

DANIEL FELIPE DE OLIVEIRA

MÉTODO MULTICRITÉRIO *ANALYTIC HIERARCHY*
PROCESS NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: UMA
DISCUSSÃO INICIAL

São Carlos – SP

2013

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

DANIEL FELIPE DE OLIVEIRA

MÉTODO MULTICRITÉRIO *ANALYTIC HIERARCHY*
PROCESS NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA: UMA
DISCUSSÃO INICIAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola de Engenharia de
São Carlos como parte dos requisitos
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Roberto Ometto

São Carlos – SP

2013

DEDICO a conclusão deste curso de graduação a meus pais, que sempre priorizaram minha educação em detrimento deles próprios. A eles, que com muito amor e afincio passaram todas as tardes do ano letivo de 1999 na porta do Colégio Lúdico para que eu pudesse assistir às aulas da 2ª série do Ensino Fundamental, todo o meu respeito e gratidão.

AGRADEÇO a Deus, que com amor assiste nossas vidas;

À Universidade de São Paulo, pela excelência em transformar atitudes e pensamentos;

Ao Aldo, pela solicitude na orientação deste trabalho;

À Ana Carolina, por ser um novo alento em minha vida.

DAS UTOPIAS

Se as coisas são inatingíveis... ora!
Não é motivo para não querê-las...
Que tristes os caminhos, se não fora
A mágica presença das estrelas!

Mário Quintana

RESUMO

OLIVEIRA, D. F. **Método Multicritério *Analytic Hierarchy Process* na Avaliação do Ciclo de Vida: Uma Discussão Inicial.** 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

A presente pesquisa buscou levantar referenciais teóricos capazes de contribuir com a técnica da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) através do método de análise multicritério *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Essa abordagem multicritério possibilitada pelo método AHP abre espaço para a realização de análises robustas, que podem envolver aspectos a primeira vista não comparáveis e não dimensionáveis entre si, de modo que se buscou estudar como a Avaliação do Ciclo de Vida poderia ser auxiliada por essa metodologia. Para tanto, de modo exploratório, foram buscadas informações na revisão bibliográfica que possibilitassem o entendimento, primeiramente das atuais demandas ambientais que se colocam aos avaliadores do ciclo de vida, para em seguida, identificar trabalhos e autores que trouxessem, ou explorassem alguma aplicação do método AHP como auxiliador no processo de Avaliação do Ciclo de Vida, possibilitando assim, a apresentação de um estudo teórico de como o método AHP pode ser conciliado à técnica da ACV de forma a contribuir eficientemente na análise de dados e na tomada de decisão.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); *Analytic Hierarchy Process* (AHP); Sustentabilidade.

ABSTRACT

OLIVEIRA, D. F. **Multicriteria Method Analytic Hierarchy Process in Life Cycle Assessment: An Initial Discussion.** 70 p. Term Paper (Graduation) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

This research sought to seek theoretical frameworks able to contribute to the Life Cycle Assessment (LCA) technic by the method of multicriteria analysis Analytic Hierarchy Process (AHP). This multicriteria approach made possible by AHP opens space for robust analyzes, which may involve aspects at first sight not comparable to each other and not scalable, so that it sought to study how Life Cycle Assessment could be aided by this methodology. Therefore, in an exploratory way, information was sought in the literature review that would enable the understanding, at first, of the current environmental demands faced by the life cycle evaluators, to then identify works and authors that bring or explore some AHP method application as a helper in the Life Cycle Assessment process, thus enabling the presentation of a theoretical study of how the AHP can help the LCA technic in order to contribute effectively in data analysis and decision making.

Key-words: Life Cycle Assessment (LCA); *Analytic Hierarchy Process* (AHP); Sustainability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de Equivalência dos Poluentes do Método Eco-Indicador 95. Fonte: Brentrup et al (2000).	18
Tabela 2: Fatores de Valoração do Método Eco-Indicador 95. Fonte: Brentrup et al (2000).	19
Tabela 3: Escala fundamental de julgamento em grau de importância. (Fonte: Adaptado de SAATY, 1991).	23
Tabela 4: Valores de IR conforme número de elementos. (Fonte: Adaptado de SAATY, 1991).	25
Tabela 5: Custo do Ciclo de Vida para limpeza de duas câmaras (Dólares). Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).	47
Tabela 6: Potencial de Impacto Ambiental para a limpeza de duas câmaras. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).	47
Tabela 7: Matriz de Comparação par a par dos critérios envolvidos com o Custo do Ciclo de Vida. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).	48
Tabela 8: Matriz de Comparação par a par dos critérios envolvidos com o eixo ambiental da análise. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).	48
Tabela 9: Matrizes de comparação das alternativas no âmbito do Custo do Ciclo de Vida. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).	49
Tabela 10: Matrizes de Comparação par a par das alternativas no âmbito das categorias de impacto ambiental. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).	49
Tabela 11: Resultado Final dos Índices para cada alternativa. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de desenvolvimento do trabalho.	10
Figura 2: Fases de uma ACV. Fonte: adaptado de ISO 14040:2006.....	13
Figura 3: Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida. Fonte: Adaptado de: ISO 14040:2006.	16
Figura 4: Decomposição de um problema em uma estrutura hierárquica. (Fonte: Adaptado de SAATY, 1991).....	23
Figura 5: Hierarquia definida para aplicação do método AHP. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).....	46
Figura 6: Quadro resumo dos principais pontos de aplicação do AHP na ACV. Observação: os pontos de aplicação são os em destaque.	41
Figura 7: Quadro resumo dos pontos de aplicação do AHP na etapa de Definição de Objetivo e Escopo da Avaliação do Ciclo de Vida.	43
Figura 8: Quadro resumo dos pontos de aplicação do AHP na etapa de Avaliação de Impacto da Avaliação do Ciclo de Vida. À direita, destaque para a descrição das etapas descritas à esquerda.	44

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
CMMAD	Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
IDLS	Índice de Desenvolvimento Local Sustentável
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	VIII
SUMÁRIO.....	IX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CARACTERIZAÇÃO INICIAL DO PROBLEMA DE PESQUISA	1
1.2. PROBLEMA E OBJETIVOS DO TRABALHO	6
1.3. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	7
1.4. MÉTODO DE PESQUISA	8
1.4.1 <i>Classificação da Pesquisa</i>	8
1.4.2 <i>Variáveis envolvidas</i>	9
1.4.3 <i>Estrutura de desenvolvimento</i>	10
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	12
2.2. ANÁLISE MULTICRITÉRIO.....	20
2.2.1. <i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i>	22
2.3. APLICAÇÕES DO AHP EM PROBLEMAS DE ORDEM AMBIENTAL E DE SUSTENTABILIDADE	26
3. DISCUSSÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO AHP NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	33
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	33
3.2. DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO	34
3.3. ANÁLISE DE INVENTÁRIO.....	36
3.4. AVALIAÇÃO DE IMPACTO	36
3.5. INTERPRETAÇÃO	38
4. SÍNTESE DOS PRINCIPAIS PONTOS DA APLICAÇÃO AHP-ACV.....	39
5. APLICAÇÃO EXPERIMENTAL	45
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

Visa-se apresentar aqui, inicialmente, o contexto que motivou o desenvolvimento desta pesquisa, e na sequência, explanar detalhadamente seus objetivos, método e justificativa.

1.1. Caracterização Inicial do Problema de Pesquisa

Tomando como premissa a necessidade de subsistência do homem enquanto ser vivo, mas também sua natureza evolutiva e inventiva, deve-se considerar que esses pontos, apesar de concorrentes, não são discordantes. Prova disso é que muitas tecnologias foram desenvolvidas a fim de facilitar a própria subsistência do homem. Mas hoje dia, existe a preocupação em se analisar criticamente como essas tecnologias afetam a humanidade e seu habitat, de modo a se pensar quais efeitos dela transpassam a missão de garantir a subsistência, e quais as consequências disso (CANDIDO, 2010).

A humanidade, ao longo de sua evolução, procurou sempre criar e descobrir formas para viver melhor. A conquista do fogo, a invenção da escrita, o domínio da metalurgia e outros grandes marcos históricos demonstram o progresso em que o homem vem caminhando, não apenas para garantir sua subsistência, mas inclusive como demonstração de sua efetiva dominação sobre os recursos naturais. Entretanto, o desenvolvimento da tecnologia ao longo da história trouxe consigo inúmeras *trade-offs* frente aos desdobramentos que iam implicando, sendo de ordem ética, social, religiosa, ambiental, entre outras. Dessa forma, o desafio do homem foi e é adquirir a capacidade de fazer boas considerações nas análises dessas *trade-offs*, de modo a refletir constantemente sobre suas ações, a fim de possibilitar que seu legado seja possível de chegar aos seus descendentes.

Porém, mais que deixar um legado, é necessário garantir que as gerações futuras possam viver em condições ambientais favoráveis, ou seja, sem escassez de recursos, de modo a não sair prejudicada em detrimento de seus antepassados. Essa consideração, aliada ao desenvolvimento tecnológico

que considere um gerenciamento, no presente, de questões ambientais, sociais e econômicas, é chamada de Desenvolvimento Sustentável, termo esse surgido em 1987, com a publicação, pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) da Organização das Nações Unidas (ONU), do Relatório Brundtland, também intitulado “Nosso futuro comum” (*Our Common Future*).

Dessa forma, verifica-se a importância atribuída nos dias de hoje à questão da sustentabilidade, sendo essa preocupação o resultado de um processo de conscientização ambiental iniciado ao meio do século XX, no qual constam alguns marcos, como a criação do Clube de Roma em 1968, a realização da Primeira Conferência Mundial sobre meio Ambiente, em Estocolmo, no ano de 1972, e também da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), realizada no Rio de Janeiro em 1992 (OMETTO, 2005).

A nível nacional, regulamentações ambientais também foram ratificadas em forma de lei, constando, por exemplo, na Constituição Nacional de 1988 e em resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), além das legislações estaduais e municipais (OMETTO, 2005).

O caso mais recente de atualização da legislação brasileira foi a sanção, por parte da Presidência da República, da lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS); e deu providências no sentido de categorizar e definir os temas inerentes à gestão estratégica de resíduos sólidos, além de trazer como princípios a precaução e a prevenção; a visão sistêmica na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública; o desenvolvimento sustentável, entre outros.

A referida lei aflora como um expoente da luta ambientalista junto ao poder público, como um marco regulatório que reúne um conjunto de diretrizes e ações a ser adotado dando enfoque na gestão integrada e no gerenciamento adequado dos resíduos sólidos. Além disso, a instituição da PNRS traz consigo a obrigatoriedade da elaboração de um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos por parte de empresas que os gerem em suas atividades industriais.

Assim, é implementada a responsabilidade compartilhada, entre o poder público, a coletividade e também o setor empresarial, pelo ciclo de vida dos produtos, ou seja, a responsabilidade se dá de forma individualizada e encadeada, abrangendo os fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e os titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos.

Verifica-se, portanto, a promulgação de uma lei com caráter moderno no sentido ambientalista, visto que contribui para a tomada de medidas por parte do setor industrial no que se refere à geração e destinação de resíduos sólidos. No entanto, a exigência legal deve ser entendida como um reflexo da evolução do pensamento crítico da sociedade brasileira frente à disseminação dos conceitos sustentáveis por meio da educação ambiental, que acabou por ir realizando ao longo do tempo a sua conscientização, que por sua vez, alterava também o padrão de consumo da população, fazendo com que as empresas de modo geral, fossem se atentando às novas exigências do mercado consumidor, que, crítico, passava a exigir a qualidade ambiental dos produtos a serem adquiridos.

Em outras palavras, a conscientização ambiental da sociedade gerou desafios às empresas no que se refere ao processo de desenvolvimento de produtos e também em toda a cadeia produtiva e de distribuição para que fossem capazes de desenvolver sistemas e tecnologias que excedessem à função do produto a fim de agregar também valores ambientais. E para isso, os produtores tiveram de encontrar meios de produção, distribuição e consumo dos recursos existentes de forma mais coesiva, economicamente eficaz e ecologicamente viável, que deduz à outra explicação do conceito de sustentabilidade (BARBOSA, 2008).

Sousa *et al.* (2010, p. 90) enfatizam muito bem essa questão:

O desafio de melhorar seu desempenho ambiental, e conseqüentemente de manter sua competitividade no mercado, tem levado as empresas a olhar além de suas fronteiras, buscando oportunidades de melhoria dentro e fora de suas etapas industriais. Este fato remete à necessidade de utilização de instrumentos eficientes

para a compreensão e avaliação de aspectos tecnológicos e ambientais, fornecendo informações relevantes que nortearão os processos de tomada de decisão.

Gera-se assim a necessidade de pesquisa, desenvolvimento e aprimoramento de técnicas capazes de ajudar a mensurar, compreender e analisar os aspectos ambientais para auxiliar a tomada de decisão dos gestores empresariais, que por sua vez, são os responsáveis por tornar a empresa competitiva e sustentável, como demonstra OMETTO (2005, p. 2):

Na visão empresarial, tal demanda torna o aspecto ambiental um diferencial estratégico de negócio, o qual deve buscar não apenas a satisfação imediata do cliente, mas a da sociedade, já que se reconhece que as gerações futuras têm o mesmo direito à qualidade ambiental usufruída pelas atuais.

Em relação à esfera nacional, Coral (2002) destaca que não existem dados conclusivos sobre a forma em que as empresas brasileiras estão investindo nas questões ambientais e sociais. E em seu estudo, onde construiu um modelo de planejamento estratégico para a sustentabilidade empresarial, a autora foi incisiva ao destacar que se o desenvolvimento e implantação de novos modelos de gestão e adequação do setor produtivo do Brasil não forem realizados em um espaço de tempo consideravelmente menor ao ocorrido, no passado, nos países ricos, a sustentabilidade da indústria nacional estará ameaçada.

Para tanto, Sistemas de Gestão Ambiental são necessários de ser implementados nas indústrias. Isso porque, sendo compostos de ferramentas e técnicas de análise e gerenciamento, auxiliam no levantamento correto de dados, bem como na análise deles a fim de colaborar para que desperdícios sejam reduzidos e para que o controle de processos de minimização de impacto ambiental seja possibilitado (CORAL, 2002).

Como informa De Lima (2010), duas variáveis na Gestão Ambiental são evidenciadas: a Gestão de Processos e a Gestão de Produto. Por Gestão de Processos se entende o gerenciamento das etapas que ocorrem internamente à empresa, de forma a otimizar processos internos, não levando em conta os

impactos causados fora desse escopo. Já a Gestão de Produtos se preocupa com todas as etapas de desenvolvimento e produção até sua utilização e descarte final. Em outras palavras, consiste em uma abordagem holística que considera todos os aspectos ambientais durante todo o ciclo de vida do produto.

Dentre as ferramentas utilizadas para auxiliar na Gestão Ambiental de Produto, destaca-se a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A metodologia permite a identificação dos impactos associados a todo o ciclo de vida de um produto, desde a aquisição de matérias primas até a disposição final, incluindo todos os insumos e processos produtivos, transporte e utilização (DE LIMA, 2010).

Como destaca Barrella (2011), a ACV é útil para a realização de análise de impactos ambientais porque evidencia as diversas naturezas das fontes de recursos no que tange à renovabilidade e esgotamento futuro. E conseqüentemente, a ACV se apresenta como uma importante ferramenta para subsidiar o processo de desenvolvimento de produto, gestão da produção, o pós-uso, a logística convencional e reversa a partir do processamento das informações e das avaliações técnicas (OMETTO, 2005).

A ACV teve seu desenvolvimento iniciado na década de 1960, e até 1980, os estudos sofreram uma falta de interesse por parte da academia e da indústria. Em 1985, no entanto, a *International Organization for Standardization* (ISO), respondendo a uma diretiva europeia sobre embalagens, desenvolveu a série de Normas 14040 para tratar especificamente da ACV, que até hoje é alvo de pesquisas para seu aprimoramento (DE LIMA, 2010).

Outro aspecto muito importante a ser levantado para a tomada de decisão é a consideração de fatores e critérios diferentes entre si, mas que devem ser levados em conta devido à sua importância na caracterização de determinado produto, processo ou serviço. Em outras palavras, para uma análise eficiente em uma Gestão Ambiental de Produto ou Processo, muitas vezes é necessário considerar e ponderar diferentes critérios que irão compor a análise.

Uma metodologia muito comum para esse tipo de análise é a multicritério, que visa considerar diferentes fatores relevantes, de modo a possibilitar uma análise mais detalhada dos pontos positivos e negativos das alternativas de ação para um dado sistema, sendo que aos fatores cabe destacar os interesses e critérios próprios de cada grupo envolvido no processo decisório (LUCENA, 1996).

Dentro da Análise Multicritério, o Método de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*) recebe especial atenção por ser um dos primeiros e mais utilizados métodos de apoio multicritério à decisão. Além disso, o método é aplicável em diversas áreas do conhecimento, e é capaz de incorporar em sua análise critérios qualitativos, e não apenas quantitativos (COSTA; BELDERRAIN, 2009).

Além disso, é verificada a aplicabilidade do AHP no contexto de análise de impacto ambiental de um sistema, visto sua versatilidade no sentido de se enquadrar facilmente em qualquer problema, e também na sua capacidade de considerar múltiplos critérios na análise e ponderá-los a fim de servir de subsídio para a tomada de decisão (LUCENA, 1996).

Dessa forma, é verificada a importância em se estudar ferramentas como a ACV e o AHP, que subsidiem a Gestão Ambiental de Produtos, visto que são consideradas eficientes para que a tomada de decisão empresarial seja realizada de modo consciente, em resposta às solicitações legais e mercadológicas que tem se colocado nos últimos anos.

1.2. Problema e Objetivos do Trabalho

Tendo em vista as demandas e exigências hoje colocadas pelo mercado ou pelo poder público, como já explanado no item anterior, propõe-se com este trabalho estudar a abordagem conjunta da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e da Análise Hierárquica de Processos (AHP) a fim de se levantar o estado da arte do referido contexto para que se consiga obter um entendimento de como a aplicação das técnicas de forma complementar pode colaborar para uma eficiente avaliação ambiental.

Assim, o problema de pesquisa foi elaborado a partir da pergunta geradora abaixo, e suas ramificações:

Como é possível relacionar o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), de modo a se compor uma metodologia eficiente na consideração de múltiplos critérios para auxiliar o avaliador do ciclo de vida na tomada de decisão?

- a) Quais fases da ACV podem ter a necessidade de consideração de múltiplos critérios?
- b) É interessante a atribuição de pesos nos critérios considerados em determinada fase da ACV, de modo a se extrair uma ponderação dos diferentes fatores envolvidos no problema?
- c) Já existe algum método ou proposta de metodologia que aborde de modo conjunto a Análise Multicritério e a ACV?

Essas questões não visam solucionar por completo o estudo da relação ACV e AHP, mas procuram iniciar um aprimoramento metodológico que permita melhorar a eficiência da análise de impacto ambiental durante o ciclo de vida de um produto. Como objetivos específicos atrelados a isso, encontram-se:

- a) levantar referenciais teóricos que apontem formas de se trabalhar eficazmente as metodologias ACV e AHP de modo conjunto;
- b) entender quais demandas ambientais são atualmente colocadas aos avaliadores de ciclo de vida; e
- c) apresentar um estudo teórico de como conciliar de modo eficiente as técnicas ACV e AHP para auxiliar os avaliadores de ciclo de vida na tomada de decisão.

1.3. Justificativa da Pesquisa

Levando em consideração, conforme já explanado nos itens anteriores, a crescente necessidade, por parte da indústria, de desenvolvimento de produtos considerando seu desempenho ambiental, faz-se necessário o

aprimoramento contínuo de técnicas capazes de auxiliar a avaliação de impacto ambiental dos produtos.

Além disso, a nível científico, é crescente também a demanda pelo desenvolvimento e aprimoramento de metodologias que auxiliem na avaliação ambiental ao longo de todo o ciclo de vida de produtos, a fim de se divulgar e propagar os que apresentam melhor desempenho ambiental em detrimento de outros.

Dessa forma, a proposta de estudo de uma técnica que busque o aprimoramento da Avaliação do Ciclo de Vida é válida no sentido de que se visa contemplar a demanda colocada pela academia e pela indústria por metodologias eficientes de avaliação de impacto ambiental, conforme já explanado. Esse aprimoramento buscará a consideração de múltiplos critérios a fim de melhorar a mensuração dos aspectos causadores de impacto ambiental. Em outras palavras, frente ao amplo conceito de Avaliação do Ciclo de Vida, busca-se refinar os pontos onde existem alternativas a serem mensuradas para que dentre elas seja escolhida a mais representativa.

Assim, é justificado o trabalho pelo oferecimento de contribuições aos estudos de Avaliação do Ciclo de Vida, de modo que industriais e cientistas possam se beneficiar do que for desenvolvido.

1.4. Método de Pesquisa

Dados o problema e o objetivo do trabalho, conforme descrito no item 1.2, busca-se aqui explanar a estratégia de pesquisa utilizada para o cumprimento do referido objetivo a fim de que a pesquisa possa ser avaliada e replicada pela comunidade científica.

1.4.1 Classificação da Pesquisa

Para tanto, dentre as várias formas de classificação de pesquisa existentes, utiliza-se da que é considerada “Clássica” por Da Silva e Menezes (2005), conforme segue:

- Quanto à natureza da pesquisa (Básica ou Aplicada), pode ser classificada como **Básica**, visto que busca gerar conhecimentos

novos úteis para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista, envolvendo verdades e interesses universais.

- Do ponto de vista da forma de abordagem do problema (Quantitativa ou Qualitativa), o trabalho pode ser considerado **Qualitativo**, uma vez que considera a interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados, não requerendo o uso de métodos e técnicas estatísticas. Justifica-se também por ser descritivo, onde o processo e seu significado são os focos principais de abordagem.
- Do ponto de vista de seus objetivos (Exploratória, Descritiva ou Explicativa), a pesquisa pode ser classificada como **Exploratória**, visto que visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses, envolvendo levantamento bibliográfico, e não buscando descrever as características de determinado fenômeno, e tampouco identificar e explicar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos.
- Por fim, quanto aos procedimentos técnicos (Pesquisa Bibliográfica, Pesquisa Documental, Pesquisa Experimental, Levantamento, Estudo de Caso, Pesquisa Expost-Facto, Pesquisa-Ação ou Pesquisa Participante), o trabalho é classificado como **Bibliográfico**, visto que é elaborado a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e materiais disponibilizados na Internet.

Em suma, esta pesquisa é classificada como básica, qualitativa, exploratória e bibliográfica.

1.4.2 Variáveis envolvidas

A exemplo de Soulé (2011), que apresenta em seu trabalho, além do objetivo claro, também uma série de variáveis nas quais se demonstram a relação da pesquisa com o ambiente em que ela se insere, abaixo são desenvolvidas as que aqui se aplicam.

- a) Conexão entre metodologias eficientes de análise de impactos ambientais e o estímulo a práticas sustentáveis.
- b) Relação entre as atuais demandas ambientais impostas ao mercado com o desenvolvimento de produtos com menor impacto ambiental.
- c) Alternativas de avaliação de novas concepções de produto dadas por considerações de múltiplos critérios.

Assim, este trabalho busca conectar a metodologia estudada às atuais demandas e problemas que são impostos às empresas frente às suas atividades que de alguma forma podem afetar o meio ambiente, estimulando o debate pela busca de alternativas de análise ambiental de produtos.

1.4.3 Estrutura de desenvolvimento

Como instrução para o desenvolvimento deste trabalho, foi construído o seguinte processo:

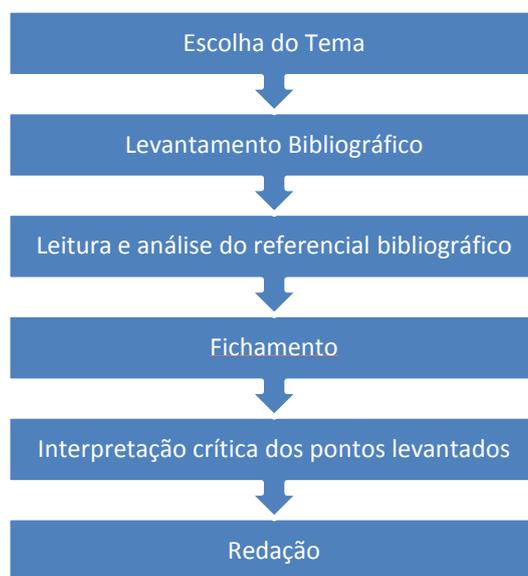


Figura 1: Estrutura de desenvolvimento do trabalho.

Em primeiro lugar, foi definido o tema de pesquisa a ser desenvolvido, o que possibilitou a busca por referencial bibliográfico relacionado a ele. Para a pesquisa, foi utilizada a base de dados *Scopus*, buscando-se pelas palavras chave: *Life Cycle Assessment*; *Analytic Hierarchy Process*; *Sustainability*. Também foram consideradas publicações já conhecidas do autor, e as

disponíveis no catálogo da biblioteca virtual da Universidade de São Paulo, buscando-se pelas mesmas palavras chave mencionadas.

Após análise desse material, foi realizado um fichamento, onde foram selecionadas as partes do referencial que mais se interagem com o tema proposto, a fim de que fossem consideradas na escrita deste trabalho. Com uma análise interpretativa crítica dos pontos levantados, foi possível, enfim, redigir o trabalho completo.

1.5. Estrutura do Trabalho

Este tópico foi elaborado com o intuito de possibilitar uma melhor visualização do escopo deste trabalho, e assim também permitir um entendimento melhor da coesão das partes que o compõem.

No capítulo 1 constou a introdução da pesquisa (caracterização inicial do problema, objetivos do trabalho, justificativa, definição do método de pesquisa e, neste tópico, a descrição da estrutura do trabalho).

No segundo capítulo, apresenta-se a revisão bibliográfica realizada a fim de levantar o arcabouço teórico que dará sustentação à discussão proposta. Ela está dividida nos pontos chave do estudo, que são a Avaliação do Ciclo de Vida, a Análise Multicritério, com ênfase especial ao Método da Análise Hierárquica (AHP), e a Análise Multicritério aplicada à ótica ambiental, com visas de levantar o estado da arte da questão.

Em seguida, é apresentado um exemplo prático de aplicação do método AHP na Avaliação do Ciclo de Vida, com o intuito de elucidar o passo a passo da aplicação. Assim, com base no levantamento e elucidação realizados, é apresentada na próxima seção a teorização referente à aplicabilidade do método AHP na Avaliação do Ciclo de Vida.

No item cinco, é realizada uma síntese das informações trazidas na teorização a fim de elucidar e resumir as aplicações do método AHP na ACV. E por fim, é concluído o trabalho remetendo aos objetivos específicos traçados e destacando as principais contribuições proporcionadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Busca-se aqui trazer as informações mais relevantes que foram levantadas a partir da bibliografia consultada, a fim de dar suporte ao que o trabalho pretende desenvolver.

Para tanto, este tópico foi dividido em três etapas, que são as componentes principais da estrutura teórica da pesquisa, a saber: Avaliação do Ciclo de Vida, onde se buscará explanar a metodologia como um todo, mas dando enfoque especial às etapas onde se utiliza ponderação de critérios ou escolha de alternativas; Análise Multicritério, neste caso, com ênfase ao Método da Análise Hierárquica, que é a metodologia multicriterial a qual foi proposta de ser discutida; e por fim, a Análise Multicritério aplicada à Avaliação do Ciclo de Vida.

2.1. Avaliação do Ciclo de Vida

Por Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), segundo a Norma ISO 14040 : 2006, que regulamenta oficialmente a aplicação da metodologia, entende-se uma técnica onde se avalia aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto¹ mediante:

- A compilação de um inventário de entradas e saídas pertinentes de um sistema;
- A avaliação dos impactos ambientais potenciais associados a essas entradas e saídas;
- A interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos propostos.

Assim, segundo a mesma norma, a ACV pode ajudar: na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos; na tomada de decisões em indústrias, organizações governamentais ou não governamentais; na seleção de indicadores de desempenho ambiental, e no *marketing* associado a alguma declaração ambiental de produto.

¹ Para a norma em questão, o termo “Produto” usado isoladamente não inclui apenas sistemas de produto, mas pode também incluir sistemas de serviço.

Segundo Ometto (2005), a ACV se apresenta como uma importante ferramenta para subsidiar o desenvolvimento de produto, a gestão da produção, o pós-uso, a logística, entre outros processos, a partir de avaliações técnicas e compilação de informações.

Barrella (2011) traz que a escolha da ACV é útil na realização de análise de impactos ambientais, principalmente quando considera parcelas de absorção e regeneração da energia produzida e consumida, de modo que ficam evidenciadas as diversas naturezas das fontes de recursos no que se referem a sua renovabilidade e esgotamento futuro.

Como explanado por Valt (2004) a ACV é composta por quatro fases, que constituem sua estrutura de aplicação, sendo elas:

- definição de objetivo e escopo;
- análise de inventário;
- avaliação de impacto; e
- interpretação.

A figura abaixo permite uma melhor visualização das fases da ACV.

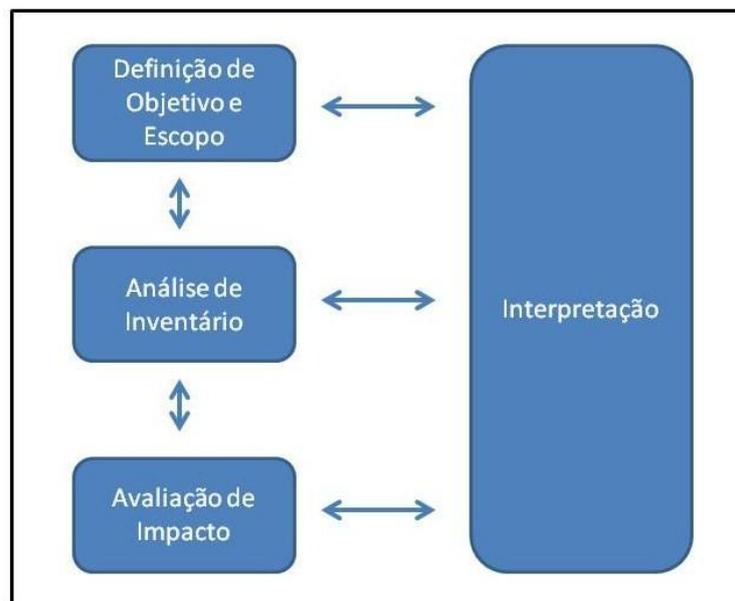


Figura 2: Fases de uma ACV. Fonte: adaptado de ISO 14040:2006.

Como ressalta Valt (2004), vale observar que as quatro fases são inter-relacionadas, de modo que o correto desenvolvimento de cada fase é essencial para o correto desenvolvimento do estudo.

Na Definição de Objetivo e Escopo se deve buscar a definição clara e consistente da aplicação pretendida, devendo ser declarado inequivocamente, no caso do objetivo, a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo. No escopo, deve-se constar a função e a unidade funcional, as fronteiras do sistema, os requisitos de qualidade dos dados, as comparações entre sistemas e por fim, considerações sobre análise crítica (ISO 14040:2006).

Krozer e Vid (1998) trazem que a definição de escopo também inclui os procedimentos para a distribuição de pesos (grau de importância) sobre as matérias-primas e produtos do sistema. Além disso, a seleção dos dados que serão incluídos no estudo, em função de algum parâmetro significativo, é também definida no escopo do estudo. Os critérios usados para selecionar os materiais significativos incluem as relevâncias mássica, energética e ambiental.

A análise do inventário envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas do sistema em questão. A coleta de dados, sendo eles qualitativos ou quantitativos, deve ser realizada para cada unidade de processo que esteja nas fronteiras do sistema.

Vigon e Jensen² (1995 *apud* VALT, 2004, p. 10) trazem que a qualidade da ACV vai depender da confiabilidade dos dados levantados, sendo que os dados provenientes de consumos na manufatura são os de mais fácil obtenção e os mais confiáveis. Mais que isso, eles afirmam também que os dados de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas são normalmente mais difíceis de serem obtidos por causa principalmente da dificuldade de determinação de sua exata composição e da confiabilidade do resultado.

A terceira fase, Avaliação de Impacto, é dirigida à avaliação de impactos ambientais potenciais, usando os resultados da análise de inventário do ciclo de vida. Ela inclui, entre outros, elementos como: correlação de dados de

² VIGON, B. W.; JENSEN, A. A. (1995). Life cycle assessment: data quality and databases practitioner severy. **Journal Cleaner Production**, Great Britain, v. 3, n. 3, p. 135-141, 1995.

inventário por categorias de impacto (classificação); modelagem de dados de inventário dentro das categorias de impacto (caracterização) e a possível agregação dos resultados em casos muito específicos e significativos (ponderação). (ISO 14040:2006).

Segundo Krozer e Vid (1998), nesta etapa, os dados são separados e agrupados de acordo com as categorias determinadas de impacto. Na etapa de caracterização, os dados que contribuem para a mesma categoria de impacto são normalizados de acordo com o efeito relativo de um. Por fim, na etapa de valoração as categorias de impacto são somadas de acordo com uma escala de importância previamente definida, obtendo-se um indicador único de desempenho ambiental para o produto. A figura abaixo, baseada na norma ISO 14040:2006, ilustra os elementos da etapa de Avaliação de Impacto.

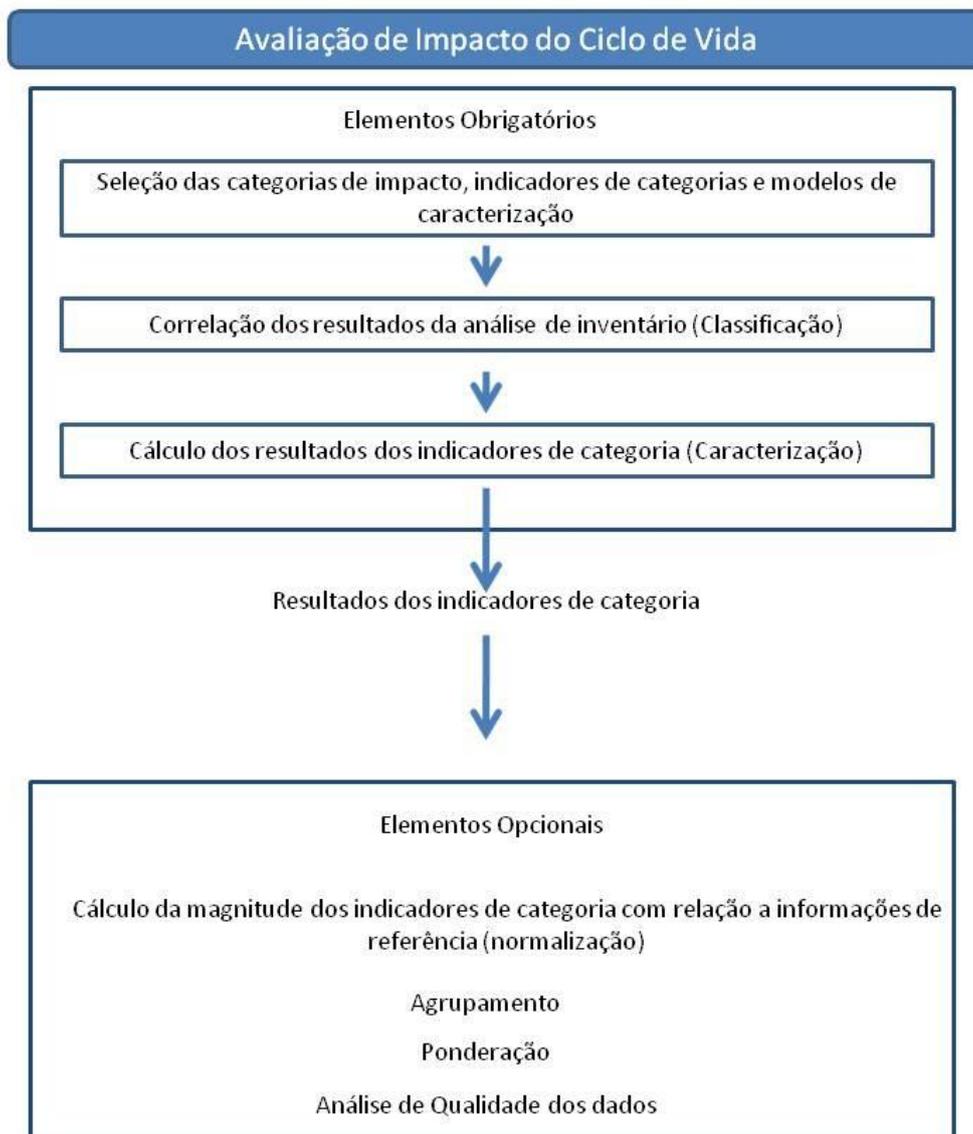


Figura 3: Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida. Fonte: Adaptado de: ISO 14040:2006.

Vale ressaltar que o nível de detalhe, a escolha dos impactos avaliados e as metodologias usadas dependem do objetivo e do escopo do estudo. Assim, não há nenhuma metodologia aceita de forma geral para a associação acurada de dados de inventário com impactos ambientais potenciais específicos. Consequentemente, é verificado aqui a existência de subjetividade na avaliação de impacto, bem como na escolha, modelagem e avaliação de categorias de impacto (ISO 14040:2006).

Ferreira (2004) traz que a metodologia e a estrutura científica para a análise de impacto estão ainda em desenvolvimento. Segundo o autor,

modelos para as categorias de impacto estão em diferentes estágios de desenvolvimento, não existindo uma metodologia aceita comumente para associar de modo consistente e correto os dados de inventário com potenciais impactos ambientais específicos.

Valt (2004) confirma o fato trazido por Ferreira (2004) e apresenta, dentro de vários existentes, três procedimentos que podem ser utilizados. A saber:

- o método Eco-Indicador 95, que é um dos primeiros sistemas de peso desenvolvido para a determinação de valores associados aos aspectos ambientais. Nele, os dados do inventário são classificados e caracterizados em uma mesma base através da aplicação dos fatores de equivalência mostrados na tabela abaixo.

O procedimento é realizado da seguinte forma: dadas as categorias de impactos ambientais, como o aquecimento global, a eutrofização, a acidificação e o efeito fotoquímico, entre outros, existe uma escala de fatores de equivalência que permite o cálculo de um índice de impacto ambiental para o produto em estudo.

Em outras palavras, através da aplicação dos fatores de equivalência mostrados na tabela abaixo, é possível realizar a ponderação dos poluentes de seu sistema, visto que um poluente é considerado como base, recebendo valor um, e os demais, possuem uma classificação equivalente em termos do poluente base. Deste modo, quanto maior o fator de caracterização, maior a contribuição de um poluente para o respectivo impacto global.

Tabela 1: Fatores de Equivalência dos Poluentes do Método Eco-Indicador 95. Fonte: Brentrup et al (2000).

Emissão	Fator de Equivalência	Categoria de Impacto
CO ₂	1,00	Aquecimento global (CO ₂ equivalente)
CO	2,00	Aquecimento global
HC	3,00	Aquecimento global
C ₂ F ₆ /CF ₄	12,50	Aquecimento global
CH ₄	21,00	Aquecimento global
N ₂ O	310,00	Aquecimento global
NO _x	0,13	Eutrofização (PO ₄ equivalente)
NH ₃	0,33	Eutrofização
NO ₃	0,42	Eutrofização
N _{TOTAL}	0,42	Eutrofização
P _{TOTAL}	3,06	Eutrofização
H ₂ SO ₄	0,65	Acidificação (SO ₂ equivalente)
NO _x	0,70	Acidificação
HCl	0,88	Acidificação
SO ₂	1,00	Acidificação
HF	1,60	Acidificação
NH ₃	1,88	Acidificação
H ₂ S	1,88	Acidificação
CO	0,03	Efeito fotoquímico (C ₂ H ₄ equivalente)
VOC	0,42	Efeito fotoquímico
HC	0,60	Efeito fotoquímico

Após a etapa de caracterização, os dados devem sofrer normalização de acordo com a contribuição do sistema em estudo para a extensão total dos efeitos ambientais de uma região específica. Isto ocorre através da divisão das quantidades dos efeitos mensurados pelos coeficientes de normalização, que por sua vez, são calculados dividindo-se a quantidade total anual de emissão de cada categoria de impacto em determinada região por sua população total.

No entanto, os dados normalizados não são capazes de permitir a comparação entre diferentes categorias de impacto com relação ao potencial de prejuízo ao meio ambiente. Para tanto, deve-se realizar a multiplicação de cada dado normalizado por um fator de peso determinado de acordo com o prejuízo que cada categoria de impacto pode causar ao meio ambiente. A tabela abaixo mostra o agrupamento dos fatores de peso adotados para as

categorias de impactos consideradas no método Eco Indicador 95, considerando 5% de prejuízo ao ecossistema.

Tabela 2: Fatores de Valoração do Método Eco-Indicador 95. Fonte: Brentrup et al (2000).

Categoria de Impacto	Fator de Peso
Acidificação	10,0
Eutrofização	5,0
Aquecimento global	2,5
Formação de ozônio fotoquímico	2,5

Ao final, é realizada a ponderação dos valores de equivalência com base na classificação das categorias de impacto, de modo que são obtidos valores adimensionais que podem ser somados, representando o peso ambiental total do sistema em investigação.

- O método Eco-Indicador 99. Este método é baseado no Eco-Indicador 95, mas envolve ainda a análise de depleção de recursos naturais, uso da terra e efeitos da radiação. Além disso, a distribuição de pesos é feita de maneira diferente da empregada anteriormente.
- O método AHP, que envolve uma avaliação multi-critério, de forma a reduzir as incertezas durante as decisões de processo.

Por fim, na última fase, Interpretação do Ciclo de Vida, os resultados do estudo são combinados de forma consistente com o objetivo e escopo definidos, visando alcançar conclusões e recomendações. Assim, esta fase pode envolver o processo iterativo de análise crítica e revisão do escopo da ACV, assim como da natureza e qualidade dos dados coletados (ISO 14040:2006).

2.2. Análise Multicritério

A análise multicritério teve seu início nos anos 60 como instrumento de apoio à decisão, e é aplicada na análise comparativa de alternativas para decisão utilizando de medidas heterogêneas. A técnica permite levar em conta diversos critérios em simultâneo na análise de uma situação complexa. Assim, destina-se a ajudar os tomadores de decisão a integrar diferentes opções nas suas ações, refletindo sobre diferentes pontos de vista e considerações pertinentes. A participação dos tomadores de decisão no processo é um dos elementos centrais da abordagem (MANUAL TÉCNICO, 2013).

Como fator importante em favor da análise multicritério, Lucena (1996) afirma que muitas decisões são tomadas tradicionalmente com base em apenas um ou dois critérios, e se utilizam de técnicas monocriteriais como, por exemplo, as de otimização da pesquisa operacional. Assim, nesses tipos de métodos, não é simples levar em consideração a presença e a importância de fatores subjetivos, sejam eles quantitativos ou não, conduzindo muitas vezes à escolha de uma alternativa que não seria a mais adequada para atender os objetivos buscados com a análise.

Buscando, portanto, auxiliar na ponderação de alternativas para determinado problema, o objetivo da técnica consiste em estruturar e combinar diferentes análises consideradas em um processo de tomada de decisão, sendo que se baseia em escolhas múltiplas e o tratamento dado a cada uma das escolhas condiciona a decisão final. É normalmente usada para sintetizar opiniões expressadas, determinar prioridades, analisar situações de conflito, formular recomendações ou proporcionar orientações de natureza operacional (MANUAL TÉCNICO, 2013).

Hoje em dia, o método multicritério é uma das ferramentas mais difundidas no apoio à tomada de decisão. Além disso, a metodologia apresentou um considerável desenvolvimento nos últimos anos, devido, principalmente, à diversidade de trabalhos publicados nessa área, inclusive no setor de desenvolvimento sustentável (SILVA; COSTA, 2011).

O ponto forte da análise multicritério está no fato de permitir a consideração de valores e opiniões individuais de vários envolvidos no

problema estudado, e processar as relações funcionais dentro de uma rede complexa, de forma quantitativa. Por outro lado, existem problemas específicos de implementação que podem limitar o uso da análise multicritério. Adicionalmente, esta técnica nem sempre é usada de uma forma interativa, como deveria ser, e tende a fixar critérios que são, na realidade, instáveis (MANUAL TÉCNICO, 2013).

Segundo Clímaco e Valle (2012), sobre a designação comum de métodos multicritério, aparecem na literatura especializada dois ramos distintos: os Multiatributos e os Multiobjetivos, sendo que a primeira se refere a métodos que envolvem alternativas explicitamente conhecidas, enquanto a segunda diz respeito a problemas onde as alternativas são implicitamente definidas por restrições.

Seppällä, Basson & Norris (2002) mostraram que as diversas etapas e equações da Avaliação do Ciclo de Vida são mais aderentes aos métodos compensatórios da análise Multiatributos.

No que se refere aos métodos Multiatributo, foram desenvolvidas a chamada Escola Americana, onde se utilizam funções utilidade multiatributo para apoiar a avaliação das alternativas, e a chamada Escola Francesa, baseada na introdução de relações de ordem parciais (relações de prevalência - *outranking*) (CLÍMACO; VALLE, 2012).

Segundo Ruy e Alliprandini (2010), um dos métodos de análise Multiatributos mais relevantes para a ACV é o Método Analytic Hierarchy Process (AHP), que aborda problemas complexos de escolha de forma simples (COSTA; MOLL, 1999), podendo ser considerado como um ramo específico da Escola Americana, em que uma hierarquia de níveis de decisão é identificada (SAATY, 1991).

Salomon, Montevechi e Pamplona (1999), levantando um estudo comparativo do método AHP com outras abordagens multicritério (a saber, *Fuzzy Decision Approach (FDA)*; *Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique (MACBETH)*; *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*, e *Analytic Network Process (ANP)*), não

permitem concluir que o método AHP seja inferior. Pelo contrário, os resultados obtidos pelos diferentes métodos, na maioria das vezes, foram considerados similares e diversas vantagens da aplicação do AHP foram observadas em todos os casos.

Assim, optou-se pela escolha de um método de análise multicritério, no caso o AHP, para ser conceituado, a fim de se montar um referencial teórico completo para posterior análise comparativa com a ACV. A descrição detalhada do AHP segue no item abaixo.

2.2.1. *Analytic Hierarchy Process (AHP)*

A técnica multicritério AHP, desenvolvida por Thomas Saaty em 1971 consiste numa ferramenta matemática que dá apoio à decisão por meio de uma análise multicritério das alternativas levantadas. Através dessa técnica, podem ser levados em conta diversos critérios e alternativas de modo simultâneo na análise de uma situação complexa, que pode envolver variáveis quantitativas e qualitativas. Esses critérios e alternativas são classificados no método em escalas de prioridade através de comparações par a par realizadas em matrizes (MAGALHÃES, 2011). Além disso, o método AHP permite a conciliação de modelos matemáticos e o conhecimento empírico dos profissionais envolvidos no problema, visto que a análise multicritério é realizada pela classificação hierárquica dos critérios e alternativas por parte dos seus operadores. Assim, o método é aplicado para que todos os fatores importantes sejam considerados e medidos, sendo visto como um modo eficiente de criar medidas para entidades subjetivas, podendo usá-las em um processo decisório (SAATY, 1991).

O AHP é considerado um método robusto de avaliação que permite não apenas a análise de variáveis quantitativas, mas também qualitativas (MAGALHÃES, 2011). Além disso, permite ainda que fatores aparentemente não comparáveis possam ser relacionados, pois utiliza comparação par a par para cada critério analisado. É a comparação par a par feita pelo usuário que possibilita a determinação de escalas de prioridade das alternativas em análise. Essa comparação é realizada em matrizes e consiste na atribuição de

importâncias que refletem os pesos relativos de cada item analisado (SAATY, 1987).

O primeiro passo para a utilização do AHP é a determinação do problema a ser estudado e do objetivo a ser alcançado. Em seguida, uma estrutura hierárquica deve ser definida de modo que se coloque o objetivo no topo, os critérios no nível intermediário e as alternativas de decisão ao final (SAATY, 2008). Um modelo de estrutura hierárquica é ilustrado abaixo.

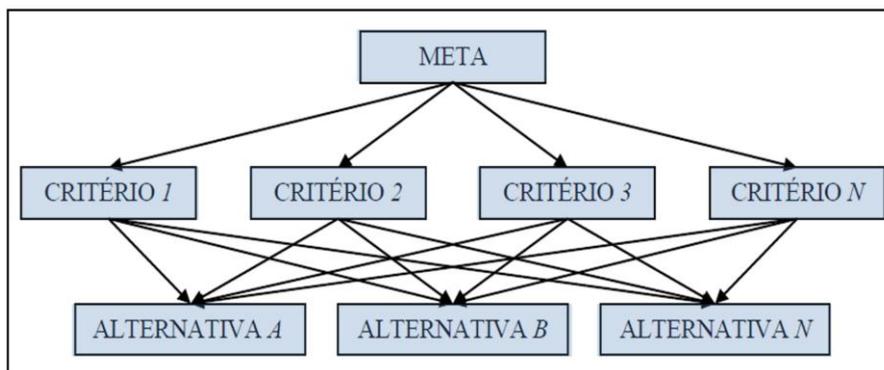


Figura 4: Decomposição de um problema em uma estrutura hierárquica. (Fonte: Adaptado de SAATY, 1991).

O próximo passo para a execução do método é a construção de matrizes de comparação par a par, de modo que os elementos de um mesmo nível sejam avaliados considerando os elementos superiores (SAATY, 2008). A comparação par a par é realizada de acordo com os pesos definidos em uma escala de julgamento mostrada abaixo na tabela abaixo (SAATY, 1991).

Tabela 3: Escala fundamental de julgamento em grau de importância. (Fonte: Adaptado de SAATY, 1991).

Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação a outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação a outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação a outra com o mais alto grau de certeza.
2,4,6,8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Valores recíprocos	Se a atividade i recebe um valor x quando comparado a atividade j , então j recebe o valor recíproco $1/x$ quando comparado a i .	

Para a avaliação par a par, os elementos avaliados nas matrizes correspondem cada um a uma linha ou coluna respectiva. Dessa forma, a matriz gerada a partir das comparações tem a seguinte forma (SAATY, 1991):

Equação 1: Matriz de comparação par a par. (Fonte: Adaptado de SAATY, 1991).

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

Onde,

$$\text{a) } A = (a_{ij}) \quad \text{b) } a_{ij} = \alpha \quad \text{c) } a_{ji} = \frac{1}{\alpha} \quad \text{d) } a_{ii} = 1$$

Sendo **A** a matriz de comparação par a par, **a_{ij}** a comparação par a par dos elementos **i** e **j**, **a_{ji}** a comparação recíproca de **a_{ij}** e **a_{ii}** a comparação entre o mesmo elemento. Dessa forma, apenas uma metade triangular da matriz necessita ser preenchida, pois a diagonal principal tem valor unitário e a outra metade triangular corresponderá aos valores recíprocos.

Por fim, uma escala de prioridades de cada matriz pode ser determinada e sendo as matrizes consistentes, a partir de todas as escalas, pode ser feita uma análise global do problema (SAATY, 2008).

A escala de prioridades é determinada pela computação do autovetor (**W**) da matriz de comparação **A**. O cálculo de **W** é realizado a partir da divisão dos elementos de cada coluna de **A** pela soma daquela coluna, seguido da soma dos elementos das linhas resultantes e a divisão destes pelo número de elementos na linha (SAATY, 1991).

O autovetor **W** representa, dessa forma, a importância relativa de cada elemento analisado. Em outras palavras, o autovetor **W** contempla as prioridades respectivas dos elementos comparados (MAGALHÃES, 2011).

Os julgamentos realizados na referida matriz de comparação par a par devem apresentar consistência, pelo contrário o método não aproximará os resultados da realidade, visto que o autovetor **W**, nesse caso, é proveniente de uma matriz inconsistente. Baseado nisso, podem-se determinar índices que

avaliem a consistência dos julgamentos, possibilitando ao usuário, no caso de inconsistência, a revisão dos julgamentos (SAATY, 1991).

Uma estimativa de consistência é dada pelos seguintes passos (SAATY, 1991):

- i. multiplicação da matriz **A** pelo autovetor **W** resultando no vetor **W'**;
- ii. divisão da primeira componente de **W'** pela primeira componente de **W**; divisão da segunda componente de **W'** pela segunda componente de **W** e assim sucessivamente até se obter um terceiro vetor coluna, cuja soma deve ser dividida pelo número de componentes comparados (*n*). O valor resultante é chamado de autovalor máximo λ ;
- iii. cálculo do índice de consistência (**IC**) através da divisão da diferença de λ e *n* pela diferença de *n* e 1.
- iv. cálculo da razão de consistência (**RC**) através da divisão do **IC** por um valor denominado índice randômico (**IR**).

O **IR** foi tabelado para matrizes de comparações de até 15 elementos (SAATY, 1991). Os valores do **IR** encontram-se na tabela abaixo.

Tabela 4: Valores de IR conforme número de elementos. (Fonte: Adaptado de SAATY, 1991).

<i>n</i>	IR	<i>n</i>	IR	<i>n</i>	IR
1	0,00	6	1,24	11	1,51
2	0,00	7	1,32	12	1,48
3	0,58	8	1,41	13	1,56
4	0,90	9	1,45	14	1,57
5	1,12	10	1,49	15	1,59

Dessa forma, pode ser determinada a **RC**. Se o valor de **RC** for inferior a 0,10 a matriz de comparação correspondente tem níveis aceitáveis de consistência (SAATY, 1991). É a **RC** que determina se o usuário do método deve ou não rever seus julgamentos a fim de se aumentar a consistência da matriz em questão (MAGALHÃES, 2011).

Por fim, é realizada uma análise conjunta dos autovetores obtidos em cada matriz de comparação. Para tanto, é montada uma matriz com cada autovetor das matrizes do mesmo nível hierárquico. Essa matriz, ao ser multiplicada pelo autovetor da matriz de comparação do nível imediatamente

superior, determina um vetor de prioridades, que representa o grau de importância respectivo de cada elemento analisado (MAGALHÃES, 2011).

Pode-se notar que uma limitação da ferramenta é a quantidade de elementos a serem analisados, visto que quanto mais elementos existirem, maior será o número de comparações par a par que deverão ser feitas, deixando a aplicação trabalhosa e cansativa. Além disso, foram determinados apenas os valores do índice randômico para uma matriz no máximo 15 x 15, ou seja, a verificação da consistência é impossibilitada se for necessária a comparação par a par de mais de 15 elementos (SAATY, 1991).

Outro ponto crítico é o fato de que, durante a realização dos julgamentos, o fator emocional pode distorcer os resultados devido à subjetividade dos aspectos qualitativos (PARTOVI; ANANDARAJAN, 2002). Entretanto, isso pode ser amenizado ao se verificar a consistência das matrizes de julgamento.

2.3. Aplicações do AHP em problemas de ordem ambiental e de sustentabilidade

Buscar-se-á neste tópico levantar o que se apresenta na literatura acerca da aplicação do método AHP como forma de apoio à decisão em questões ambientais. Além disso, tendo já explanado a respeito da conceituação da ACV e da metodologia multicritério, será abordada a aplicação conjunta dos dois métodos.

Vale ressaltar que os métodos de análise multicritério, pela sua ampla aplicabilidade e adequabilidade também podem ser utilizados no tratamento de questões mais abrangentes ou anteriores ao desenvolvimento de uma ACV. Tôsto e Pereira (2011), por exemplo, trazem que o uso da análise multicritério pode se constituir em uma ferramenta útil para a definição de índice de sustentabilidade ambiental. O objetivo dos autores foi elaborar índices de sustentabilidade ambiental para a cultura da cana-de-açúcar, em dois sistemas de manejo: colheita mecanizada e colheita com auxílio da queimada. Eles utilizaram a análise multicritério de apoio à decisão como fundamento de análise, e mostraram que o índice de sustentabilidade ambiental da cana-de-

açúcar mecanizada foi aproximadamente 50% superior ao encontrado para a cana-de-açúcar queimada.

Silva, Cândido e Martins (2009) realizaram um trabalho que consistiu em elaborar um método de construção do Índice de Desenvolvimento Local Sustentável (IDLS), validado por atores locais, a fim de sistematizar informações necessárias para a implementação de políticas e ações capazes de gerar o desenvolvimento de forma sustentável. Para tanto, a metodologia proposta pelos autores procura identificar o nível de sustentabilidade municipal através de um conjunto de seis dimensões: social, demográfica, econômica, político-institucional, ambiental e cultural relacionadas a várias variáveis, que elencadas a cada uma das dimensões, compõem os parâmetros para o cálculo do índice de sustentabilidade, que por sua vez, é realizado mediante aplicação do método AHP, de modo que são comparadas e valoradas as dimensões e as variáveis.

Aliado a isso, Pompermayer (2003) traz que as técnicas multicriteriais têm se revelado particularmente importantes na consideração de questões de interesse público, como sócio-ambientais, ou sócio-econômicos. Isso porque a análise pode consistir na otimização de vários aspectos e interesses de diferentes grupos, cada um com objetivos e valores próprios, freqüentemente conflitantes.

Em seu estudo, Pompermayer (2003) formulou um procedimento multicritério como instrumento de auxílio à tomada de decisão na gestão de recursos hídricos e assim, simulou seu uso em uma bacia hidrográfica. Ela destacou, ainda, a relevância da metodologia multicriterial no âmbito da sustentabilidade, uma vez que ao contrário da abordagem tradicional, que tende a levar em consideração apenas critérios econômicos e financeiros, pode-se considerar também aspectos sócio-econômicos e ambientais. Isso devido ao fato de que a análise multicriterial tem o caráter de avaliar e medir em diferentes escalas os vários atributos de comparação entre alternativas heterogêneas.

Outra aplicação do AHP aliada à ótica ambiental é a descrita por Han e Lu (2008), que desenvolveram um trabalho de avaliação da competitividade

ambiental de empresas têxteis da província de Hebei, na China. A configuração do AHP teve no primeiro nível a avaliação global de competitividade ambiental das empresas têxteis. No segundo nível constaram os principais fatores identificados para avaliar a competitividade ambiental das empresas têxteis, a saber, a tecnologia ambiental, a produção ambiental e o marketing ambiental, de modo que os demais níveis contiveram os atributos para avaliação da competitividade ambiental.

Moisa (2005), por sua vez, utilizou o AHP para estabelecer a potencialidade de geração de passivos ambientais em postos de serviço. O objetivo geral estipulado foi identificar a potencialidade que um determinado posto de serviço tinha para gerar passivos ambientais comparado com os demais. Inicialmente, os postos foram divididos em onze critérios de análise, os quais foram subdivididos em subcritérios e estes, por sua vez, foram divididos em elementos, originando a estrutura hierárquica para a análise do problema. Segundo a autora, os resultados obtidos comprovaram que a técnica permitiu ordenar e determinar o potencial gerador de passivos ambientais de postos de serviço visando o planejamento de ações preventivas.

Como aplicação da Análise Multicritério combinada à Avaliação do Ciclo de Vida, Souza, Mendonça e Valle (2012) compararam duas opções para o reaproveitamento de óleo vegetal usado coletado de hotéis e restaurantes em Copacabana (a saber, produção de biodiesel ou produção de sabão) a fim de determinar qual das duas é a melhor do ponto de vista ambiental. Para tanto, buscaram estudar como os impactos resultantes podem ser provenientes de diversas categorias diferentes (potencial de aquecimento global, acidificação, eutrofização, depleção abiótica, ecotoxicidade terrestre, toxicidade humana e formação de foto oxidantes) que agem com intensidades diferentes, o que tornou necessária a conjugação da ACV com um método de Apoio Multicritério à Decisão, no caso, o AHP. Assim, as intensidades de importância, na escala usual definida pelo AHP, foram atribuídas de acordo com o resultado da ACV. Na análise, os pesos dos critérios levaram em conta:

a. A relevância do impacto para o Estado do Rio de Janeiro (eutrofização e toxicidade humana);

b. A relevância do impacto no ambiente global (aquecimento global e formação de foto oxidantes).

Frente a isso, é interessante destacar que, segundo Hussein (2004), uma vez que na Avaliação do Ciclo de Vida tem sofrido constantes críticas pelo consenso na literatura de que sempre haverá um componente de subjetividade nas análises, e, além disso, considerando que imperiosamente, devido a obstáculos técnicos, se faz presente em estudos de ACV julgamentos baseados em aspectos qualitativos, tais análises devem ser realizadas dentro de um teor técnico requerido, de forma que a Análise Multicritério em muito pode beneficiar neste caso.

Uma proposta semelhante à de Souza, Mendonça e Valle (2012) para utilização do método multicritério na ACV de modo a colaborar no aumento da eficácia da análise é trazida por Ferreira (2004). A sugestão consiste na utilização do método na etapa de Ponderação da ACV, que, dentro da fase de Avaliação de Impacto, é um elemento opcional no qual são atribuídos pesos ou valores relativos às diferentes categorias de impacto baseado na sua importância ou relevância percebida, de acordo com os seguintes procedimentos possíveis:

- Converter os resultados do indicador ou resultados normalizados com fatores de peso selecionados; e,
- Possivelmente agregar estes resultados de indicador convertidos ou resultados normalizados ao longo das categorias de impacto.

Assim, a ponderação pode se tornar um processo mais racional e explícito se forem utilizadas metodologias da teoria de decisão, como por exemplo, análise multicritério, ou a metodologia AHP (FERREIRA, 2004).

Ruy e Alliprandini (2010), em seu trabalho onde buscaram encontrar diversos tipos de métodos que se baseiam na ACV, destacam que um dos métodos de análise multicritério mais relevantes para a ACV é o Método de Análise Hierárquica (AHP) e descrevem o procedimento de aplicação que encontraram em sua pesquisa a seguinte forma (2010, p. 7):

Basicamente foi montada uma hierarquia, onde o nível inferior eram as alternativas consideradas, o nível intermediário eram os critérios ambientais pelos quais os méritos das alternativas foram julgados e o topo da hierarquia era o objetivo da análise. As alternativas foram comparadas umas contra as outras, aos pares, com relação aos critérios. Os critérios também foram comparados aos pares com relação ao objetivo, utilizando-se uma escala numérica. A partir de um procedimento algébrico, a importância relativa das alternativas para a satisfação do objetivo foi derivada.

Eagan e Weinberg (1999) demonstram a utilidade do AHP na Avaliação do Ciclo de Vida ao aplicá-lo na comparação de dois processos de anodização do alumínio. Os autores destacam que uma das vantagens de se utilizar o AHP na Avaliação do Ciclo de Vida é a flexibilidade que ele permite ao estabelecer valores relativos (pesos) a cada categoria de impacto analisado quando se comparam duas ou mais alternativas. Para realizar sua análise, foi determinado primeiramente o objetivo, que consistia na determinação do processo que menos impactasse o meio ambiente. Em seguida, foram escolhidos seis fatores para compor o segundo nível da estrutura do AHP, a saber:

- a. Infraestrutura do Processo;
- b. Pré-processo de fabricação;
- c. O processo sob análise;
- d. O pós-processo;
- e. Os limites do processo;
- f. Ciclo de Vida do Produto.

No terceiro nível, foram colocadas as categorias de impacto ambiental consideradas, no caso:

- a. Materiais não perigosos;
- b. Materiais perigosos;
- c. Energia;
- d. Resíduos Sólidos;
- e. Efluentes Líquidos;
- f. Efluentes gasosos.

E por fim, no último nível, foram considerados os dois processos em análise, de modo que as comparações par a par foram realizadas em cada nível baseando-se na escala de comparação de 1 a 9.

Verifica-se nesta aplicação, que o AHP suportou a fase de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida, e realizou isso de forma alinhada com a análise de inventário e com a definição do escopo, uma vez que a realização das comparações par a par foi pautada nos dados levantados e categorias de impacto definidas.

Henson, Culaba e Mendoza (2002) utilizaram o AHP e a ACV para avaliar a performance ambiental de quatro opções de melhoria na fabricação de papel e celulose. A utilização do AHP se deu na fase da avaliação de impacto, e para isso, eles consideram os dados da análise de inventário realizada anteriormente³. Na análise, foram consideradas todas as etapas do processo de fabricação, e sete fatores de impacto foram determinados para compor a estrutura hierárquica do AHP que realizaria a análise das quatro opções de melhoria no processo. Ao final, os autores concluíram que o estudo demonstrou que a integração das ferramentas AHP e ACV fornece estrutura e metodologia suficiente para a análise de impacto e a tomada de decisão ambiental.

Ong, Koh e Nee (2001), por outro lado, utilizaram o método AHP no que chamaram de “Pré-Avaliação do Ciclo de Vida” para determinar um índice ambiental de cada um dos produtos que se propuseram de analisar, no caso um produto de poliestireno e um de porcelana. Para isso, eles levantaram na literatura as emissões causadas no processo de fabricação de cada um dos produtos, e chegaram a uma lista de trinta substâncias. Assim, essas substâncias foram comparadas entre si com base no impacto ambiental que proporcionam, e em seguida, os dois produtos foram analisados com base nos dados que foram levantados, ou seja, considerando a quantidade de emissão de cada substância. Dessa forma, foram comparados dois produtos utilizando-se da metodologia do AHP sem precisar de uma Avaliação do Ciclo de Vida

³ Culaba, A. 1996. A methodology for the life cycle and sustainability analysis of manufacturing processes. Ph.D. Dissertation, University of Portsmouth, England.

completa. No entanto, os resultados obtidos podem servir como guias iniciais para uma ACV completa desses produtos, o que justifica o termo “Pré-Avaliação do Ciclo de Vida” utilizado.

Além da abordagem tradicional do método AHP, também foram encontradas aplicações diferenciadas em conjunto com a Avaliação do Ciclo de Vida. Kang e Li (2010), por exemplo, utilizaram da abordagem *Fuzzy* do AHP em conjunto com a ACV para determinar o grau de “Racionalidade Verde” de embalagens degradáveis. Por outro lado, Ennaceur, Elouedi e Lefevre (2011) aplicaram com a ACV a metodologia denominada *Belief AHP*. *Fuzzy AHP* se trata de uma metodologia que envolve a mesma estrutura hierárquica do AHP tradicional, no entanto, utiliza da lógica matemática *Fuzzy* (difusa) na atribuição dos valores. Com isso, segundo os autores, são quantificados os índices qualitativos considerando um tratamento não-dimensional dos mesmos. Por sua vez, a metodologia *Belief AHP* procura expressar informações incompletas e imprecisas sobre grupos de alternativas em vez das individuais. Mas, vale ressaltar, ambas as abordagens seguem a filosofia de análise do AHP tradicional.

Assim, verifica-se a aplicabilidade da análise multicritério, e de modo particular, do Método de Análise Hierárquica (AHP) na utilização conjunta com a Avaliação do Ciclo de Vida como forma de contribuir para análise de impacto ambiental de produtos e processos.

3. DISCUSSÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO AHP NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Com base no levantamento realizado na revisão bibliográfica, que identificou uma série de trabalhos onde se faz referência à aplicação combinada do AHP e da ACV, e considerando também a referência normativa, é possível traçar um paralelo teórico visando relacionar as diferentes abordagens apresentadas.

3.1. Considerações Gerais

Em primeiro lugar, é interessante destacar que cada sistema a ser analisado apresenta características particulares, tais como heterogeneidades dos recursos em análise e também os resultados esperados, que em conjunto determinam as considerações que devem ser feitas na metodologia a fim de que se consiga examinar de forma assertiva os elementos envolvidos.

Muitas vezes, mais que a consideração apenas dos aspectos ambientais na Avaliação do Ciclo de Vida, é interessante estimar e considerar os elementos sociais e econômicos como forma de incorporar a visão sustentável ao sistema. Dessa forma, é possível trazer essas considerações tanto em âmbito estratégico como no nível de processos produtivos, dependendo da conjuntura de elementos e objetivos do problema. E a análise multicritério é uma forma de investigação operativa na qual as diferentes visões podem ser analisadas de forma conjunta, tanto em nível estratégico, onde a análise multicritério se apresenta como uma das mais relevantes, como em nível operacional, que, de modo combinado à ACV, torna-se uma aplicação não apenas viável, mas muito promissora no que se refere a problemas de sustentabilidade organizacional (CLÍMACO; VALLE, 2012).

Quanto à aplicabilidade estratégica do AHP, ou mesmo ao se tratar de problemas mais abrangentes, ou de ordem sustentável, que não considera apenas a ótica ambiental, pode ser considerada de modo anterior à ACV, com vistas à estruturação adequada do problema, de modo a determinar as melhores considerações a serem levadas para aplicação na ACV, que realizada posteriormente, viria a detalhar os aspectos ambientais relacionados.

O AHP pode ainda ser aplicado como apoio à ACV sempre que houver necessidade de realizar uma escolha pautada em critérios definidos. Isso se deve à versatilidade do método AHP em possibilitar apoio na tomada de decisão através de um procedimento matemático relativamente simples, podendo auxiliar na escolha de parâmetros, critérios ou componentes relacionados de modo preliminar à ACV, como por exemplo na escolha de problemas a serem estudados e impactos a serem avaliados, ou mesmo no decorrer do desenvolvimento da ACV, que será discutido com mais profundidade abaixo.

Tratando-se da aplicação do AHP como método de análise incorporado à ACV, verifica-se que nas quatro fases da ACV (Definição do Objetivo e Escopo; Análise do Inventário; Avaliação de Impacto; e Interpretação) existem oportunidades para envolvimento do AHP. Assim, a seguir será passado a tratar de cada uma dessas oportunidades buscando-se exemplificar as interfaces do AHP com a ACV.

3.2. Definição do Objetivo e Escopo

A fase de Definição do Objetivo e Escopo, onde se determina porque a ACV está sendo conduzida e se descreve o sistema estudado, traz como necessário a determinação de categorias de dados a serem estudadas, a fim de definir quais elementos de entrada e saída do sistema serão considerados.

Em outras palavras, na definição do escopo, um conjunto inicial de entradas e saídas é selecionado para o inventário, uma vez que não é prático modelar cada elemento do sistema de produto. Trata-se de um processo para identificar quais entradas e saídas são recomendáveis de rastrear ao meio ambiente, de modo que deve ser claramente descritos os critérios considerados (ISO 14040:2006).

Na prática da ACV vários critérios podem ser usados para esse fim, incluindo os mais expressivos (ISO 14040:2006):

- a. Massa;
- b. Energia;
- c. Relevância ambiental.

Assim, estes critérios podem ser combinados em procedimentos para a distribuição de pesos (grau de importância) sobre os elementos do sistema, o que abriria espaço para contribuição do AHP.

No caso da consideração de muitos diferentes insumos ou saídas do sistema, o AHP pode se tornar inviável visto o grande número de comparações que seriam necessárias. Entretanto, Oliveira *et al.* (2011) apresentam uma metodologia que adapta a aplicação do AHP a um conjunto de elementos em análise maior que o possível apenas com o AHP. Na metodologia, os autores propõem a aplicação do AHP com a análise comparativa par a par dos critérios, gerando um autovetor com índices de importância para cada critério. Em seguida, esses índices são aplicados na ponderação dos dados de cada item em análise em cada critério, trazendo ao final um valor relativo para cada item, o que garantiria, no caso da ACV, uma boa análise comparativa sobre os insumos ou saídas do sistema.

Além disso, para compreender a confiabilidade dos resultados do estudo, descrições da qualidade dos dados são importantes. É recomendado que a qualidade dos dados seja caracterizada tanto por meio de aspectos quantitativos e qualitativos, como também pelos próprios métodos usados para coleta e integração (ISO 14040:2006).

Para tanto, a norma ISO 14040:2006 traz que é conveniente que sejam incluídos requisitos da qualidade em um parâmetro de cobertura tecnológica, que consiste na combinação de tecnologias tais como processos existentes, melhor tecnologia disponível ou pior unidade de operação. Consequentemente, fatores subjetivos e também qualitativos estão envolvidos nessa análise, o que dá margens à aplicação do AHP para a determinação de um índice de cobertura tecnológica.

A norma traz ainda que todos os estudos devem considerar como requisitos adicionais de qualidade a representatividade, a consistência e a reprodutibilidade dos dados. Por representatividade se entende a avaliação qualitativa do grau em que o conjunto de dados reflete o verdadeiro universo de interesse; por outro lado, a consistência avalia qualitativamente o quão uniforme é a aplicação da metodologia aos vários componentes da análise; e

por fim, a reprodutibilidade avalia de modo qualitativo a extensão em que a informação sobre a metodologia e os valores de dados permite que um executante independente reproduza os resultados relatados. Nestes três casos, portanto, se verificam possibilidades de aplicação do método AHP como forma de gerar comparação de alternativas qualitativas frente aos requisitos impostos.

3.3. Análise de Inventário

A fase de análise de inventário compreende as ações de coleta e processamento de dados com o intuito de possibilitar a determinação de fluxos e liberações do sistema. Para tanto, são envolvidos procedimentos de cálculo e de alocação de fluxos e liberações.

Como os dados coletados podem estar apenas em caráter qualitativo, o método AHP pode vir a auxiliar o executor em uma análise de sensibilidade desses dados, que é importante para determinar sua significância mediante a verificação dos critérios já determinados na fase anterior para inclusão de entradas e saídas do sistema, concluindo por fim, um refinamento das fronteiras do sistema.

Mesmo para dados quantitativos, uma validação deles deve ser conduzida, e uma forma de se realizar isso é através de análises comparativas de fatores de emissão. Para tanto, a aplicação do método AHP em muito pode auxiliar, uma vez que permite a realização de análises comparativas.

3.4. Avaliação de Impacto

A fase de avaliação de impacto tem por objetivo avaliar o sistema de produto sob uma perspectiva ambiental, usando categorias de impacto e os indicadores de categoria associados aos resultados da análise de inventário.

Como característica-chave da avaliação de impacto se destaca o fato de que a fase correlaciona os resultados do inventário às categorias de impacto. Assim, para cada categoria é selecionado um indicador e o resultado dele é calculado, tendo em vista que a avaliação de impacto é uma abordagem relativa baseada em uma unidade funcional.

A avaliação de impacto é dividida em duas partes, uma com elementos obrigatórios, cuja saída deve ser o conjunto de resultados dos indicadores para as diferentes categorias de impacto, conforme explanado no parágrafo anterior; e outra com elementos opcionais, a saber:

- a. Normalização, onde se realiza o cálculo da magnitude dos resultados do indicador de categoria em relação a informações de referência;
- b. Agrupamento, onde as categorias de impacto são ordenadas em uma base nominal e classificadas de acordo com uma dada hierarquia;
- c. Ponderação, onde há o processo de conversão dos resultados dos indicadores de diferentes categorias de impacto através do uso de fatores numéricos.

Além disso, é necessário destacar que os elementos “Agrupamento” e “Ponderação” são baseados em escolhas de valores, ou seja, utiliza de valores e subjetividades não baseados nas ciências naturais, o que dá margem para a aplicação do método AHP como forma de classificar as categorias de impacto e realizar a ponderação dos resultados dos indicadores.

Com o método AHP, é possível realizar o agrupamento das categorias de impacto, ou seja, correlacioná-las como critérios de análise do AHP, o que gera um fator de peso atribuído a cada categoria, permitindo, em seguida, a ponderação dos indicadores de categoria, que são, na ótica do AHP, as alternativas.

Nisto consiste o principal ponto de aplicação do AHP na ACV levantado na revisão bibliográfica: utilizá-lo como ferramenta metodológica para amparar a Avaliação de Impacto na ACV. Verifica-se que foi trazido por Valt (2004), que exprimiu o AHP como possível de aplicação nesta fase, tal como os métodos Eco-Indicador 95 e Eco-Indicador 99, enunciado por Ferreira (2004) como forma de realizar o agrupamento e a ponderação como um processo mais racional e explícito. Além disso, a metodologia foi aplicada nos trabalhos de Souza, Mendonça e Valle (2012), que agruparam as categorias de impacto e as ponderaram para comparar duas opções de reaproveitamento de óleo que eles se dispuseram a estudar. Também se verifica essa aplicação nos trabalhos de Eagan e Weinberg (1999), Henson, Culaba e Mendoza (2002), Ong, Koh e Nee

(2001) e também no de Qian, Huang e Yan (2007), que foi o exemplo prático demonstrado no capítulo anterior.

3.5. Interpretação

Os objetivos da fase de interpretação do ciclo de vida são analisar os resultados, chegar a conclusões, explicar limitações, e oferecer recomendações reportando os resultados. Para tanto, a interpretação deve se valer primeiramente da identificação de elementos significativos para análise, ou seja, uma vez estabelecidos os resultados das fases precedentes, a significância desses resultados devem ser então determinados.

Vale destacar que podem representar questões significativas: as categorias de dados do inventário; as categorias de impacto; e as contribuições essenciais dos estágios do ciclo de vida para os resultados da análise de inventário e da análise de impacto. Quanto à determinação da relevância das categorias de dados, existem diversos métodos possíveis para aplicação, tais como a análise de contribuição, a análise de dominância, a análise de influência e a avaliação de anomalias.

Por fim, é verificado que existe a necessidade de classificar categorias de dados ou de impactos, de modo que a metodologia AHP poderia auxiliar na classificação de dados qualitativos, servindo como apoio às análises. Contudo, não foram encontradas publicações nesse sentido.

4. SÍNTESE DOS PRINCIPAIS PONTOS DA APLICAÇÃO AHP-ACV

O capítulo anterior trouxe de modo descritivo uma discussão, com base no referencial bibliográfico e normativo, do envolvimento metodológico das ferramentas AHP e ACV. Este capítulo, por sua vez, tem o objetivo de sintetizar as informações que foram sendo trazidas neste trabalho, a fim de finalizar este estudo promovendo a coesão dos assuntos tratados de modo convergente com a pergunta geradora do problema de pesquisa.

Ressalta-se que nas quatro fases da ACV (Declaração do Objetivo e Escopo; Análise de Inventário; Avaliação de Impacto; Interpretação) foram encontradas a possibilidade de atribuição de pesos em critérios considerados nas análises de modo a se extrair uma ponderação dos diferentes fatores envolvidos no problema. Mais que isso, pelo fato da ACV possibilitar a utilização de dados quantitativos, e muitas vezes baseados em escolha de valores, ou seja, que considera a subjetividade do avaliador do ciclo de vida, se torna possível a consideração de múltiplos critérios.

Outro ponto importante de ser destacado é o fato de que a pesquisa bibliográfica levantou diversas aplicações do AHP relacionadas a subsídios metodológicos para análises de desenvolvimento sustentável e à determinação de índices de sustentabilidade ambiental, o que mostra que, atualmente, os pesquisadores, em centros de pesquisa nacionais e internacionais, têm buscado a utilização do método AHP como ferramenta de auxílio à tomada de decisão ambiental. A principal justificativa de aplicação, por parte desses autores, é o fato de que o método AHP possibilita de forma simples a realização de comparações de parâmetros muito distintos entre si, de modo a confrontá-los para a realização de análises comparativas, ou combiná-los de forma a determinar um índice, ou parâmetro indicador do sistema como um todo, tendo em vista que as análises ambientais, na maioria dos casos, leva em consideração muitos atributos e variáveis envolvidas, o que as torna quase sempre muito complexas de serem tratadas.

Ainda sobre o levantamento bibliográfico, foram encontrados diversos trabalhos que aplicavam, ou ao menos faziam menção à aplicação do método AHP na ACV. Ressalta-se que não foi encontrado nenhum estudo com descrição clara de boas práticas para aplicação do AHP em conjunto com a ACV, ou que tivesse por objetivo o levantamento de um referencial teórico para esse escopo metodológico, tampouco um modelo de referência com uma proposta de aplicação passo a passo, no entanto, a revisão bibliográfica conseguiu levantar um acervo informacional que possibilitou a discussão da aplicabilidade do AHP na ACV, conforme já descrito.

Não se pode deixar de mencionar também, que para a referida discussão, a consulta constante à norma ISO 14040:2006 (*Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*) foi fundamental, visto que traz referências claras de pontos na ACV onde é possível a consideração de múltiplos critérios, ou que é necessária a escolha de valores ou de variáveis com base em critérios pré-definidos. Dessa forma, considerando o referencial teórico descrito, será apresentado abaixo um quadro resumo com os principais pontos da aplicação AHP-ACV. Não se trata de um modelo de referência, uma vez que, para tanto, é necessário um estudo mais completo e avançado da metodologia e das considerações pessoais dos avaliadores do ciclo de vida, mas sim um diagrama que mostra e sintetiza os pontos-chave descritos na teorização.

Estratégia / Pré-ACV	Declaração Escopo e Objetivo	Análise do Inventário	Avaliação de Impacto	Interpretação
<ul style="list-style-type: none"> • Escolha de problemas a serem tratados e impactos a serem avaliados • Estimar e considerar elementos sociais e econômicos além dos ambientais • Determinação de Índice de Sustentabilidade Ambiental <p>AHP como colaborador de decisão estratégica</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Objetivo • Função, unidade funcional e fluxo de referência • Fronteiras do Sistema • Descrição de Categoria de dados • Critérios para inclusão de entradas e saídas • Requisitos de Qualidade dos dados • Análise Crítica 	<ul style="list-style-type: none"> • Preparação para coleta de dados • Coleta de dados • Validação dos dados • Relacionar dados ao processo elementar • Relacionar dados à unidade funcional e agregação de dados • Refinamento das fronteiras do sistema • Alocação de fluxos e liberações 	<ul style="list-style-type: none"> • Seleção das categorias de impacto, dos indicadores de categoria e dos modelos de caracterização • Classificação • Caracterização • Normalização • Agrupamento • Ponderação • Análise da qualidade dos dados <p>AHP agrupa as categorias e pondera os indicadores normalizados</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Identificação das questões significativas • Avaliação <p>AHP auxilia na classificação de dados servindo de apoio à análise</p>

Definições do AHP para aplicação → **Aplicação!**

Figura 5: Quadro resumo dos principais pontos de aplicação do AHP na ACV. Observação: os pontos de aplicação são os em destaque.

Dentro das aplicações do AHP como forma de colaborar na tomada de decisão de forma envolvida às etapas da ACV, as questões encontradas na revisão bibliográfica com maior destaque estão presentes nas etapas de Declaração de Objetivo e Escopo e Avaliação de Impacto. Na etapa de Análise de Inventário, a aplicação sugerida do AHP está no sentido de possibilitar, se necessária, uma validação dos dados a fim de se refinar as fronteiras do sistema, o que depende muito da configuração e objetivo particular de cada estudo. Já na fase de interpretação, a metodologia AHP pode auxiliar na identificação de questões significativas, considerando a classificação de dados quantitativos e/ou qualitativos, o que, tal como na etapa de análise de inventário, é dependente da situação particular do problema em estudo.

Assim sendo, as aplicações do AHP nas fases de Declaração do Objetivo e Escopo e Avaliação de Impacto são mais claras no sentido de que podem ser estruturadas em qualquer proposta de avaliação do ciclo de vida, desde que haja interesse do avaliador. E para ilustrar as referidas aplicações, já detalhadas no capítulo anterior, seguem abaixo dois quadros onde se encontram os resumos dos possíveis empregos do AHP, respectivamente, na Declaração de Objetivo e Escopo e na Avaliação de Impacto.

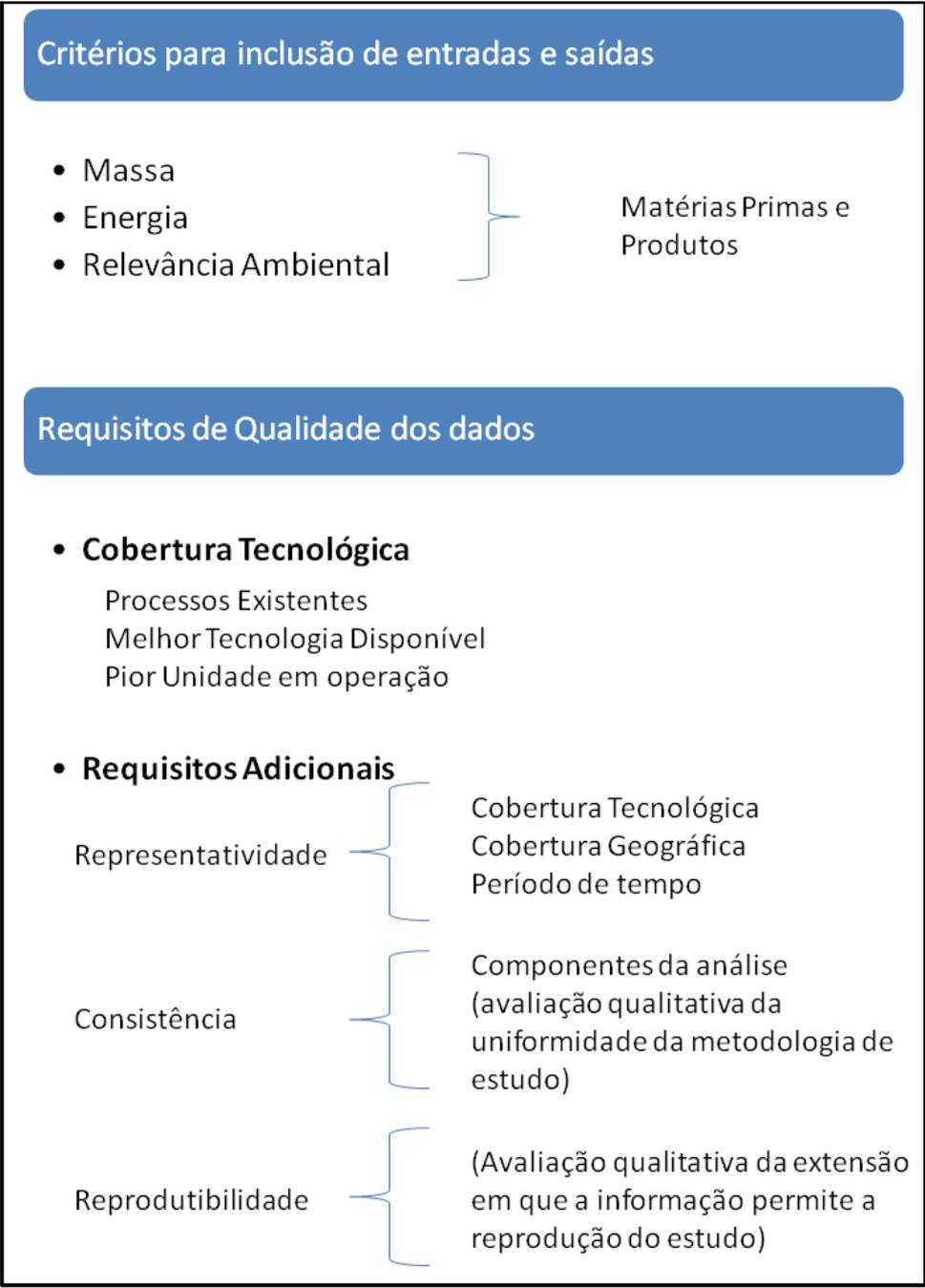


Figura 6: Quadro resumo dos pontos de aplicação do AHP na etapa de Definição de Objetivo e Escopo da Avaliação do Ciclo de Vida.

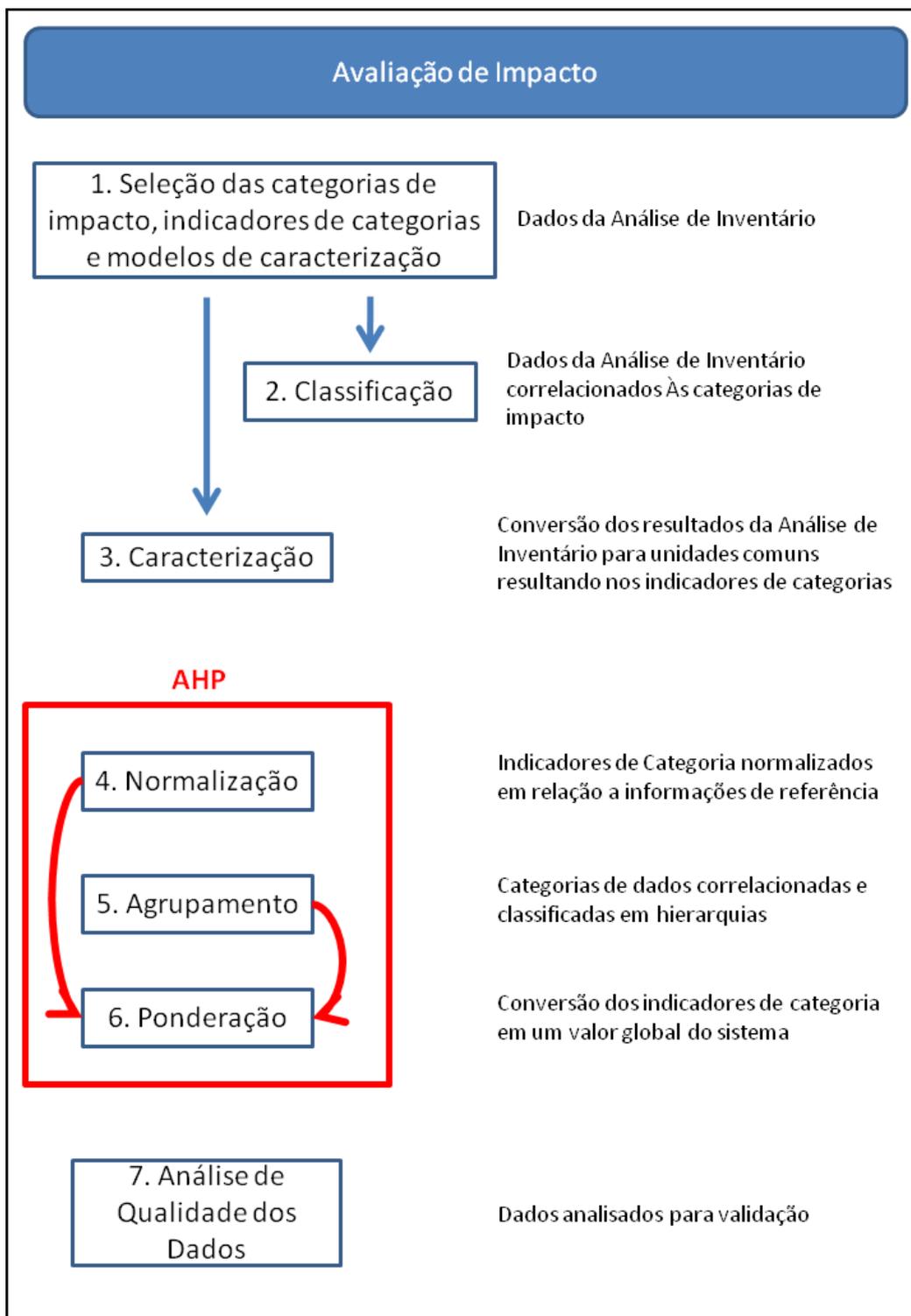


Figura 7: Quadro resumo dos pontos de aplicação do AHP na etapa de Avaliação de Impacto da Avaliação do Ciclo de Vida. À direita, destaque para a descrição das etapas descritas à esquerda.

5. APLICAÇÃO EXPERIMENTAL

O intuito deste capítulo é demonstrar um exemplo prático da aplicação do método AHP na Avaliação do Ciclo de Vida. Procurou-se escolher uma aplicação que representasse com um nível de detalhe suficiente a abordagem metodológica que está sendo estudada, a fim de que ficasse bem elucidada.

Tendo em vista a discussão apresentada no capítulo três, bem como a síntese dos principais pontos de aplicação do método AHP na técnica da ACV (capítulo quatro), foi demonstrado que em todas as fases da ACV é possível a utilização do AHP. No entanto, a aplicação mais recorrente levantada na bibliografia se refere à fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida. Dessa forma, um experimento dessa natureza foi escolhido como forma de demonstrar o passo a passo da execução metodológica.

Para tanto, será apresentado um estudo de caso do trabalho de Qian, Huang e Yan (2007), onde procuraram integrar em uma única análise a avaliação das performances ambiental e econômica de dois produtos químicos (NF_3 e C_2F_6) empregados para realizar a limpeza de câmaras utilizadas na produção de circuitos integrados. Essas câmaras ficam cobertas por uma fina camada de material que é depositado durante o processo que envolve um processo químico avançado de plasma, de modo que, de tempos em tempos, é necessário que se faça a limpeza desses sedimentos nas câmaras.

Os principais produtos químicos envolvidos nesse processo de limpeza são NF_3 e C_2F_6 , e por isso os autores se propuseram a avaliar qual das duas substâncias é mais indicada para a realização do processo. Para isso, buscaram integrar as metodologias da Avaliação do Ciclo de Vida e do método de análise multicritério AHP, de modo que a decisão fosse pautada em dois âmbitos: o ambiental e o econômico.

Tendo anteriormente definido o escopo da ACV e realizado a análise de inventário⁴, para a avaliação de impacto foi montada a estrutura hierárquica do método AHP tendo no primeiro nível, como objetivo, a Avaliação do Ciclo de

⁴ Yan, Z.G., "Integrated life cycle assessment of environmental and economical performance of chemical products", Ph D. thesis, South China University of Technology (2005).

Vida; no segundo nível, ficaram os dois âmbitos determinados na análise (econômico e ambiental); seguidos dos subcritérios que representavam cada eixo de análise:

- no eixo econômico (E): matéria-prima (E1), a produção (E2), uso (E3) e abandono (E4) – baseados, como pode se observar, nas fases do ciclo de vida do produto, o que dá margem aos autores chamarem este critério de “Custos do Ciclo de Vida”;
- no eixo ambiental (A), algumas categorias de impacto ambiental consideradas significativas para o problema em estudo, a saber: potencial de aquecimento global (A1); potencial de destruição da camada de ozônio (A2); potencial de criação de oxidação fotoquímica (A3); potencial de acidificação (A4); potencial de risco de câncer (A5); potencial de outras patologias que não câncer (A6); e, potencial de ecotoxicidade (A7).

Por fim, no último nível da estrutura hierárquica, ficaram as alternativas em análise, no caso NF_3 e C_2F_6 . A hierarquia completa pode ser verificada na figura abaixo.

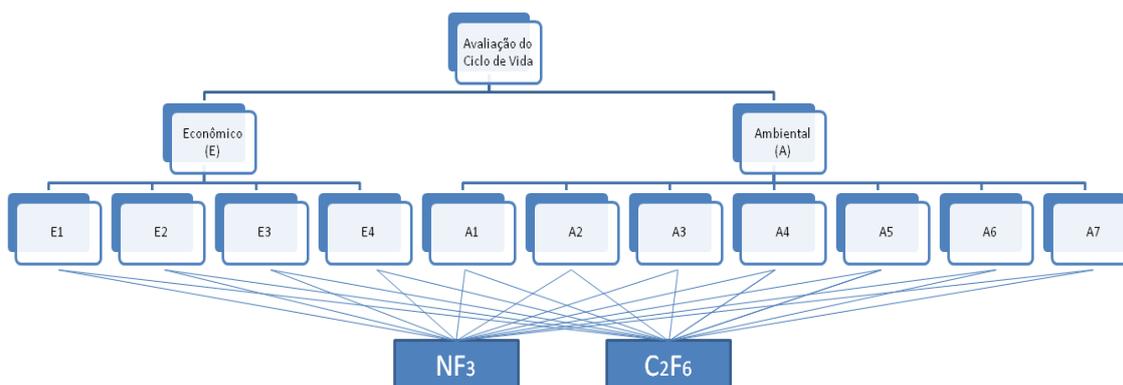


Figura 8: Hierarquia definida para aplicação do método AHP. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).

Para simplificar o estudo, os autores fizeram as seguintes considerações:

- a. o tratamento de resíduos na fase de abandono é integrado à fase de uso;
- b. os custos na fase de abandono serão omitidos;

c. a função de referência é a produção de $1.000 \text{ kg} \times h^{-1}$ de NF_3 e C_2F_6 .

A análise de inventário, que foi montada a partir de dados estatísticos industriais e governamentais, permitiu o resumo dos dados de acordo com a função de referência. Essas informações, que são base de entrada para a avaliação do impacto, que será realizada com o método AHP na estrutura descrita acima, estão resumidas nas tabelas abaixo.

Tabela 5: Custo do Ciclo de Vida para limpeza de duas câmaras (Dólares). Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).

	E1	E2	E3	E4
NF_3	12000	6800	4800	-
C_2F_6	8000	3500	2900	-

Tabela 6: Potencial de Impacto Ambiental para a limpeza de duas câmaras. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
NF_3	243150	52	2984	0	8263	1472188	2383
C_2F_6	79157577	7349	6103	0	21803	548490	47483

Com os dados em mãos, passou-se para a aplicação do método AHP. O procedimento metodológico completo já foi descrito na seção 2.2 deste trabalho. Vale ressaltar, que para as comparações par a par dos critérios, foi utilizada a escala de valores de 1 a 9, conforme descrito na tabela 3. Além disso, o procedimento para verificação da consistência dos julgamentos também foi seguido conforme o procedimento descrito.

A primeira matriz de comparação foi montada para os subcritérios do item Custo do Ciclo de Vida. Os itens matéria-prima (E1) e produção (E2) foram classificados com ordem de três vezes mais importância que os outros dois, uso (E3) e abandono (E4), resultando na seguinte tabela:

Tabela 7: Matriz de Comparação par a par dos critérios envolvidos com o Custo do Ciclo de Vida.
 Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).

Custo do Ciclo de Vida	E1	E2	E3	E4	RW
E1	1	1	3	3	0,375
E2	1	1	3	3	0,375
E3	1/3	1/3	1	1	0,125
E4	1/3	1/3	1	1	0,125

Dessa forma, é possível visualizar que os subcritérios matéria-prima e produção apresentaram, de fato, no autovetor resultante, importância três vezes maior que os outros dois critérios.

Em seguida, foi realizada a comparação das categorias de impacto ambiental, ou seja, dos subcritérios envolvidos no enfoque ambiental. A matriz de comparação, com o autovetor resultante segue abaixo.

Tabela 8: Matriz de Comparação par a par dos critérios envolvidos com o eixo ambiental da análise. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	RW
A1	1	1	1	3	1/3	1/3	1/2	0,086
A2	1	1	1	3	1/3	1/3	1/2	0,086
A3	1	1	1	3	1/3	1/3	1/2	0,086
A4	1/3	1/3	1/3	1	1/6	1/6	1/4	0,043
A5	3	3	3	6	1	3	2	0,269
A6	3	3	3	6	1	1	2	0,269
A7	2	2	2	4	1/2	1/2	1	0,160

Como prevê o método, na sequência foram realizadas as comparações das alternativas para cada critério. Serviu de subsídio para a atribuição dos valores os dados extraídos da análise de inventário, que constam nas tabelas 5 e 6. Abaixo seguem as matrizes de comparação par a par das alternativas, juntamente com os autovetores calculados, respectivamente para o Custo do Ciclo de Vida, e para as categorias de impacto.

Tabela 9: Matrizes de comparação das alternativas no âmbito do Custo do Ciclo de Vida. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).

Estágio		NF ₃	C ₂ F ₆	RW
E1	NF ₃	1	1,5	0,6
	C ₂ F ₆	0,667	1	0,4
E2	NF ₃	1	2,057	0,67
	C ₂ F ₆	0,486	1	0,34
E3	NF ₃	1	1,533	0,64
	C ₂ F ₆	0,652	1	0,36
E4	NF ₃	1	1	0,5
	C ₂ F ₆	1	1	0,5

Tabela 10: Matrizes de Comparação par a par das alternativas no âmbito das categorias de impacto ambiental. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).

Categoria de Impacto		NF ₃	C ₂ F ₆	RW
A1	NF ₃	1	0,031	0,030
	C ₂ F ₆	32,25	1	0,970
A2	NF ₃	1	0,007	0,007
	C ₂ F ₆	142,8	1	0,993
A3	NF ₃	1	0,489	0,328
	C ₂ F ₆	2,045	1	0,672
A4	NF ₄	1	1	0,500
	C ₂ F ₇	1	1	0,500
A5	NF ₅	1	0,378	0,275
	C ₂ F ₈	2,646	1	0,725
A6	NF ₆	1	2,684	0,729
	C ₂ F ₉	0,373	1	0,271
A7	NF ₃	1	0,05	0,048
	C ₂ F ₆	19,93	1	0,952

Ao final, os autovetores resultantes das comparações dos critérios e das alternativas foram combinados conforme determina o método, o que resultou nos seguintes graus de importância para cada alternativa, nos respectivos eixos de análise:

Tabela 11: Resultado Final dos Índices para cada alternativa. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).

	Custo do Ciclo de Vida	Categorias de Impacto Ambiental
NF ₃	0,619	0,328
C ₂ F ₆	0,381	0,672

Assim, é possível verificar que o método resultou que o produto NF₃ é menos agressivo ao meio ambiente quando comparado ao C₂F₆. Entretanto, em termos da performance econômica, o C₂F₆ se apresenta mais competitivo pelo seu menor custo do ciclo de vida.

Para a tomada de decisão final, sobre qual produto escolher, é necessário realizar a ponderação dos âmbitos de análise, ou seja, mensurar quanto o Custo do Ciclo de Vida é mais importante (ou menos) que as categorias de impacto ambiental. Dessa forma, seriam gerados índices que combinariam os dois quesitos de forma a sustentar a decisão de qual produto é o mais vantajoso.

Um exercício proposto pelos autores é variar o grau de importância de cada quesito de modo a se visualizar o comportamento do resultado de ponderação dos fatores. Isso é possibilitado pela aplicação da equação abaixo a cada um dos dois produtos analisados:

Equação 2: Índice de Integração. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).

$$i = x_1 \times y_1 + x_2 \times y_2$$

Onde, i representa o índice de integração da análise, ou seja, o grau de importância final calculado para cada produto; x_1 e x_2 o grau de importância respectivamente, do Custo do Ciclo de Vida, e das categorias de impacto ambiental, devendo a soma dos dois valores ser iguais a 1; e y_1 e y_2 os índices calculados pelo AHP (apresentados na tabela 11 acima).

Portanto, são montadas duas equações que representam o comportamento do índice de integração de cada produto ao se variar o grau de

importância dos dois critérios considerados. No gráfico abaixo é ilustrado esse comportamento:

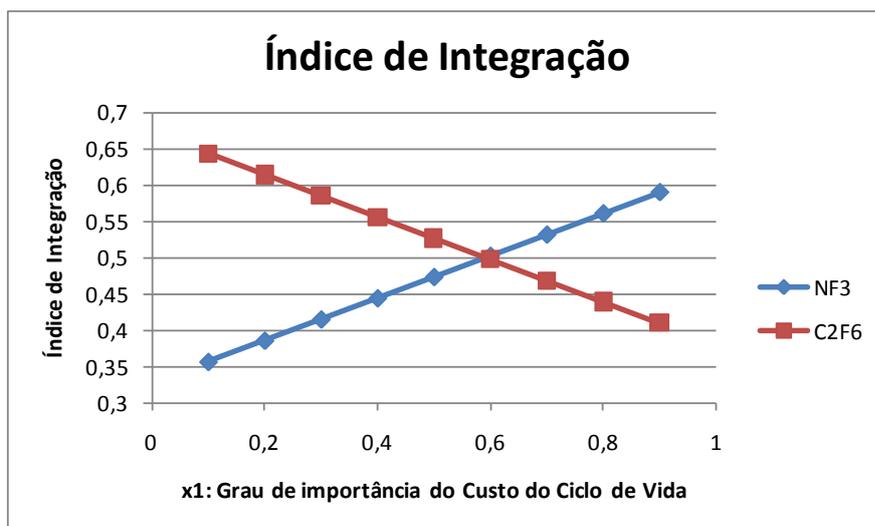


Gráfico 1: Índice de Integração do NF₃ e do C₂F₆ em função do grau de importância do critério Custo do Ciclo de Vida. Fonte: adaptado de Qian, Huang e Yan (2007).

Pode-se observar que, se o grau de importância do Custo do Ciclo de Vida for considerado menor que 0,6, o produto com melhor desempenho é o C₂F₆. No entanto, se a importância dada a esse critério for superior a 0,6, o produto NF₃ passa a ser o mais bem avaliado. Para um índice de 0,6, ambos os produtos possuem a mesma avaliação.

Dessa forma, fica elucidada uma aplicação do método AHP na fase de Avaliação de Impacto de uma ACV. Tratou-se de um exemplo muito rico, visto que, além de considerar os aspectos ambientais, também analisou quantitativamente o aspecto econômico. Se os autores tivessem considerado também aspectos sociais relacionados aos dois produtos químicos, sem dúvida a análise contemplaria um robusto estudo de determinação de índice de sustentabilidade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo concluídas as explicações às quais esta pesquisa procurou desenvolver, é possível remeter aos objetivos específicos traçados a fim de se concluir o trabalho de modo coeso. Além disso, procura-se finalizá-lo destacando as principais contribuições proporcionadas.

Vale lembrar, primeiramente, que o capítulo quatro procurou convergir o raciocínio acerca das informações levantadas de modo a responder as perguntas geradoras da pesquisa, o que gerou uma síntese dos principais pontos de aplicação AHP-ACV.

A respeito dos objetivos, pode-se concluir que a pesquisa conseguiu alcançá-los. No capítulo introdutório, foram explanadas as demandas ambientais que atualmente são colocadas aos avaliadores do ciclo de vida, como por exemplo, a necessidade de se considerar aspectos de sustentabilidade ambiental no desenvolvimento, processamento ou comercialização de produtos e serviços seja por exigência dos mercados, ou por exigência legal, como é o caso da recém aprovada política nacional dos resíduos sólidos.

Além disso, a revisão bibliográfica trouxe o levantamento de referenciais teóricos que apontam formas de aplicação conjunta dos métodos AHP e ACV, sendo esses apontamentos casos já realizados pelos autores estudados, ou considerações de ordem teórica, que dão margem para a geração de propostas de aplicação.

Com base nesses levantamentos, foi possível realizar o proposto estudo teórico de como conciliar de modo eficiente as técnicas ACV e AHP para auxiliar os avaliadores de ciclo de vida na tomada de decisão, o que satisfaz o último objetivo específico considerado. O referido estudo foi desenvolvido no capítulo três.

Como forma de elucidação da metodologia de utilização do método AHP na ACV, a aplicação trazida no capítulo cinco demonstrou o passo a passo do procedimento metodológico do AHP na fase de Avaliação de Impacto da ACV.

No entanto, não foram exemplificadas outras oportunidades de aplicação, como por exemplo, em outras fases da ACV, isso porque se preferiu priorizar a aplicação mais recorrente levantada na revisão bibliográfica, no caso, o uso do AHP na fase de Avaliação de Impacto.

O desenvolvimento do trabalho possibilitou também o processamento de conhecimento no que se refere à Avaliação do Ciclo de Vida, e de modo mais específico, ao uso de múltiplos critérios como forma de auxiliar a metodologia no processamento de dados, que muitas vezes são baseados em escolhas de valores, ou devem considerar aspectos quantitativos e qualitativos, possibilitando, assim, a validação da aplicabilidade do método AHP como auxiliador no processamento de dados antes e durante a avaliação do ciclo de vida. Anteriormente à ACV no que se refere à estruturação do problema, ou inclusive na análise de fatores que envolvem aspectos de sustentabilidade ambiental ou de âmbito estratégico, e durante a ACV, como já mostrado, em todas as suas etapas de desenvolvimento.

Considerando ainda as demandas crescentes no âmbito ambiental, foi possível mostrar que o tema da ACV é contemporâneo e pode significar um diferencial competitivo para empresas, instituições da sociedade civil ou órgãos governamentais. Isso se mostra também no fato de muitos autores e pesquisadores ambientais se apoiarem na ACV como metodologia para auxiliar na comparação de sistemas e produtos.

Ressalta-se, assim, a contribuição proporcionada pela pesquisa no que se refere ao entendimento das atuais demandas ambientais, e à evolução delas, que são as causas raízes das análises ambientais e do desenvolvimento de ferramentas e metodologias capazes de comparar e analisar produtos e sistemas.

Quanto ao método AHP, foi verificada uma ampla aplicação no que se refere a análises de problemas que envolvem a temática ambiental ou que procuram ter uma abordagem no âmbito da sustentabilidade, o que permite inferir que a escolha do AHP, assim como da ACV, como objeto de estudo nesta

pesquisa foi feliz, uma vez que ambas as metodologias, conforme já explorado, são formas legítimas de se tratar problemas de ordem ambiental.

Vale ressaltar também que a pesquisa, com seu caráter exploratório, conseguiu contribuir para desenvolver a familiarização dos temas recorrentes ao problema estudado e possibilitou a difusão de conhecimentos e práticas relativas à Avaliação do Ciclo de Vida, bem como à atual norma que rege a aplicabilidade desta ferramenta.

Dessa forma, a pesquisa foi capaz, no âmbito pessoal do autor, de contribuir para aquisição e refinamento de conhecimentos relacionados ao conceito de sustentabilidade, às questões ambientalistas, aos métodos de análise estudados, no caso o AHP e a ACV, e também no que se refere ao entendimento das demandas ambientais.

Por fim, é válido deixar sugestões de novos estudos a fim de se contribuir mais nos aspectos que envolvem o escopo deste trabalho. Uma sugestão é a de se elaborar um modelo de referência para a realização de uma Avaliação do Ciclo de Vida, considerando boas práticas e o sentimento de grandes avaliadores. Outra sugestão se refere a aplicar o método AHP como auxiliador na avaliação do ciclo de vida considerando todas as possíveis aplicações listadas neste trabalho, a fim de se gerar uma análise crítica da proposta metodológica e o refinamento dos pontos aqui trazidos.

Também é interessante a realização de experimentos comparativos entre diferentes abordagens multicritério aplicadas à ACV, uma vez que o método AHP é alvo de constantes críticas na literatura, principalmente no que se refere ao fato da conversão da escala verbal para numérica, de possíveis inconsistências na escala numérica de julgamento de um a nove e o grande volume de comparações par a par que pode ser requerido.

No entanto, mesmo sendo um método multicritério controverso, é inegável o valor do AHP como ferramenta para construir um modelo baseado em uma estrutura hierárquica. Neste âmbito, é perfeitamente justificável o uso do método AHP, desde que se tenha em mente suas potenciais limitações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, G. S. O Desafio do Desenvolvimento Sustentável. **Revista Visões** - 4ª Edição, Nº4, Volume 1 - Jan/Jun 2008.

BARRELLA, F. A. (2011). **Ferramenta para Análise de Desempenho Ambiental na Geração de Energia Elétrica**. Tese (Doutorado). IPEN, São Paulo, 2011.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. – 2. ed. – Brasília : **Câmara dos Deputados, Edições Câmara**, 2012. 73 p. – (Série Legislação; n. 81).

BRENTROP, F.; KUSTEUS, J.; KUHLMANN, H.; LAMMIL, J. (2000). *Application of the life cycle assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilizer*. **European Journal of Agronomy**, Duermen, v. 14, p. 221-233, 2000.

BRUNDTLAND, G. H. *et al.* **Nosso futuro comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1987.

CANDIDO, S. E. A. (2010). **Comunidades ribeirinhas, engenheiros e conservação da floresta: construção participativa do espaço tecnológico em empreendimentos econômicos solidários na Amazônia**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

CLÍMACO, J.; VALLE, R. (2012). Apoio Multicritério à Decisão e Desenvolvimento Sustentável. Mini-curso. *Congresso Latino-Iberoamericano de Investigación Operativa (CLAIO)/Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)*. Rio de Janeiro, Brasil, Setembro, 24 a 28, 2012.

CORAL, E. (2002). **Modelo de Planejamento Estratégico para a Sustentabilidade Empresarial**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2005.

COSTA, T. C; BELDERRAIN, M. C. N. (2009). Decisão em Grupo em Métodos Multicritério de Apoio à Decisão. Anais do 15º Encontro de Iniciação Científica

e Pós-Graduação do ITA (XV ENCITA / 2009). Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, Brasil, Outubro, 19 a 22, 2009.

COSTA, H. G.; MOLL, R. N. (1999). Emprego do Método de Análise Hierárquica (AHP) na seleção de variedades para o plantio de cana-de-açúcar. **Gestão & Produção**, v.6, n.3, p. 243-256, dez. 1999.

DA SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: Laboratório de Ensino a Distância da UFSC, 2005.

DE LIMA, D. S. (2010). **Avaliação do ciclo de vida dos tubos de PVC produzidos no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro-SP, 2010.

EAGAN, P.; WEINBERG, L. (1999). *Application of Analytic Hierarchy Process Techniques to Streamlined Life-Cycle Analysis of Two Anodizing Processes*. **Environmental Science and Technology**, 33, 1495-1500, 1999.

ENNACEUR, A.; ELOUEDI, Z.; LEFEVRE, E. (2011). *Handling Partial Preferences in the Belief AHP Method: Application to Life Cycle Assessment*. **Springer-Verlag Berlin Heidelberg**, pp. 395–400, 2011.

FERREIRA, J. V. R. (2004). *Análise do Ciclo de Vida de Produtos – Gestão Ambiental*. Instituto Politécnico de Viseu, 2004.

HAN, J. Y.; LU, Y. L. (2008). *Evaluation of Environmental Competitiveness of Textile Enterprise Based on Analytic Hierarchy Process*. *Proceedings of the Seventh International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Kunming, 12-15 July 2008*.

HENSON, R.P.; CULABA, A.B.; MENDOZA, G.A. (2002). *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.

HUSSEIN, H. H. C. (2004). **Análise do Ciclo de Vida na Fabricação de Reservatórios de Água de Fibra de Vidro.** (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (2006). ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva, CH: ISO.

KANG, Y.; LI, J. (2010). *Green Rationality Evaluation of Degradable Packaging Based on LCA and Fuzzy AHP. Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM), IEEE 17Th International Conference. 29-31 Oct. 2010.*

KROZER, J.; VID, J.C. (1998). *How to get LCA in the right direction?* **Journal of Cleaner Production**, v.6, 1998 p. 53-61.

LUCENA, L. F. L. (1996). A análise multicriterial na avaliação de impactos ambientais. I Encontro Nacional da EcoEco – Campinas-SP. Disponível em: <http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/i_en/mesa3/7.pdf> Acesso em 14 abr. 2013.

MAGALHÃES, A. P. S. (2011). **Logística reversa de eletrodomésticos da linha branca: processo de escolha pelo Método da Análise Hierárquica.** (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

MANUAL TÉCNICO: Análise Multicritério. Desenvolvido por Observatório do Quadro de Referência Estratégico Nacional – Portugal, 2007-2013. Disponível em: < http://www.observatorio.pt/item1.php?lang=0&id_page=548>. Acesso em: 19 mai. 2013.

MOISA, R. E. (2005). **Avaliação Qualitativa de Passivos Ambientais em Postos de Serviço através do Método de Análise Hierárquica de Processo.** Dissertação (Mestrado). Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

OLIVEIRA, D. F; BECKER, M.; VIVALDINI, K. C. T.; TINELLI, L. M. (2011). Análise da aplicação conjunta do método AHP e da classificação ABC para

realocação de produtos em armazéns. 19º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP, São Carlos, SP.

OMETTO, A. R. (2005). **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ONG, S.; KOH, T.; NEE, A. (2001). *Assessing the environmental impact of materials processing techniques using an analytical hierarchy process method*. **Journal of Materials Processing Technology**, 113, 424-431, 2001.

PARTOVI, F. Y.; ANANDARAJAN, M. (2002). *Classifying inventory using an artificial neural network approach*. **Computers & Industrial Engineering**, v. 41, p. 389-404.

POMPERMAYER, R. S. (2003). **Aplicação da Análise Multicritério em Gestão de Recursos Hídricos: Simulação para as Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

QIAN, Y.; HUANG, Z.; YAN, Z. (2007). *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.

RUY, M., ALLIPRANDINI, D. H. (2010). Métodos para a Avaliação Ambiental de Produtos no Projeto Conceitual: Uma Revisão da Literatura. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP. São Carlos, SP, Brasil, 12 a 15 de Outubro de 2010.

SAATY, R. W. (1987). *The Analytic Hierarchy Process: What it is and how it is used?* **Mathematical Modelling, Great Britain**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.

SAATY, T. L. (1991). Método de Análise Hierárquica. São Paulo: Makron, 1991.

SAATY, T. L. (2008). *Decision making with the Analytic Hierarchy Process*. **Int. J. Services Sciences**, Pittsburgh, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.

SALOMON, V. P.; MONTEVECHI, J. A. B.; PAMPLONA, E. O. (1999). Justificativas para aplicação do método de análise hierárquica. In: XIX ENEGEP - Encontro Nac. de Eng. de Produção - Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1999.

SEPPÄLLÄ, J.; BASSON, L.; NORRIS, G.A. (2002). *Decision Analysis Frameworks for Life-Cycle Impact Assessment*. **Journal of Industrial Ecology**, 5 (4), 45-68, 2002.

SILVA, L. C; COSTA, A. P. C. S. (2011). Modelagem Multicritério para Aplicação de Políticas de Sustentabilidade nas Empresas de Tecnologia. In: XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Ubatuba-SP, 15 a 18 de agosto de 2011.

SILVA, M. G.; CÂNDIDO, G. A.; MARTINS, M. F. (2009). Método de Construção do Índice de Desenvolvimento Local Sustentável: Uma Proposta Metodológica e Aplicada. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.11, n.1, p.55-72, 2009.

SOULÉ, F. V. (2011). **Uma contribuição para teorização e difusão do conceito de empresa social**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2011.

SOUSA, S. R. *et al.* (2010). A utilização da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gestão ambiental: Modelos de aplicação. **Revista INGEPRO – Inovação, Gestão e Produção** – n. 06, vol. 02, Junho de 2010.

SOUZA, D. P.; MENDONÇA, F. M.; VALLE, R. (2012). Análise comparativa de duas alternativas de reaproveitamento de óleo vegetal usado para o bairro de Copacabana, Rio de Janeiro. III Congresso Brasileiro de Gestão do Ciclo de Vida de Produtos e Serviços. Maringá, 03 a 06 de Setembro de 2012.

TÔSTO, S. G.; PEREIRA, L. C. (2011). Índice de Sustentabilidade Ambiental com Base em Análise Multicritério de Apoio à Decisão. IX Encontro da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica. Brasília, 04 a 08 de Outubro de 2011.

VALT, R. B. G. (2004). **Análise do Ciclo de Vida de Embalagens de PET, de Alumínio e de Vidro para Refrigerantes no Brasil Variando a Taxa de Reciclagem dos Materiais**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.