo de Referência*. 2008. 294 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

MIHELICIC, J.R.; CRITTENDEN, J.C.; SMALL, M.J.; SHONNARD, D.R.; HOKANSON, D.R.; QIONG, Z.; CHEN, H.; SORBY, S.A.; JAMES, V.U.; SUTHERLAND, J.W.; SCHNOOR, J.L. Sustainability Science and Engineering: The Emergence of a New Metadiscipline. *Environmental Science and Technology*, 37 (23), 5314–5324, 2003.

MILLET, I; SAATY, T.L. On the relativity of relative measures – accommodating both rank preservation and rank reversals in the AHP. *European Journal of Operational Research*, 121, 205–212, 2000.

MILLET, I.; SCHONER, B. Incorporating negative values into the Analytic Hierarchy Process. *Computers & Operations Research*, 32, 3163–3173, 2005.

MUNDA, G. *Social Multi-Criteria Evaluation for a Sustainable Economy*. Berlin: Springer, 2008.

MUSINGWINI, C.; MINNITT, R.C.A. Ranking the efficiency of selected platinum mining methods using the analytic hierarchy process (AHP). In: International Platinum Conference ‘Platinum in Transformation’, 3, 2008. *Proceedings...* The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2008, 319–326.

NGUYEN, H.T.; PRASAD, N.R.; WALKER, C.L.; WALKER, E.A. *A first course in fuzzy and neural control*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2003.

NIELSEN, P.; WENZEL, H. Integration of environmental aspects in product development: a stepwise procedure based on quantitative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 10, 247–257, 2002.

NIEMIRAA, M.P.; SAATY, T.L. An Analytic Network Process model for financial-crisis forecasting. *International Journal of Forecasting*, 20, 573–587, 2004.

ONG, S.; KOH, T.; NEE, A. Assessing the environmental impact of materials processing techniques using an analytical hierarchy process method. *Journal of Materials Processing Technology*, 113, 424–431, 2001.

_____. Development of a semi-quantitative pre-LCA tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 574–582, 1999.

ÖNÜT, S.; KARA, S.S.; IŞIK, E. Long term supplier selection using a combined fuzzy MCDM approach: A case study for a telecommunication company. *Expert Systems with Applications*, 36, 3887–3895, 2009.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J. GROTE, K.H. *Engineering Design: A Systematic Approach*. 3rd Ed. London: Springer-Verlag, 2007.

PARK, J.H.; SEO, K.K. A knowledge-based approximate life cycle assessment system for evaluating environmental impacts of product design alternatives in a collaborative design environment. *Advanced Engineering Informatics*, 20, 147–154, 2006.

PARK, J.H.; SEO, K.K.; WALLACE, D. Approximate life cycle assessment of classified products using artificial neural network and statistical analysis in conceptual product design. *2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign'01)*, 321–326, Tokyo, Japan, 2001.

PENNINGTON, D.W.; POTTING, J.; FINNVEDEN, G.; LINDEIJER, E.; JOLLIET, O.; RYDBERG, T.; REBITZER, G. Life Cycle Assessment Part 2: Current Impact Assessment Practice. *Environmental International*, 30, 721–739, 2004.

PMI, Project Management Institute. *Um Guia Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBoK)*. 3^a. Edição. Pennsylvania: Project Management Institute Inc., 2004.

QIAN, Y.; HUANG, Z.; YAN, Z. Integrated Assessment of Environmental and Economic Performance of Chemical Products Using Analytic Hierarchy Process Approach. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 15 (1), 81–87, 2007.

REBITZER, G.; EKVALL, T.; FRISCHKNECHT, R.; HUNKELER, D.; NORRIS, G.; RYDBERG, T.; SCHIMIDT, W.P.; SUH, S.; WEIDEMA, B.P.; PENNINGTON, D.W. Life Cycle Assessment Part 1: Framework, Goal and Scope Definition, Inventory Analysis, and Applications. *Environment International*, 30, 701–720, 2004.

REBITZER, G.; HUNKELER, D. Life Cycle Costing in LCM: Ambitions, Opportunities, and Limitations. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 8 (5), 253 – 256, 2003.

REYES, D.S.; WRIGHT, T.L. A design for the environment methodology to support an environmental management system. *Integrated Manufacturing Systems*, 12 (5), 323–332, 2001.

ROMBOUTS, J.P. LEADS II: A knowledge-based system for ranking DfE Options. *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 287 – 291, Illinois, USA, 1998.

ROSE, C.M. *Design for Environment: A Method for Formulating Product End-of-Life Strategies*. 2000. 175 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Stanford, 2001.

ROSE, C.M., ISHII, K.; STEVELS. Influencing Design to Improve Product End-of-Life Stage. *Research in Engineering Design*, 13, 83–93, 2002.

ROSE, C.M.; STEVELS, A.; ISHII, K. A New Approach to End-of-Life Design Advisor (ELDA). *Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 99–104, San Francisco, USA, 2000.

ROSS, T.J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 2nd Edition. West Sussex: John Wiley & Sons, 2004.

ROZENFELD, H.; FORCELLINI, F.A.; AMARAL, D.C.; TOLEDO, J.C.; da SILVA, S.L.; ALLIPRANDINI, D.H.; SCALICE, R.K. *Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo*. São Paulo: Saraiva, 2006.

SAATY, T.L. Making and Validating Complex Decisions with the AHP/ANP. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 14 (1), 1–36, 2005a.

_____. The Analytic Hierarchy and Analytic Network Processes for the Measurement of Intangible Criteria and for Decision-Making. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. (ed.). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of Art Surveys*. New York: Springer, 2005b.

_____. Fundamentals of the analytic network process – dependence and feedback in decision-making with a single network. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13 (2), 129–157, 2004.

_____. Decision-making with the AHP: Why is the Principal Eigenvector Necessary. *European Journal of Operational Research*, 145, 85–91, 2003.

SAATY, T.L.; OZDEMIR, M. Negative Priorities in the Analytic Hierarchy Process. *Mathematical and Computer Modelling*, 37, 1063–1075, 2003.

SAATY, T.L.; VARGAS, L.G. *Decision Making with the Analytic Network Process: Economic, Political, Social and Technological Applications with Benefits, Opportunities, Costs and Risks*. New York: Springer, 2006.

SANTOS, A.B. *Modelo de Referência para Estruturar o Programa de Qualidade Seis Sigma: Proposta e Avaliação*. 2006. 312 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

SCHMIDT, I.; MEURER, M.; SALING, P.; KICHERER, A.; REUTER, W.; GENSCHE, C. SEEBalance®: Managing Sustainability of Products and Processes with the Socio-Eco-Efficiency Analysis by BASF. *Greener Management International*, 45, 79–94, 2004.

SEPÄLLÄ, J. *Life Cycle Impact Assessment Based on Decision Analysis*. 2003. 63 f. Thesis (Doctor of Science in Technology) – Department of Engineering Physics and Mathematics, Helsinki University of Technology, Helsinki, 2003

SEPPÄLLÄ, J.; BASSON, L.; NORRIS, G.A. Decision Analysis Frameworks for Life-Cycle Impact Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 5 (4), 45–68, 2002.

SEPPÄLLÄ, J.; HÄMÄLÄINEN, R.P. On the Meaning of the Distance-to-Target Weighting Method and Normalisation in Life Cycle Impact Assessment. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6 (4), 211–218, 2001.

SEPPÄLLÄ, J.; KOSKELA, M.; MELANEN, M.; PALPERI, M. The Finnish metals industry and the environment. *Resources, Conservation and Recycling*, 35, 61–76, 2002.

SEURING, S.; MÜLLER, M. From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1699–1710, 2008.

SEURING, S.; SARKIS, J.; MÜLLER, M.; RAO, P. Sustainability and Supply Chain Management – An Introduction to the Special Issue. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1545–1551, 2008.

SIPAHI, S.; TIMOR, M. The Analytic Hierarchy Process and Analytic Network Process: an overview of applications. *Management Decision*, 48 (5), 775–808, 2010.

SOUSA, I.; EISENHARD, J.L.; WALLACE, D. Approximate Life-Cycle Assessment of Product Concepts Using Learning Systems. *Journal of Industrial Ecology*, 4 (4), 61–81, 2001.

SOUSA, I.; WALLACE, D. Product Classification to Support Approximate Life-Cycle Assessment of Design Concepts. *Technological Forecasting & Social Change*, 73, 228–249, 2006.

SROUFE, R.; CURKOVIC, S.; MONTABON, F.; MELNYK, S. A. The new product design process and design for environment – "crossing the chasm". *International Journal of Operations Production Management*, 20 (2), 267–291, 2000.

SUH, S.; HUPPES, G. Methods for Life Cycle Inventory of a product. *Journal of Cleaner Production*, 13, 687–697, 2005.

TAN, R.R.; CULABA, A.B.; AVISO, K.B. A fuzzy linear programming extension of the general matrix-based life cycle model. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1358–1367, 2008.

TELENKO, C.; SEEPERSAD, C.C.; WEBBER, M.E. A Compilation of Design for Environment Principles and Guidelines. *Proceedings of IDETC/CIE*, 1–13, 2008.

THOMPSON, S. B. Environmentally-sensitive Design: Leonardo was right! *Materials and Design*, 20, 23–30, 1999.

TSOULFAS, G. T.; PAPPIS, C. P. A model for supply chains environmental performance analysis and decision making. *Journal of Cleaner Production*, 16, 1647–1657, 2008.

ULRICH, K.T.; EPPINGER, S.D. *Product Design and Development*. 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

VERNADAT, F.B. *Enterprise Modeling and Integration: principles and applications*. London: Chapman & Hall, 1996.

VEZZOLI, C.; MANZINI, E. *Design for Environmental Sustainability*. London: Springer-Verlag, 2008.

VIGON, B.W.; TOLLE, D.A.; CORNABY, B.W.; LATHAM, H.C.; HARRISON, C.L.; BOGUSKI, T.L.; HUNT, R.G.; SELLERS, J.D. *Life-cycle assessment: inventory guidelines and principles*. USA: Environmental Protection Agency (EPA), EPA/600/R-92/245, 1993).

WECKENMANN, A.; SCHWAN, A. Environmental Life Cycle Assessment with Support of Fuzzy Sets. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 6 (1), 13–18, 2001.

WEDLEY, W.C. Combining Qualitative and Quantitative Factors – An Analytic Hierarchy Approach. *Socio-Economical Planning Sciences*, 24 (1), 57–64, 1990.

WEENEN, J. V. Towards sustainable product development. *Journal of Cleaner Production*, 3, 95–10, 1995.

WENZEL, H.; HAUSCHILD, M.; ALTING, L. *Environmental Assessment of Products Volume 1: methodology, tools and case studies in product development*. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1997.

WERNER, F. *Ambiguities in decision-oriented life cycle inventories: the role of mental models and values*. Dordrecht: Springer, 2005.

WESTKÄMPER, E.; ALTING, L.; ARNDT, G. Life Cycle Management and Assessment: Approaches and Visions Towards Sustainable Manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 49 (2), 501–526, 2000.

WIMMER, W.; ZÜST, R. *ECODESIGN Pilot: Product Investigation, Learning and Optimization Tool for Sustainable Product Development, with CD-ROM*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2003.

YEN, J.; LANGARI, R. *Fuzzy Logic: Intelligence, Control and Information*. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

YIN, R. K. *Estudo de Caso: planejamento e métodos*. 3ª. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

ZHANG, Y.; WANG, H.P.; ZHANG, C. Green QFD II: a life cycle approach for environmentally conscious manufacturing by integrating LCA and LCC into QFD matrices. *International Journal of Production Research*, 37 (5), 1075–1091, 1999.

ZESHUI, X. A Practical Method for Improving Consistency of Judgment Matrix in the AHP. *Journal of Systems Science and Complexity*, 17 (2), 2004.

ZESHUI, X.; CUIPING, W. A consistency improving method in the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 116, 443–449, 1999.

ZÜST, R. Decision Support for Planning Ecoeffective Product Systems. In: HUNDAL, M.S. (ed.). *Mechanical Life Cycle Handbook: Good Environmental Design and Manufacturing*. New York: Marcel Dekker, Inc., 177–198, 2002.

APÊNDICE A: VISÃO GERAL DAS REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Segundo Nguyen et al. (2003) sistemas biológicos podem executar tarefas complexas sem recorrer explicitamente a operações quantitativas. Em particular, organismos biológicos são capazes de aprender gradualmente ao longo do tempo. Esta capacidade reflete a habilidade dos neurônios biológicos de aprender por meio de exposição a estímulos externos e de generalizar. Tais propriedades tornam o sistema nervoso atrativo como modelo computacional para processar dados complexos.

Redes neurais artificiais (RNA) são modelos matemáticos inspirados no conhecimento a respeito do funcionamento do sistema nervoso biológico. Elas são atrativas como dispositivos de cálculo porque podem aceitar um grande número de entradas e aprender exclusivamente a partir de amostras de treinamento. Em linhas gerais, uma RNA é uma coleção de neurônios artificiais. Estes são um modelo matemático de um neurônio biológico em sua forma mais simples, isto é, a unidade fundamental do processamento de informações em um sistema nervoso.

De acordo com Ross (2004) um modelo simplificado do funcionamento dos neurônios do cérebro humano é o seguinte. Cada neurônio conecta-se a outros. Quando recebe impulsos nervosos acima de certo limite, ele os repassa para outros neurônios aos quais ele está ligado. De modo geral, um neurônio recebe um conjunto de pulsos de entrada e envia outro pulso que é uma função destas entradas. Este conceito simplificado é utilizado para executar cálculos em computadores. A figura A.1 mostra um elemento limite como o equivalente de um neurônio.

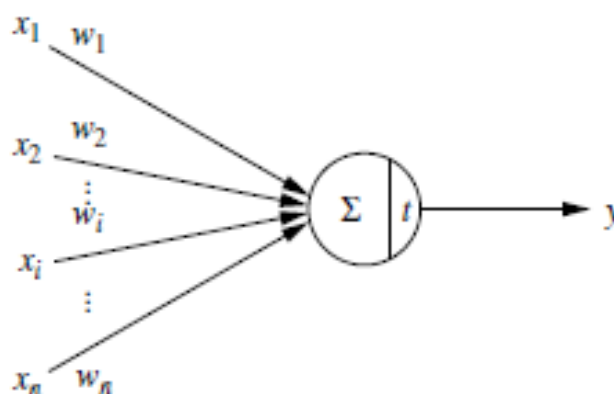


Figura A 1 – Um Elemento Limite como o Equivalente de um Neurônio
(Fonte: Ross, 2004 p.184)

As variáveis $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ são as entradas e são análogas aos impulsos chegando de diversos neurônios para um neurônio. As variáveis $w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_n$ são os pesos associados às entradas (impulsos), significando a importância relativa associada ao caminho que transporta aquela entrada. O elemento limite soma o produto destas entradas pelos seus pesos associados e os compara ao valor limite pré-estabelecido. Se tal soma é maior que o limite, um valor de saída é calculado utilizando-se uma função não linear⁹ F . O sinal de saída y é uma função não linear (F) da diferença entre a soma e o valor limite, como mostra a equação A.1.

$$y = F\left(\sum w_i x_i - t\right) \quad (\text{A } 1)$$

Onde “ x_i ” são os sinais de entrada ($i = 1, 2, \dots, n$), “ w_i ” são os pesos associados e t é o valor limite fixado pelo usuário.

A figura A.2 mostra uma rede neural simples com três camadas para um sistema com único sinal de entrada x e único sinal de saída correspondente $f(x)$. Qualquer camada, exceto a primeira (camada de entrada) e a última (camada de saída), é chamada de camada oculta.

Segundo Nguyen et al. (2003), diferentemente dos *softwares* que são programados previamente para executar tarefas específicas, redes neurais necessitam ser treinadas a partir de exemplos. Uma vez treinada com sucesso, a rede pode ser utilizada como um dispositivo para gerar resultados apropriados de entradas específicas. O treinamento de uma rede é mostrado na figura A.3 e explicado a seguir.

De acordo com Ross (2004), o sistema resolve os problemas adaptando os sinais que recebe. Para isto, são necessários dois conjuntos de dados conhecidos a priori, dados de treinamento e dados de checagem, a respeito das entradas e suas respectivas saídas. Normalmente são utilizados múltiplos dados, isto é, um vetor $(x_1, x_2, \dots, x_n; y_1, y_2, \dots, y_n)$.

Inicia-se o processo com pesos aleatórios w . Então o primeiro valor de entrada x_1 dos dados de treinamento é passado através da rede. A rede computa o valor $f(x_1)$ e o compara com o valor real y_1 , também presente nos dados de treinamento. Uma medida de erro Δ é calculada a partir da equação A.2:

⁹ Um exemplo de função não linear utilizada é a função sigmoideal $F(s) = 1/(1 + e^{-s})$

$$\Delta = y_1 - f(x_1) \quad (\text{A } 2)$$

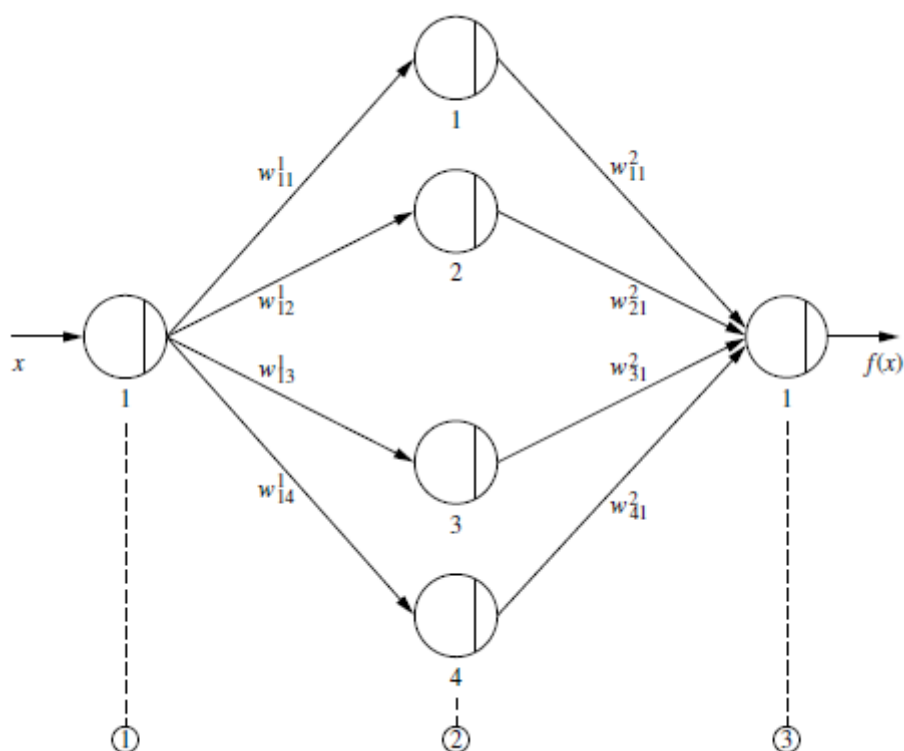


Figura A 2 – Exemplo de uma Rede Neural Simples
(Fonte: Ross, 2004 p.185)

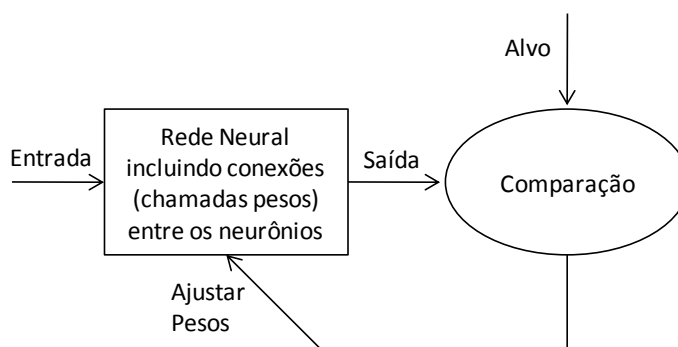


Figura A 3 – Treinamento Supervisionado de uma Rede Neural Artificial
(Fonte: Demuth & Beale, 1998 p.1.2)

Esta é a medida de erro associada à última camada da rede. A seguir, tenta-se distribuir este erro aos elementos da camada oculta, utilizando-se uma técnica chamada de propagação para trás. Isto é, a técnica busca identificar qual é a participação de cada neurônio no erro Δ obtido. A lógica é que quanto mais um elemento causar um desvio, maior o ajuste necessário em seu peso na próxima iteração.

No próximo passo, os pesos w são corrigidos de forma a se aproximarem mais do valor de saída real. Os erros E de cada elemento obtidos no passo anterior são utilizados para a atualização dos pesos, segundo a equação A.3:

$$w(\textit{nov}) = w(\textit{anterior}) + \alpha \cdot E \cdot x_1 \quad (\text{A 3})$$

Onde “ α ” é uma constante de aprendizagem. Então o valor de x_1 é passado novamente na rede e o processo recomeça até que o valor do erro Δ fique abaixo de certo limite.

A rede então passa para o segundo valor de entrada (x_2) e de saída (y_2), até que se esgotem todos os dados do conjunto de treinamento.

Finalmente, os dados de checagem são utilizados para verificar o quão bem a rede consegue simular as relações não lineares presentes nos dados.

APÊNDICE B: VISÃO GERAL DA LÓGICA DIFUSA

De forma a introduzir as características deste ramo da matemática, é mais simples compará-la na resolução de um problema simples com um procedimento algébrico tradicional. O seguinte exemplo didático foi retirado de Jang & Gulley (1998).

Considere o caso da porcentagem de gorjeta (z) a ser paga por um cliente ao garçom de um restaurante. Considere, adicionalmente, que a qualidade do atendimento do garçom (x) seja medida em uma escala de 0 (péssima) a 10 (excelente). Se a qualidade do atendimento for razoável (por exemplo, x entre 3 e 7), o cliente dará uma porcentagem de gorjeta fixa de 15%. Entretanto, se o atendimento for ruim ou bom, a gorjeta será proporcional à qualidade, com valor mínimo de 5% e valor máximo de 25%. A função linear que resolve o problema é dada pela equação B.1 e seu respectivo gráfico é mostrado na figura B.1.

$$\begin{cases} z = (0,10/3)x + 0,05 & 0 \leq x < 3 \\ z = 0,15 & 3 \leq x < 7 \\ z = (0,10/3)(x - 7) + 0,15 & 7 \leq x \leq 10 \end{cases} \quad (\text{B 1})$$

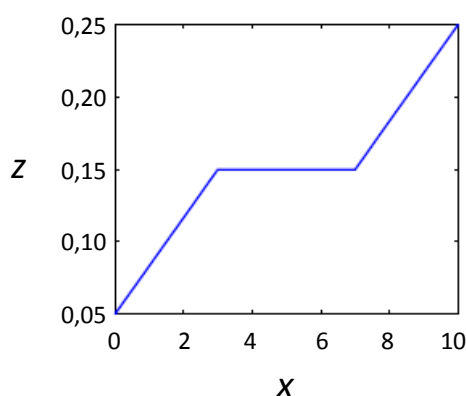


Figura B 1 – Gráfico da Porcentagem de Gorjeta em Função da Qualidade do Atendimento
(Fonte: Jang & Gulley, 1998 p.1.12)

Imagine, agora, que a porcentagem de gorjeta (z) seja dada em função de duas variáveis, qualidade do atendimento (x) e qualidade da refeição (y), ambas medidas em uma escala de 0 a 10. Adicionalmente, considere que a importância relativa da qualidade do atendimento seja 80% e da qualidade da refeição seja 20%. A relação entre z e x é idêntica ao

caso anterior, mas a relação entre z e y é linear ao longo de todo o intervalo, de forma que se x e y forem máximos a gorjeta é máxima (25%) e se x e y forem mínimos, a gorjeta é mínima (5%). A função que resolve este problema é dada pela equação B.2.

$$\begin{cases} z = 0,8 \cdot ((0,10/3)x + 0,05) + 0,2(0,02y + 0,05) & 0 \leq x < 3 \\ z = 0,8 \cdot 0,15 + 0,2(0,02y + 0,05) & 3 \leq x < 7 \\ z = 0,8 \cdot ((0,10/3)(x-7) + 0,15) + 0,2(0,02y + 0,05) & 7 \leq x \leq 10 \end{cases} \quad (\text{B } 2)$$

Pode-se perceber que à medida que vão se adicionando variáveis e condições de contorno, a função que descreve a porcentagem de gorjeta vai ficando cada vez mais complicada de ser obtida. O mesmo problema seria resolvido aproximadamente por meio de lógica difusa criando uma série de regras na linguagem do dia-a-dia, chamadas de variáveis linguísticas. Para o exemplo da gorjeta, as regras seriam:

- Se o serviço é ruim ou a comida é ruim, a gorjeta é baixa;
- Se o serviço é bom, a gorjeta é mediana;
- Se o serviço é excelente ou a comida é deliciosa, a gorjeta é generosa.

A parte esquerda da figura B.2 mostra o gráfico da função z dada pela equação B.2 e à direita, o gráfico obtido pela solução das três regras acima. A semelhança é notável. Na realidade, o gráfico à direita é uma solução aproximada do gráfico exato à esquerda.

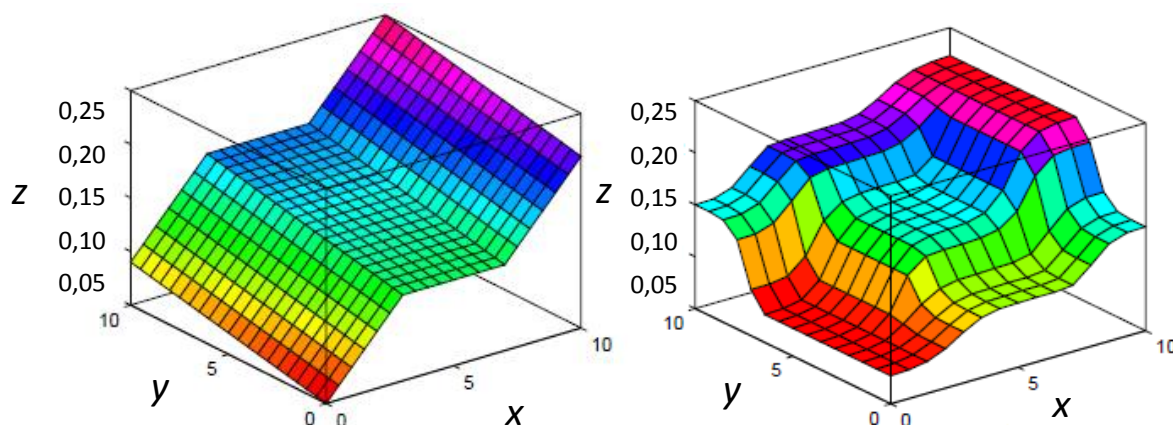


Figura B 2 – Gráfico da Porcentagem de Gorjeta – Solução Exata e Aproximada pela Lógica Difusa
(Fonte: Jang & Gulley, 1998 p.1.12)

Esta é a ideia básica da lógica difusa – a computação por meio de palavras e conceitos imprecisos. O motivo de seu uso em aplicações práticas é a aproximação, a baixo custo, de problemas extremamente complexos, não lineares e de difícil solução analítica (YEN & LANGARI, 1999). Isto é explicado pelo princípio da incompatibilidade enunciado a seguir.

De acordo com Yen & Langari, o princípio que motivou Lofti A. Zadeh a criar a teoria dos conjuntos difusos nos anos de 1960 foi a observação que à medida que a complexidade de um sistema aumenta, nossa habilidade de descrevê-lo de forma simultaneamente precisa e significativa diminui até o limite além do qual ambos precisão e significância (ou relevância) tornam-se mutuamente excludentes. Ou seja, paga-se um preço pela alta precisão. Portanto, o custo para modelar de forma precisa um sistema complexo pode ser alto demais para ser útil. A figura B.3 mostra que o custo cresce de maneira exponencial à medida que a precisão aumenta, mas a utilidade do sistema não aumenta da mesma forma e se satura a partir de certo ponto. A lógica difusa explora a área cinza da figura, desenvolvendo soluções úteis e efetivas em custo.

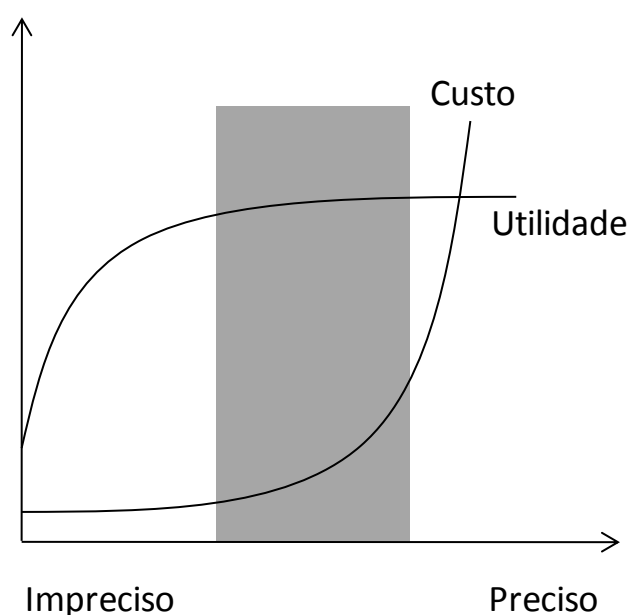


Figura B 3 – Ilustração do Princípio da Incompatibilidade
(Fonte: Yen & Langari, 1999 p. 11)

Segundo Yen & Langari (1999), a lógica difusa apoia-se sobre quatro conceitos: (i) conjuntos difusos: conjuntos que não possuem fronteiras bem definidas; (ii) variáveis linguísticas: variáveis cujos valores são qualitativa e quantitativamente descritos por um conjunto difuso; (iii) distribuições de possibilidade: restrições no valor de uma variável

linguística impostas por atribuí-la a um conjunto difuso; (iv) regras “se-então” difusas. Estes elementos são explicados a seguir.

Um conjunto difuso é um conjunto que não possui fronteiras bem definidas. A teoria dos conjuntos difusos é uma generalização da teoria clássica dos conjuntos. Nesta última, um elemento ou “pertence” ou “não pertence” a determinado conjunto. Nos conjuntos difusos, a relação de pertinência não é binária, mas uma questão de grau. Assim, por exemplo, pode existir um elemento que pertença 0,8 ao conjunto \tilde{A} , 0,4 ao conjunto \tilde{B} etc.. Esta relação de pertinência é denominada de função de pertinência.

Suponha que se deseje representar o conjunto das pessoas com alta estatura pela teoria dos conjuntos clássica. Isto nos obrigaria a escolher uma fronteira ou limite de altura para separar os altos dos demais, por exemplo, 1,80 metros. Assim, todas as pessoas com altura superior a 1,80 seriam consideradas altas. Neste caso, sujeitos com 1,59 ou 1,79 metros seriam excluídos do conjunto, este último por apenas 1 centímetro. Na teoria dos conjuntos difusos, seria criada uma função de pertinência que faria a transição gradual entre a região definitivamente dentro e a região definitivamente fora do conjunto. Exemplificando: considere que alguém acima de 1,80 certamente seja alto e alguém abaixo de 1,60 certamente não seja alto e que a transição possa ser considerada linear. A função de pertinência para esta situação é mostrada na figura B4. Assim, um indivíduo com 1,75 metros pertence 0,75 ao conjunto das pessoas altas.

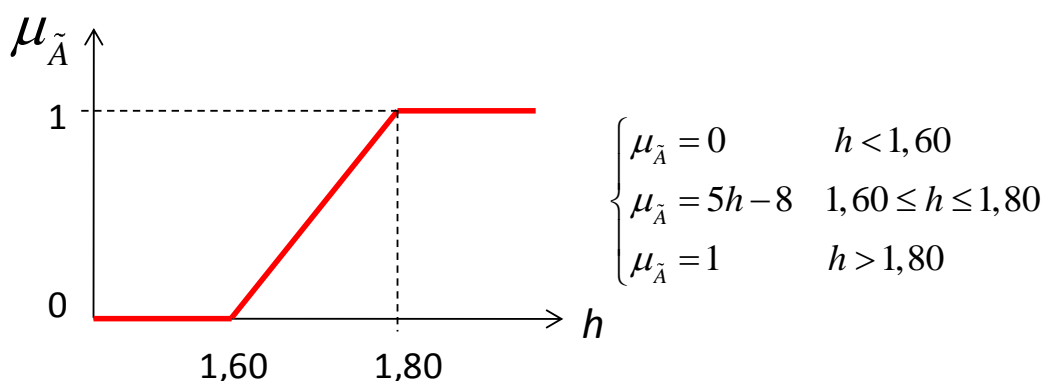


Figura B 4 – Exemplo de Função de Pertinência
(Fonte: Elaborada pelo Autor)

O segundo elemento da lógica difusa, a variável linguística, é definida como uma variável cujos valores são palavras ao invés de números. Em grande parte, a lógica difusa pode ser vista como uma metodologia de computação com palavras. Embora as palavras sejam menos precisas que os números, seu uso é mais próximo da intuição humana. Além

disso, palavras aproveitam-se da tolerância para a imprecisão, diminuindo os custos da solução. De acordo com Klir & Yuan (1995), uma variável linguística é formada por cinco elementos (v , T , X , g , m), como indica a figura B.5: seu nome (v), valores linguísticos (T) que a relacionam com uma variável base quantitativa (X), uma regra sintática para gerar os termos linguísticos (g , não mostrada na figura) e uma regra semântica (m) que a relaciona com um conjunto difuso.

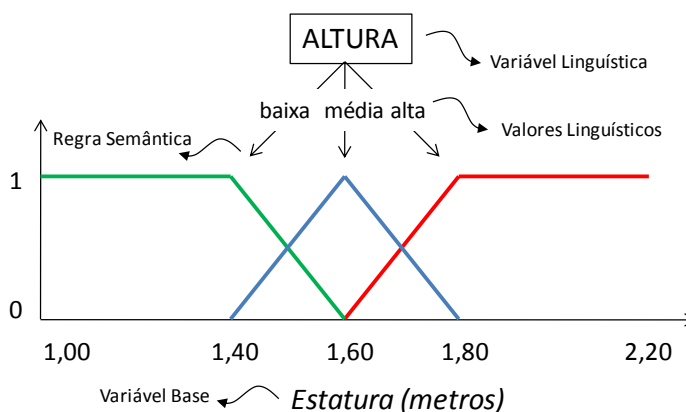


Figura B 5 – Exemplo de uma Variável Linguística

(Fonte: Elaborada pelo Autor a partir de Klir & Yuan, 1995 p.101)

O terceiro elemento da lógica difusa, a distribuição de possibilidade, relaciona-se ao tipo de incerteza modelada pela lógica difusa: a imprecisão. Em geral, quando se atribui um conjunto difuso a uma variável, isto introduz uma restrição aos valores da variável. Entretanto esta restrição é imprecisa.

Por exemplo, suponha que a polícia suspeite que certo assalto tenha sido cometido por alguém com idade entre 20 e 30 anos. Isto restringe a variável idade, mas de uma maneira precisa – o assaltante pode ter 20, 21,..., 30 anos, mas é impossível que tenha 19 ou 31 anos. Esta atribuição introduz uma fronteira precisa para os valores possíveis e impossíveis da variável idade. Para situações onde esta fronteira clara não é interessante, a lógica difusa oferece uma alternativa; ela generaliza a distinção binária entre possível e impossível para uma questão de grau chamada possibilidade.

A possibilidade mede o grau de facilidade de uma variável receber certo valor. Deve-se realçar a diferença entre possibilidade e probabilidade, uma vez que a lógica difusa e a teoria das probabilidades modelam tipos diferentes de incerteza. A possibilidade refere-se à imprecisão, enquanto a probabilidade à chance de ocorrência. Considere o lançamento de uma moeda honesta. É impossível afirmar com certeza qual a face da moeda sairá em algum

arremesso específico. Entretanto, o resultado do arremesso é preciso: cara ou coroa. Nesta situação tem-se uma aplicação da teoria das probabilidades e não da lógica difusa.

Por fim, tem-se o último elemento da lógica difusa de acordo com Yen & Langari (1999), as regras “se-então” difusas. Este elemento trata da extensão do sistema dedutivo para o caso de variáveis linguísticas. O exemplo abaixo mostra a diferença entre a lógica clássica e a difusa com relação a um elemento do raciocínio lógico denominado *modus ponens*:

- Se o salário mensal de uma pessoa for superior a vinte mil reais, então a pessoa é rica;
- Se o salário mensal de uma pessoa for alto, então a pessoa é rica.

A seguir, estes elementos são integrados e é dada uma visão geral de como funciona um sistema de inferência baseado na lógica difusa. O exemplo escolhido foi o problema da gorjeta apresentado anteriormente (JANG & GULLEY, 1998). O desenvolvimento do sistema é apresentado na figura B6.

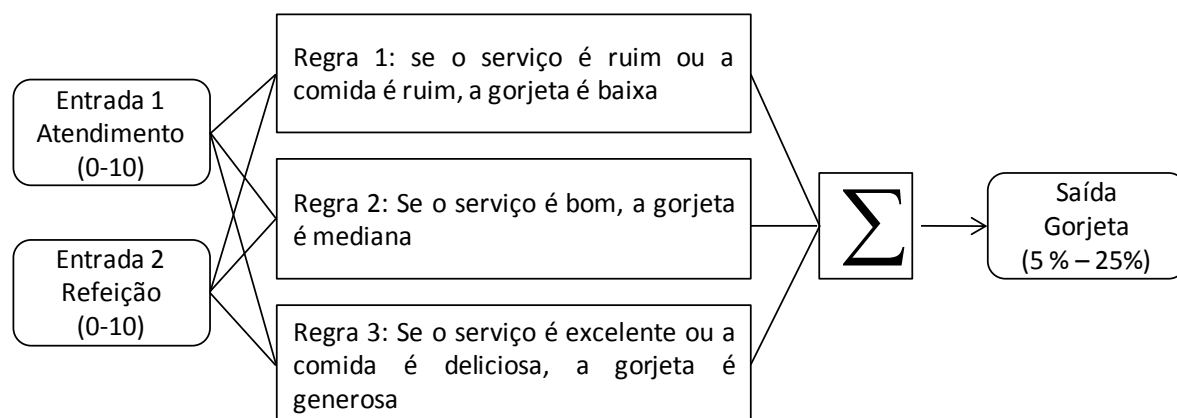


Figura B 6 – Visão Geral de um Sistema de Inferência Baseado na Lógica Difusa
(Fonte: Jang & Gulley, 1998 p.2.21)

O primeiro passo consiste em se criar as funções de pertinência para as entradas 1 e 2 e para a saída. As duas primeiras são dadas na figura B7, a última, omitida.

Dadas as funções de pertinência e as regras “se-então” difusas, o sistema operar simplificadamente da seguinte maneira. Suponha que o Atendimento recebeu nota 4 e a Refeição nota 6. Qual seria a gorjeta? Inicialmente deve-se comparar a pertinência do atendimento nota 4 com os três estados da variável linguística serviço: ruim, bom e excelente. O mesmo é feito para a refeição. Por meio de um operador lógico OU (devido às regras definidas na figura B6), ambas as pertinências são agregadas em um único número (no caso o maior deles, pois o operador OU é equivalente ao máximo). Como são três regras, há três

destes números, um para cada regra. Estes números agora são comparados com relação a sua pertinência no conjunto da variável linguística da saída (gorjeta baixa, mediana e generosa). O resultado é agregado em um número difuso que é posteriormente transformado em um número real por meio de uma operação matemática denominada *defuzzification*, determinando-se, assim, o valor da gorjeta em porcentagem. A figura B8 ilustra todo o processo para o exemplo da gorjeta.

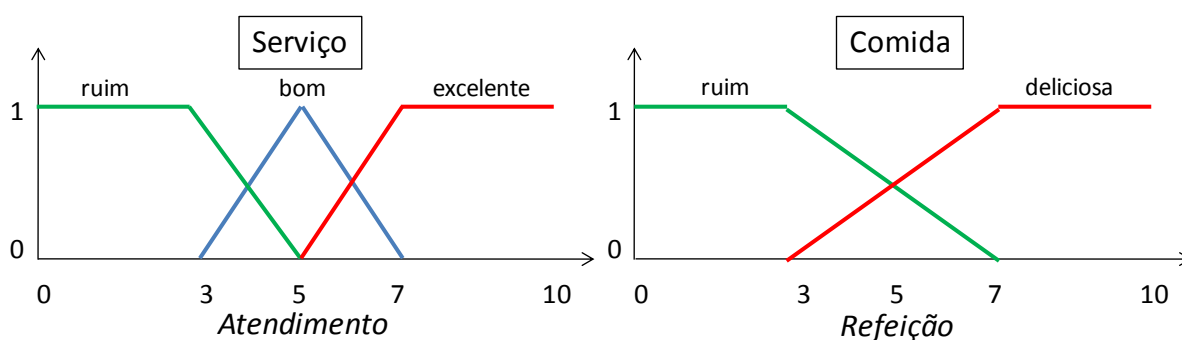


Figura B 7 – Funções de Pertinência para o Exemplo da Gorjeta
(Fonte: Adaptado de Jang & Gulley, 1998 p.2.25)

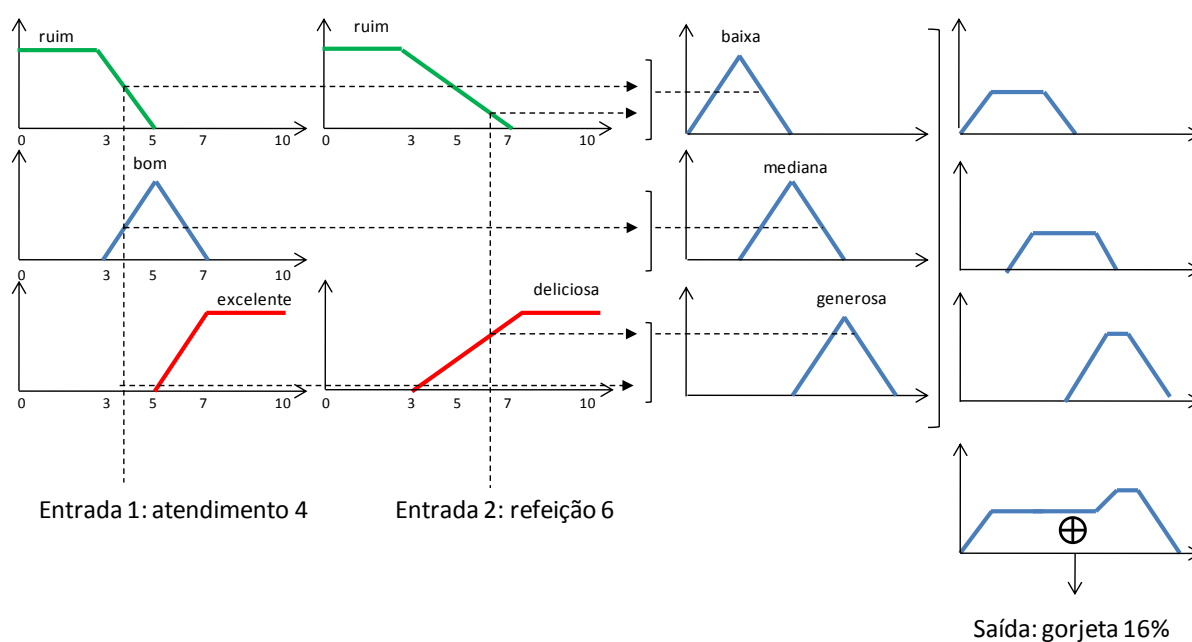


Figura B 8 – Processo de Inferência Difusa para o Exemplo da Gorjeta
(Fonte: Adaptado de Adaptado de Jang & Gulley, 1998 p.2.25)

APÊNDICE C: ALGORITMOS EM VBA PARA IMPLANTAÇÃO DO AHP NO MICROSOFT EXCEL

APÊNDICE C. 1 – Cálculo do Vetor de Prioridade no Modo Distributivo

```

Option Base 1
Function Modo_Distributivo(M)
Dim n As Integer
n = Application.WorksheetFunction.Count(M)
Dim NCol As Integer
NCol = n ^ (1 / 2)
Dim Vzero() As Double
ReDim Vzero(NCol, 1) As Double
Vzero(1, 1) = 1
Dim i As Integer
For i = 2 To NCol
Vzero(i, 1) = 0
Next i
V = Vzero
Dim j As Integer
Dim G As Double
For j = 1 To 1000
b = Application.WorksheetFunction.MMult(M, V)
C = Application.WorksheetFunction.Max(b)
D = Application.WorksheetFunction.Min(b)
E = Abs(D)
F = Application.WorksheetFunction.Max(C, E)
G = 1 / F
V = Application.WorksheetFunction.MMult(b, G)
Next j
Dim X As Double
X = Application.WorksheetFunction.Sum(V)
Dim Y As Double
Y = 1 / X
w = Application.WorksheetFunction.MMult(V, Y)
Modo_Distributivo = w
End Function

```

APÊNDICE C. 2 – Cálculo da Razão de Consistência

```

Option Base 1
Function Inconsistência(M)
Dim n As Integer
n = Application.WorksheetFunction.Count(M)
Dim NCol As Integer
NCol = n ^ (1 / 2)
Dim Vzero() As Double
ReDim Vzero(NCol, 1) As Double
Vzero(1, 1) = 1
Dim i As Integer
For i = 2 To NCol
Vzero(i, 1) = 0
Next i
V = Vzero
Dim j As Integer
For j = 1 To 1000
b = Application.WorksheetFunction.MMult(M, V)
C = Application.WorksheetFunction.Max(b)
D = Application.WorksheetFunction.Min(b)
E = Abs(D)
F = Application.WorksheetFunction.Max(C, E)
Dim G As Double
G = 1 / F
V = Application.WorksheetFunction.MMult(b, G)
Next j
Dim CI As Double
CI = (F - NCol) / (NCol - 1)
Dim CR As Double
Select Case NCol
Case Is <= 2
CR = 0
Case Is = 3
CR = CI / 0.52
Case Is = 4
CR = CI / 0.89
Case Is = 5
CR = CI / 1.11
Case Is = 6
CR = CI / 1.25
Case Is = 7
CR = CI / 1.35
Case Is = 8
CR = CI / 1.4
Case Is = 9
CR = CI / 1.45
Case Is = 10

```

```
CR = CI / 1.49
Case Is = 11
CR = CI / 1.51
Case Is = 12
CR = CI / 1.54
Case Is = 13
CR = CI / 1.56
Case Is = 14
CR = CI / 1.57
Case Is >= 15
CR = CI / 1.59
End Select
Inconsistência = CR
End Function
```

APÊNDICE C. 3 – Cálculo do Vetor de Prioridade no Modo Ideal

```

Option Base 1
Function Modo_Ideal(M)
Dim n As Integer
n = Application.WorksheetFunction.Count(M)
Dim NCol As Integer
NCol = n ^ (1 / 2)
Dim Vzero() As Double
ReDim Vzero(NCol, 1) As Double
Vzero(1, 1) = 1
Dim i As Integer
For i = 2 To NCol
Vzero(i, 1) = 0
Next i
V = Vzero
Dim j As Integer
Dim G As Double
For j = 1 To 1000
b = Application.WorksheetFunction.MMult(M, V)
C = Application.WorksheetFunction.Max(b)
D = Application.WorksheetFunction.Min(b)
E = Abs(D)
F = Application.WorksheetFunction.Max(C, E)
G = 1 / F
V = Application.WorksheetFunction.MMult(b, G)
Next j
Dim X As Double
X = Application.WorksheetFunction.Max(V)
Dim Y As Double
Y = 1 / X
w = Application.WorksheetFunction.MMult(V, Y)
Modo_Ideal = w
End Function

```

APÊNDICE C. 4 – Cálculo do Vetor de Prioridade no Modo Distributivo Invertido

```

Option Base 1
Function Modo_Distributivo_Invertido(M)
Dim n As Integer
n = Application.WorksheetFunction.Count(M)
Dim NCol As Integer
NCol = n ^ (1 / 2)
Dim Vzero() As Double
ReDim Vzero(NCol, 1) As Double
Vzero(1, 1) = 1
Dim i As Integer
For i = 2 To NCol
Vzero(i, 1) = 0
Next i
V = Vzero
Dim j As Integer
Dim G As Double
For j = 1 To 1000
b = Application.WorksheetFunction.MMult(M, V)
C = Application.WorksheetFunction.Max(b)
D = Application.WorksheetFunction.Min(b)
E = Abs(D)
F = Application.WorksheetFunction.Max(C, E)
G = 1 / F
V = Application.WorksheetFunction.MMult(b, G)
Next j
Dim Vinv() As Double
ReDim Vinv(NCol, 1) As Double
For i = 1 To NCol
Vinv(i, 1) = 1 / V(i, 1)
Next i
Dim X As Double
X = Application.WorksheetFunction.Sum(Vinv)
Dim Y As Double
Y = 1 / X
w = Application.WorksheetFunction.MMult(Vinv, Y)
Modo_Distributivo_Invertido = w
End Function

```


APÊNDICE C. 5 – Cálculo do Vetor de Prioridade no Modo Ideal Invertido

```

Option Base 1
Function Modo_Ideal_Invertido(M)
Dim n As Integer
n = Application.WorksheetFunction.Count(M)
Dim NCol As Integer
NCol = n ^ (1 / 2)
Dim Vzero() As Double
ReDim Vzero(NCol, 1) As Double
Vzero(1, 1) = 1
Dim i As Integer
For i = 2 To NCol
Vzero(i, 1) = 0
Next i
V = Vzero
Dim j As Integer
Dim G As Double
For j = 1 To 1000
b = Application.WorksheetFunction.MMult(M, V)
C = Application.WorksheetFunction.Max(b)
D = Application.WorksheetFunction.Min(b)
E = Abs(D)
F = Application.WorksheetFunction.Max(C, E)
G = 1 / F
V = Application.WorksheetFunction.MMult(b, G)
Next j
Dim Vinv() As Double
ReDim Vinv(NCol, 1) As Double
For i = 1 To NCol
Vinv(i, 1) = 1 / V(i, 1)
Next i
Dim X As Double
X = Application.WorksheetFunction.Min(V)
w = Application.WorksheetFunction.MMult(Vinv, X)
Modo_Ideal_Invertido = w
End Function

```

APÊNDICE C. 6 – Tratamento de Matrizes de Comparações aos Pares Inconsistentes

```

Option Base 1
Function Revisar_Matriz(M)
Dim NCol As Integer
Dim CRmax As Double
Dim CI As Double
Dim CR As Double
Dim G As Double
Dim alfa As Double
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim k As Integer
Dim X As Double
Dim Y As Double
r = M
Dim n As Integer
n = Application.WorksheetFunction.Count(M)
NCol = n ^ (1 / 2)
Select Case NCol
Case Is = 3
CRmax = 0.05
Case Is = 4
CRmax = 0.08
Case Is >= 5
CRmax = 0.1
End Select
k = 0
alfa = 0.99
Dim Vzero() As Double
ReDim Vzero(NCol, 1) As Double
Inicio:
Vzero(1, 1) = 1
For i = 2 To NCol
Vzero(i, 1) = 0
Next i
V = Vzero
For j = 1 To 100
b = Application.WorksheetFunction.MMult(r, V)
C = Application.WorksheetFunction.Max(b)
D = Application.WorksheetFunction.Min(b)
E = Abs(D)
F = Application.WorksheetFunction.Max(C, E)
G = 1 / F
V = Application.WorksheetFunction.MMult(b, G)
Next j
X = Application.WorksheetFunction.Sum(V)
Y = 1 / X

```

```

w = Application.WorksheetFunction.MMult(V, Y)
CI = (F - NCol) / (NCol - 1)
Select Case NCol
Case Is <= 2
CR = 0
Case Is = 3
CR = CI / 0.52
Case Is = 4
CR = CI / 0.89
Case Is = 5
CR = CI / 1.11
Case Is = 6
CR = CI / 1.25
Case Is = 7
CR = CI / 1.35
Case Is = 8
CR = CI / 1.4
Case Is = 9
CR = CI / 1.45
Case Is = 10
CR = CI / 1.49
Case Is = 11
CR = CI / 1.51
Case Is = 12
CR = CI / 1.54
Case Is = 13
CR = CI / 1.56
Case Is = 14
CR = CI / 1.57
Case Is >= 15
CR = CI / 1.59
End Select
If ((CR <= CRmax) Or (k > 200)) Then GoTo Fim
Dim wl() As Double
ReDim wl(NCol, 1)
For i = 1 To NCol
wl(i, 1) = (1 / (w(i, 1)))
Next i
wt = Application.WorksheetFunction.Transpose(wl)
WM = Application.WorksheetFunction.MMult(w, wt)
For i = 1 To NCol
For j = 1 To NCol
r(i, j) = r(i, j) ^ alfa * WM(i, j) ^ (1 - alfa)
Next j
Next i
k = k + 1
GoTo Inicio
Fim:
Revisar_Matriz = r
End Function

```

APÊNDICE C. 7 – Reconstrução de Matrizes de Comparações aos Pares Incompletas

```

Option Base 1
Function Matriz_Incompleta(M)
Dim n As Integer
n = Application.WorksheetFunction.Count(M)
Dim NCol As Integer
NCol = n ^ (1 / 2)
k = 0
Dim r() As Double
ReDim r(NCol, NCol) As Double
Dim s() As Double
ReDim s(NCol, NCol) As Double
Dim i As Integer
Dim j As Integer
Dim t As Integer
For j = 1 To NCol
t = 0
For i = 1 To NCol
r(i, j) = Application.WorksheetFunction.Index(M, i, j)
If r(i, j) = 0 Then t = t + 1
If i <> j Then s(i, j) = r(i, j)
Next i
s(j, j) = r(j, j) + t
Next j
Dim Vzero() As Double
ReDim Vzero(NCol, 1) As Double
Vzero(1, 1) = 1
For i = 2 To NCol
Vzero(i, 1) = 0
Next i
V = Vzero
Dim G As Double
For j = 1 To 1000
b = Application.WorksheetFunction.MMult(s, V)
C = Application.WorksheetFunction.Max(b)
D = Application.WorksheetFunction.Min(b)
E = Abs(D)
F = Application.WorksheetFunction.Max(C, E)
G = 1 / F
V = Application.WorksheetFunction.MMult(b, G)
Next j
Dim X As Double
X = Application.WorksheetFunction.Sum(V)
Dim Y As Double
Y = 1 / X
w = Application.WorksheetFunction.MMult(V, Y)
Dim wl() As Double

```

```
ReDim wl(NCol, 1)
For i = 1 To NCol
wl(i, 1) = (1 / (w(i, 1)))
Next i
wt = Application.WorksheetFunction.Transpose(wl)
WM = Application.WorksheetFunction.MMult(w, wt)
Dim o() As Double
ReDim o(NCol, NCol) As Double
Dim p() As Double
ReDim p(NCol, NCol) As Double
For i = 1 To NCol
For j = 1 To NCol
o(i, j) = Application.WorksheetFunction.Index(M, i, j)
If o(i, j) <> 0 Then p(i, j) = o(i, j) Else p(i, j) = WM(i, j)
Next j
Next i
Matriz_Incompleta = p
End Function
```

APÊNDICE D – EXEMPLO NUMÉRICO

O exemplo aqui apresentado é de um produto hipotético e serve apenas para clarificar as etapas quantitativas do método. Os cálculos foram executados por meio do arquivo em Excel que acompanha esta documentação. Suponha que haja quatro conceitos de produtos sendo investigados: C1, C2, C3 e C4.

Fase 1: Montagem da Hierarquia.

Imagine que o produto sendo projetado seja um produto do tipo E. Portanto, os critérios ambientais relevantes para análise seriam: grau de reciclagem dos materiais do produto; grau de escassez dos materiais do produto; grau de toxicidade dos materiais do produto; grau de reuso de partes e componentes; durabilidade; facilidade de reparo; grau de reuso do produto; facilidade de remanufatura; e facilidade de desmontagem.

Adaptando-se a hierarquia, tem-se a figura D.1 abaixo:

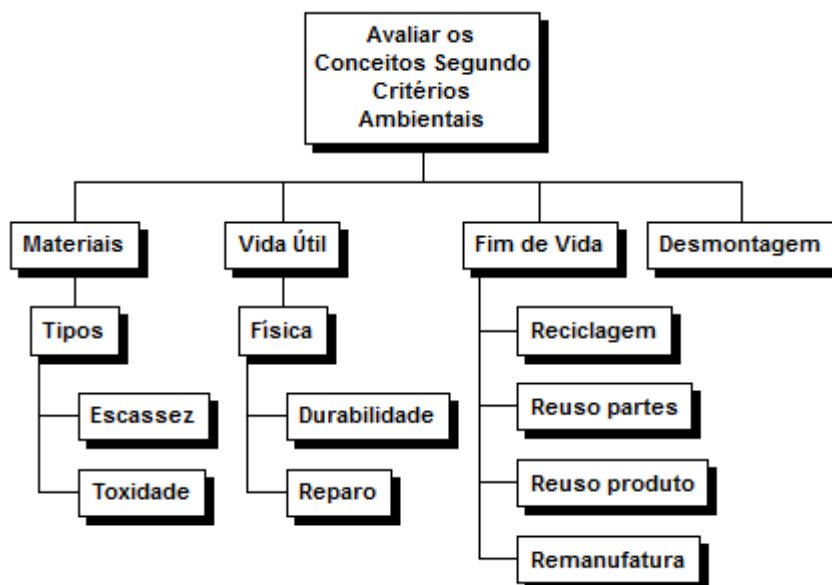


Figura D 1 – Hierarquia Adaptada
(Fonte: Elaborada pelo Autor)

Fase 2: Derivação das Prioridades

Etapa 1: Prioridades dos Conceitos com Relação aos Critérios

Pergunta: Qual par de conceitos implica em um produto que utilizará materiais mais escassos e quanto mais escassos?

Escassez	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	Prioridades: Modo Ideal Invertido
C1	1	2	2	5	0,2031
C2	1/2	1	1	3	0,3866
C3	1/2	1	1	2	0,4278
C4	1/5	1/3	1/2	1	1,0000
Inconsistência					0,58%

Pergunta: Qual par de conceitos implica em um produto que utilizará materiais mais tóxicos e quanto mais tóxicos?

Toxicidade	C1	C2	C3	C4	Prioridades: Modo Ideal Invertido
C1	1	1/5	1/7	1/4	1,0000
C2	5	1	1/3	2	0,2147
C3	7	3	1	3	0,1024
C4	4	1/2	1/3	1	0,3234
Inconsistência					3,72%

Pergunta: Qual par de conceitos implica em um produto que será mais durável e quanto mais durável?

Durabilidade	C1	C2	C3	C4	Prioridades: Modo Ideal
C1	1	4	3	5	1,0000
C2	1/4	1	1/2	2	0,2453
C3	1/3	2	1	5	0,4828
C4	1/5	1/2	1/5	1	0,1350
Inconsistência					3,92%

Pergunta: Qual par de conceitos implica em um produto que será mais fácil de ser reparado e quanto mais fácil?

Facilidade de Reparo	C1	C2	C3	C4	Prioridades: Modo Ideal
C1	1	1/4	1	1	0,2500
C2	4	1	4	4	1,0000
C3	1	1/4	1	1	0,2500
C4	1	1/4	1	1	0,2500
Inconsistência					0,00%

Pergunta: Qual par de conceitos implica em um produto que terá maior fração de materiais que podem ser reciclados e quanto mais?

Reciclagem	C1	C2	C3	C4	Prioridades: Modo Ideal
C1	1	5	6	4	1,0000
C2	1/5	1	2	1/2	0,1997
C3	1/6	1/2	1	1/3	0,1231
C4	1/4	2	3	1	0,3322
Inconsistência					2,46%

Pergunta: Qual par de conceitos implica em um produto que terá maior quantidade de partes que podem ser reutilizadas e quanto mais?

Reuso de Partes	C1	C2	C3	C4	Prioridades: Modo Ideal
C1	1	1	1/3	1/4	0,2246
C2	1	1	1/3	1/4	0,2246
C3	3	3	1	1/2	0,6117
C4	4	4	2	1	1,0000
Inconsistência					0,77%

Pergunta: Qual par de conceitos implica em um produto que será mais fácil de ser reutilizado e quanto mais?

Reuso do Produto	C1	C2	C3	C4	Prioridades: Modo Ideal
C1	1	1	1	1	1,0000
C2	1	1	1	1	1,0000
C3	1	1	1	1	1,0000
C4	1	1	1	1	1,0000
Inconsistência					0,00%

Pergunta: Qual par de conceitos implica em um produto que será mais fácil de ser remanufaturado e quanto mais?

Remanufatura	C1	C2	C3	C4	Prioridades: Modo Ideal
C1	1	4	3	2	1,0000
C2	1/4	1	1/2	1/4	0,1881
C3	1/3	2	1	1/3	0,3065
C4	1/2	4	3	1	0,7048
Inconsistência					3,04%

Pergunta: Qual par de conceitos implica em um produto que será mais fácil de ser desmontado e quanto mais?

Desmontagem	C1	C2	C3	C4	Prioridades: Modo Ideal
C1	1	1/6	1/5	1/3	0,1170
C2	6	1	2	5	1,0000
C3	5	1/2	1	2	0,5250
C4	3	1/5	1/2	1	0,2646
Inconsistência					2,81%

Etapa 2: Prioridades dos Critérios e Agrupamentos de Critérios

Pergunta: Com relação aos tipos de materiais do produto, qual critério é mais importante e quanto mais?

Tipos de Materiais	Escassez	Toxidade	Prioridades: Modo Distributivo
Escassez	1	1/5	0,1667
Toxidade	5	1	0,8333
Inconsistência			0,00%

OBSERVAÇÃO: o agrupamento Tipos de Materiais é o único agrupamento abaixo de Materiais do Produto, logo ele recebe 100% do peso (1,000), enquanto Quantidade de Materiais, que foi excluído, recebe 0 (ver figura 5.18).

Pergunta: Com relação à vida física, qual critério é mais importante e quanto mais?

Vida Física	Durabilidade	Facilidade de Reparo	Prioridades: Modo Distributivo
Durabilidade	1	3	0,7500
Facilidade de Reparo	1/3	1	0,2500
Inconsistência			0,00%

OBSERVAÇÃO: o agrupamento Vida Física é o único agrupamento abaixo de Vida Útil, logo ele recebe 100% do peso (1,000), enquanto Vida Tecnológica, que foi excluído, recebe 0 (ver figura 5.18).

Pergunta: com relação ao fim de vida, qual par de critérios é mais importante e quanto mais?

Fim de Vida	Reciclagem	Reuso de Partes	Reuso do Produto	Remanufatura	Prioridades: Modo Distributivo
Reciclagem	1	1/2	1/4	1/3	0,0954
Reuso de Partes	2	1	1/3	1/2	0,1601
Reuso do Produto	4	3	1	2	0,4673
Remanufatura	3	2	1/2	1	0,2772
Inconsistência					1,16%

Pergunta: com relação ao objetivo de escolher o melhor conceito, qual par de critérios e/ou agrupamentos é mais importante e quanto mais?

Objetivo	Materiais	Vida Útil	Fim de Vida	Desmontagem	Prioridades: Modo Distributivo
Materiais	1	1	3	3	0,3750
Vida Útil	1	1	3	3	0,3750
Fim de Vida	1/3	1/3	1	1	0,1250
Desmontagem	1/3	1/3	1	1	0,1250
Inconsistência					0,00%

Fase 3: Síntese dos Resultados

As prioridades das alternativas e as prioridades dos critérios e agrupamento devem ser transportados para as células adequadas no arquivo em Excel que implementa o método. As prioridades das alternativas devem ser transportadas para a planilha “2. Prioridades das Alternativas”, como indica a figura 5.17. As prioridades dos critérios e agrupamentos devem ser transportadas para a planilha “3. Prioridade dos Critérios”, como mostra a figura 5.18. O resultado final da análise aparece na planilha “4. Síntese dos Resultados” nos campos “Notas Finais”, como mostra a figura 5.19. Transportando os valores das tabelas anteriores para as planilhas no arquivo Excel, têm-se os seguintes resultados:

- C1: 0,8058
- C2: 0,4330
- C3: 0,3918
- C4: 0,4283

Portanto, o conceito C1 é o melhor do ponto de vista ambiental.

Note que as prioridades dos critérios da figura 5.18 não são iguais às prioridades da figura 5.19 devido ao fato de ter sido aplicado um ajuste estrutural à hierarquia da figura D.1, conforme foi explicado no capítulo 4. A figura D.2 a seguir mostra como o ajustes estrutural é implementado no arquivo Excel.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1														
2														
3														
4														
5	Volume do Produto		1o. Nível	2o. Nível	3o. Nível		Quantidade de Critérios	Ajuste	Pesos	Renormalização	Quantidade de Critérios	Ajuste	Pesos	
6	Quantidade		0,000	1,000	1,000		0	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000	1,000
7	Peso de Materiais		0,375	0,000	0,000		0	0	0,000	0,353	0	0,000	0,000	0,000
8	Fração de Reciclad		0,375	0,000	0,000		0	0	0,000	0,353	0	0,000	0,000	0,000
9	Energia Incorporada nos Materiais		0,375	1,000	0,000		0	0	0,000	0,353	0	1,000	1,000	1,000
10	Tipos		0,375	1,000	0,167		1	1/9	0,042	0,353	1	1,000	1,000	1,000
11	Escassez dos Materiais		0,375	1,000	0,833		1	1/9	0,042	0,353	1	1,000	1,000	1,000
12	Toxicidade dos Materiais		0,000	0,000	0,000		0	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000
13	Consumo de Energia		0,000	0,000	0,000		0	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000
14	Fonte de Energia		0,000	0,000	1,000		0	0	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000
15	Impacto Ambiental em Uso		0,375	1,000	0,750		1	1/9	0,042	0,353	1	1,000	1,000	1,000
16	Durabilidade		0,375	1,000	0,000		0	0	0,000	0,353	0	1,000	1,000	1,000
17	Facilidade de Manutenção		0,375	1,000	0,000		0	0	0,000	0,353	0	1,000	1,000	1,000
18	Confabilidade		0,375	1,000	0,250		1	1/9	0,042	0,353	1	1,000	1,000	1,000
19	Facilidade de Reparo		0,375	1,000	0,000		0	0	0,000	0,353	0	0,000	0,000	0,000
20	Adaptabilidade		0,375	0,000	0,000		0	0	0,000	0,353	0	0,000	0,000	0,000
21	Multifuncionalidade		0,375	0,000	0,000		0	0	0,000	0,353	0	0,000	0,000	0,000
22	Grau de Reciclagem de Materiais		0,125	0,095	1,000		1	1/9	0,014	0,235				0,095
23	Grau de Reuso de Partes e Componentes		0,125	0,160	1,000		1	1/9	0,014	0,235				0,160
24	Grau de Reuso do Produto		0,125	0,467	1,000		1	1/9	0,014	0,235				0,467
25	Facilidade de Remanufatura		0,125	0,277	1,000		1	1/9	0,014	0,235				0,277
26	Desmontagem		0,125	1,000	1,000		1	1/9	0,014	0,059				1,000
27														
28														
29														
30														
31														
32														
33														
34														

Figura D 2 – Ajuste Estrutural
(Fonte: Elaborada pelo Autor)

APÊNDICE E – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO DO MÉTODO

Por favor, dê a sua opinião sobre a extensão com que o método proposto atende aos critérios abaixo, utilizando uma escala de 0 a 5. Se quiser fazer algum comentário a respeito de qualquer um desses requisitos, este será muito bem vindo. Agradeço desde já sua colaboração.

5 = O método atende plenamente este critério;

4 = O método atende em muitos aspectos este critério;

3 = O método atende parcialmente este critério;

2 = O método atende somente em uns poucos aspectos este critério;

1 = O método não atende este critério;

0 = Não gostaria de responder a essa questão.

1) O método facilita a estruturação do problema e orienta o usuário, passo a passo, no processo de avaliação do conceito do produto que mais bem atenda aos critérios ambientais, dentro de um a perspectiva de ciclo de vida do produto?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

2) O nível de detalhamento do método é adequado para auxiliar a avaliação do conceito do produto ambientalmente mais correto?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

3) O método é preciso, isto é, representa bem a realidade modelada e evita a geração de soluções por acaso?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

4) . O método é aplicável a diversos tipos de produtos físicos?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

5) O método é compatível com os conhecimentos das áreas de gerenciamento de projetos, gestão de desenvolvimento de produtos, DfE (*design for environment* – projeto voltado para o ambiente) e do raciocínio de ciclo de vida?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

6) O método é eficiente, ou seja, possibilita a resolução do problema sem a necessidade de nenhuma alteração ou adaptação em sua estrutura básica?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

7) A estrutura da documentação do método (texto, figuras, quadros) e do protótipo computacional (interfaces) são claros e objetivos?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

8) O método pode ser facilmente adaptado para diferentes tipos de projetos ou empresas?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

9) O método pode ser facilmente expandido, ou seja, a identificação, análise e tratamento de novas categorias de critérios ambientais no projeto conceitual?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

10) O método apresenta lógica e consistência no fluxo de informações?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

11) O método contém toda a informação necessária para a escolha do conceito ambientalmente mais correto?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

12) O método permite a transferência de informações e conhecimento do DfE entre projetos similares, formalizando e explicitando o conhecimento de seus usuários?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

13) A implantação computacional do método é satisfatória?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

14) O método oferece uma forma sistemática de armazenar o conhecimento e é fácil de aprender e de ensinar?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

15) O método pode ajudar a evitar decisões inapropriadas, de maneira a harmonizar as demandas ambientais com os demais requisitos do produto?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

16) O método pode facilitar o trabalho da equipe em um ambiente de desenvolvimento de produto integrado e multidisciplinar?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

17) O método pode servir de orientação e diretriz para gerentes de projetos de produtos introduzirem os princípios do DfE no desenvolvimento de produtos?

5 4 3 2 1 0

Comentários: _____

18) Na etapa de projeto conceitual, é possível fazer as comparações entre os critérios exigidos pelo método?

Crítérios	SIM	NÃO
1. Peso dos materiais.		
2. Volume do produto		
3. Fração de materiais reciclados no produto.		
4. Energia incorporada nos materiais do produto.		
5. Grau de reciclagem dos materiais do produto.		
6. Grau de escassez dos materiais do produto.		
7. Grau de toxicidade dos materiais do produto.		
8. Grau de reuso de partes e componentes		
9. Consumo de energia do produto em uso.		
10. Fonte de energia do produto.		
11. Impacto ambiental do produto em uso.		
12. Durabilidade		
13. Facilidade de manutenção		
14. Adaptabilidade do produto		
15. Confiabilidade		
16. Multifuncionalidade		
17. Facilidade de reparo		
18. Grau de reuso do produto.		
19. Facilidade de remanufatura		
20. Facilidade de desmontagem.		

19) Cite os principais pontos negativos do método

20) Cite os principais pontos positivos do método (se houver algum em sua opinião)

21) Comentários, sugestões e críticas

MUITO OBRIGADO POR SUA COLABORAÇÃO!

ANEXO 1 – MATRIZ ERPA

A Matriz ERPA foi descrita no capítulo 3. Este apêndice apresenta uma amostra de possíveis considerações para a pontuação de cada elemento da matriz fornecida por Graedel & Allenby (1998).

Elemento (1,1) da Matriz do Produto:

Estagio do Ciclo de Vida: Pré-manufatura

Preocupação Ambiental: Escolha de Materiais

- Todos os materiais são os menos tóxicos e mais ambientalmente desejáveis para a função a ser desempenhada?
- O produto é projetado para minimizar o uso de materiais escassos?
- O produto é projetado para utilizar materiais ou componentes reciclados sempre que possível?

Elemento (1,2) da Matriz do Produto:

Estagio do Ciclo de Vida: Pré-manufatura

Preocupação Ambiental: Uso de Energia

- O produto é projetado para minimizar o uso de materiais cuja extração é intensiva em energia?
- O projeto do produto evita o uso de materiais cujo transporte para as instalações fabris irá requerer uso significativo de energia?
- O projeto do produto evita a geração de resíduos cuja reciclagem será intensiva em energia?

Elemento (1,3) da Matriz do Produto:

Estagio do Ciclo de Vida: Pré-manufatura

Preocupação Ambiental: Resíduos Sólidos

- O produto é projetado para minimizar o uso de materiais cuja extração ou limpeza envolva a geração de grandes quantidades de resíduos sólidos?
- O projeto do produto evita a utilização de materiais cujo transporte para as instalações fabris resultará em quantidade significativa de resíduos sólidos?

Elemento (1,4) da Matriz do Produto:

Estagio do Ciclo de Vida: Pré-manufatura

Preocupação Ambiental: Resíduos Líquidos

- O produto é projetado para minimizar o uso de materiais cuja extração ou limpeza envolva a geração de grandes quantidades de resíduos líquidos?

- O projeto do produto evita a utilização de materiais cujo transporte para as instalações fabris resultará em quantidade significativa de resíduos líquidos?

Elemento (1,5) da Matriz do Produto:

Estagio do Ciclo de Vida: Pré-manufatura

Preocupação Ambiental: Resíduos Gasosos

- O produto é projetado para minimizar o uso de materiais cuja extração ou limpeza envolve a geração de grandes quantidades de resíduos gasosos?
- O projeto do produto evita a utilização de materiais cujo transporte para as instalações fabris resultará em quantidade significativa de resíduos gasosos?

Elemento (2,1) da Matriz do Produto:

Estagio do Ciclo de Vida: Manufatura do Produto

Preocupação Ambiental: Escolha de Materiais

- O produto é projetado para evitar ou minimizar a incorporação de materiais de fornecimento escasso?
- O uso de materiais tóxicos é evitado ou minimizado?
- O uso de materiais radioativos é evitado ou minimizado?

Elemento (2,2) da Matriz do Produto:

Estagio do Ciclo de Vida: Manufatura do Produto

Preocupação Ambiental: Uso de Energia

- O produto é projetado para minimizar o uso de processos intensivos em energia tais como grandes diferenciais de temperatura, motores pesados, refrigeração extensiva etc.?
- O produto é projetado para minimizar o uso de testes/avaliações intensivos em energia?
- O processo de manufatura utiliza cogeração de energia, trocas de calor ou outras técnicas para diminuir o desperdício de energia?

Elemento (2,3) da Matriz do Produto:

Estagio do Ciclo de Vida: Manufatura do Produto

Preocupação Ambiental: Resíduos Sólidos

- Os resíduos sólidos da manufatura (por exemplo, refugo) foram minimizados e reutilizados o máximo possível?
- O material das embalagens que entram nas instalações fabris advindo dos fornecedores de componentes foi minimizado e as embalagens utilizam a menor variedade possível de materiais?
- Os fornecedores recolhem de volta os materiais das embalagens?

Elemento (2,4) da Matriz do Produto:

Estagio do Ciclo de Vida: Manufatura do Produto**Preocupação Ambiental: Resíduos Líquidos**

- Se óleos ou solventes são utilizados na manufatura deste produto, o seu uso foi minimizado e alternativas aos mesmos foram estudadas?
- Os resíduos líquidos do produto foram planejados para mínima toxicidade e ótima reutilização?
- Os processos foram projetados para requererem a máxima quantidade de líquidos reciclados advindos de fornecedores externos ao invés de materiais virgens?

Elemento (2,5) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Manufatura do Produto****Preocupação Ambiental: Resíduos Gasosos**

- Se CFCs ou HCFCs são utilizados na manufatura deste produto, alternativas foram investigadas detalhadamente?
- Gases de efeito estufa são utilizados ou gerados em qualquer etapa do processo de manufatura deste produto?
- Odorantes são utilizados ou gerados em qualquer etapa do processo de manufatura deste produto?

Elemento (3,1) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Empacotamento e Transporte do Produto****Preocupação Ambiental: Escolha de Materiais**

- A embalagem do produto minimiza o número de materiais diferentes utilizados?
- A embalagem do produto evita o uso de materiais tóxicos?
- Foram feitos esforços para a utilização de materiais recicláveis na embalagem do produto?

Elemento (3,2) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Empacotamento e Transporte do Produto****Preocupação Ambiental: Uso de Energia**

- A embalagem do produto evita o uso de materiais cuja extração ou processamento é intensivo em energia?
- Os procedimentos de empacotamento evitam o uso de atividades intensivas em energia?
- Os planos de distribuição do produto foram projetados para minimizar o uso de energia?

Elemento (3,3) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Empacotamento e Transporte do Produto****Preocupação Ambiental: Resíduos Sólidos**

- O volume da embalagem do produto, em todos os três níveis (primário, secundário e terciário), foi minimizado?
- A embalagem do produto é projetada para ser facilmente fracionada em seus materiais constituintes?
- Foram feitos planos de ação para recolher a embalagem do produto visando sua reutilização e reciclagem?

Elemento (3,4) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Empacotamento e Transporte do Produto****Preocupação Ambiental: Resíduos Líquidos**

- Quando apropriado, as embalagens dos produtos líquidos são contêineres reutilizáveis ou que possam ser enchidos novamente?
- A embalagem do produto contém alguma substância tóxica ou perigosa que pode vaziar e infiltrar-se caso o descarte seja impróprio?
- Os produtos, especialmente os perigosos ou aqueles potencialmente podem transbordar ou vaziar, são transportados através rotas seguras por motoristas treinados?

Elemento (3,5) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Empacotamento e Transporte do Produto****Preocupação Ambiental: Resíduos Gasosos**

- Os planos de distribuição do produto são projetados para minimizar as emissões dos veículos de transporte?
- Se o produto contiver gases pressurizados, os procedimentos de instalação são projetados para evitar sua liberação?
- Se a embalagem do produto for reciclada devido ao seu conteúdo energético (por exemplo, incinerada), alguma substância tóxica será emitida?

Elemento (4,1) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Uso do Produto****Preocupação Ambiental: Escolha de Materiais**

- Se o produto foi projetado para ser descartado após o uso, a quantidade de material foi minimizada e abordagens alternativas para alcançar este objetivo foram examinadas?
- Os itens consumíveis do produto contêm algum material escasso?
- Os itens consumíveis do produto contêm algum material tóxico ou ambientalmente indesejável?

Elemento (4,2) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Uso do Produto****Preocupação Ambiental: Uso de Energia**

- O produto foi projetado para minimizar o uso de energia em serviço?

- Foram incorporados no projeto do produto atributos para reduzir o consumo de energia (por exemplo, autodesligamento ou melhor isolamento)?
- O produto é capaz de monitorar e mostrar, durante a operação, seu consumo de energia?

Elemento (4,3) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Uso do Produto****Preocupação Ambiental: Resíduos Sólidos**

- O uso deste produto requer o descarte periódico de materiais sólidos tais como cartuchos, contêineres ou baterias?
- Alternativas para a utilização de itens sólidos consumíveis foram investigadas detalhadamente?
- Emissões intencionais de resíduos no solo ocorrem devido ao uso deste produto?

Elemento (4,4) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Uso do Produto****Preocupação Ambiental: Resíduos Líquidos**

- Alternativas para a utilização de itens líquidos consumíveis foram investigadas detalhadamente?
- Emissões intencionais de resíduos na água ocorrerem devido ao uso deste produto?
- O produto contém material líquido que tem o potencial de se dissipar de forma não intencional durante o uso?

Elemento (4,5) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Uso do Produto****Preocupação Ambiental: Resíduos Gasosos**

- Alternativas para a utilização de itens consumíveis gasosos foram investigadas detalhadamente?
- Emissões intencionais de resíduos no ar ocorrerem devido ao uso deste produto?
- O produto contém material gasoso que tem o potencial de se dissipar de forma não intencional durante o uso?

Elemento (5,1) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Descarte****Preocupação Ambiental: Escolha de Materiais**

- O produto minimiza o número de materiais diferentes que são utilizados na sua fabricação?
- O produto minimiza o uso de materiais tóxicos?
- Os diferentes materiais são facilmente identificáveis e separáveis?

Elemento (5,2) da Matriz do Produto:

Estagio do Ciclo de Vida: Descarte**Preocupação Ambiental: Uso de Energia**

- O produto foi projetado com o objetivo de minimizar a utilização de processos de desmontagem intensivos em energia?
- O produto foi projetado para a reutilização dos materiais mantendo sua energia embutida?
- O transporte do produto para a reciclagem utilizará muita energia devido ao peso do produto, seu volume ou a distância até as instalações de reciclagem?

Elemento (5,3) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Descarte****Preocupação Ambiental: Resíduos Sólidos**

- O produto foi montado com junções tais como parafusos e anéis de pressão ao invés de junções químicas ou soldas?
- Foram tomadas ações para evitar a junção de materiais dissimilares de maneiras difíceis de serem revertidas?
- Todos os componentes plásticos são identificados por marcas ISO com relação a seu conteúdo?

Elemento (5,4) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Descarte****Preocupação Ambiental: Resíduos Líquidos**

- É possível que líquidos contidos no produto sejam recuperados na desmontagem ao invés de perdidos?
- A desmontagem, recuperação e reutilização geram resíduos líquidos?
- A recuperação e reutilização de materiais geram resíduos líquidos?

Elemento (5,5) da Matriz do Produto:**Estagio do Ciclo de Vida: Descarte****Preocupação Ambiental: Resíduos Gasosos**

- Os gases contidos no produto podem ser recuperados na desmontagem ao invés de perdidos?
- A recuperação e reutilização dos materiais geram resíduos gasosos?
- As partes de plástico podem ser incineradas sem que sejam necessários sofisticados dispositivos de controle de poluição atmosférica?