



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CAMPUS DE CURITIBA**  
**DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**E DE MATERIAIS - PPGEM**

**SÉRGIO TAKAHASHI**

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO SETOR DE**  
**TRANSPORTE DE CARGAS: COMPARAÇÃO DE**  
**MÉTODOS**

**CURITIBA**

**NOVEMBRO - 2008**

**SÉRGIO TAKAHASHI**

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO SETOR DE  
TRANSPORTE DE CARGAS: COMPARAÇÃO DE  
MÉTODOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Área de Concentração em Engenharia de Manufatura, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus de Curitiba, da UTFPR.

**Orientadora:** Prof<sup>ª</sup>. Cássia Maria Lie Ugaya, Dr<sup>ª</sup>.

**Co-orientador:** Prof. Luciano F. S. Rossi, Dr.

**CURITIBA**

**NOVEMBRO – 2008**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

T136a	<p>Takahashi, Sérgio</p> <p>Avaliação ambiental do setor de transporte de cargas : comparação de métodos / Sérgio Takahashi. – 2008. xv, 90 f. : il. ; 30 cm</p> <p>Orientador: Cássia Maria Lie Ugaya Co-orientador: Luciano F. S. Rossi</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Área de Concentração em Engenharia de Manufatura, Curitiba, 2008 Bibliografia: f. 82-8</p> <p>1. Transporte rodoviário de carga. 2. Impacto ambiental. 3. Ciclo de vida dos produtos. 4. Engenharia de transportes. I. Ugaya, Cássia Maria Lie, orient. II. Rossi, Luciano Fernando dos Santos, co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. Área de Concentração em Engenharia de Manufatura. IV. Título.</p> <p>CDD 620.1</p>
-------	--

## TERMO DE APROVAÇÃO

SÉRGIO TAKAHASHI

# AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO SETOR DE TRANSPORTE DE CARGAS: COMPARAÇÃO DE MÉTODOS

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de mestre em engenharia, área de concentração em engenharia de manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

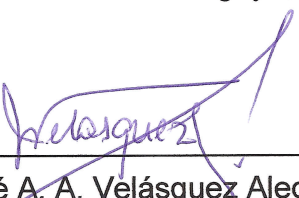
---

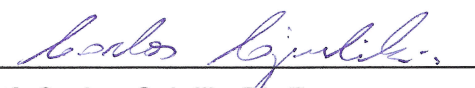
Prof. Giuseppe Pintaúde, D.Sc.  
Coordenador de Curso

### Banca Examinadora

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Cássia Maria Lie Ugaya, Dr.<sup>a</sup> Sc.  
(UTFPR)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Marcelo Risso Errera, Ph.D.  
(UFPR)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. José A. A. Velásquez Alegre, Dr. Eng.  
(PUC-PR/UTFPR)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Carlos Cziulik, Ph.D.  
(UTFPR)

Curitiba, 24 de novembro de 2008

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus familiares e amigos, por darem apoio nas horas difíceis, depositando não só um, mas vários votos de confiança em mim.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cássia Maria Lie Ugaya e ao co-orientador Prof. Dr. Luciano Fernando dos Santos Rossi, por terem me aceitado a ajudar a desenvolver esta dissertação, pela orientação, confiança e paciência comigo.

À instituição Universidade Tecnológica Federal do Paraná e todo corpo docente, onde concluo mais uma etapa da minha vida, por todas as oportunidades oferecidas e por todo o conhecimento nela adquirido.

TAKAHASHI, Sérgio, **Avaliação Ambiental do Setor de Transporte de Cargas: Comparação de Métodos**, 2008, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 90p.

## RESUMO

O setor de transportes é responsável por grande parte do consumo de recursos não renováveis e pelas emissões de gases causadores de efeito estufa, entre outros. No Brasil, predomina o transporte rodoviário, especialmente com o uso de caminhões para o transporte de cargas. Estes caminhões, entretanto, não impactam o meio ambiente apenas durante o uso, mas também em outras etapas do ciclo de vida que vão desde a extração de recursos ao descarte final do produto. Atualmente, há meios de avaliar as prioridades para a redução de impactos ambientais, com diversos métodos diferentes. O objetivo deste estudo consiste em analisar o processo de transporte rodoviário de cargas em três diferentes métodos ambientais: a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Análise Emergética e Análise Exergética. A ACV consiste em uma metodologia que possibilita a avaliação ambiental em todas as fases do ciclo de vida do produto. As etapas da realização da ACV compreendem: a definição do objetivo e do escopo, a análise de inventário, a avaliação de impacto e a interpretação. Na ACV, foi selecionado um método que engloba a pontuação única: o Eco-indicator-99. Já a análise emergética é realizada a partir da obtenção dos fluxos de matéria, energia, dinheiro e informação, fornecendo um valor, no caso a emergia. A exergia é utilizada como unidade de medida comum (em Joules) para insumos energéticos e materiais, produtos e poluentes. Para realizar a comparação das três metodologias, o cenário escolhido foi a análise de dois tipos de caminhões de diferentes capacidades de cargas, com dados de consumos de recursos e geração de poluentes de uma base de dados de inventário internacional, neste caso o inventário Ecoinvent. Ao final apresentam-se os resultados e as conclusões sobre o emprego dos métodos da avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV), análise exergética e análise emergética.

**Palavras-chave:** Emergia; Avaliação de Ciclo de Vida; Exergia, Impactos ambientais, Transporte

TAKAHASHI, Sérgio, **Avaliação Ambiental do Setor de Transporte de Cargas: Comparação de Métodos**, 2008, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 90p.

## ABSTRACT

The transport sector is responsible for great part of unrenovable resources use and gases emissions contributing to green house effect. The trucks employment in cargo transport predominates in Brazil. These trucks, however, impact on the environment during their use as well as in other stages of their life cycle, since the extraction of resources till the final discard of product. To evaluate the priorities for the diminishing environment impact, several different methods had been elaborated. This study consist in comparing the result of three of these methods: the Life Cycle Analysis (LCA), the Exergy Analysis and the Emergetic Analysis. The LCA is a methodology that enables the environment evaluation in all phases of the product life cycle. The accomplishment stages of LCA include the objective and target definition, the inventory analysis, the impact evaluation and the results interpretation. Otherwise, the emergetic analysis is carried through the material flux, energy, money and information that provide us a value, in this case, the emergy. The exergy is used as a tactical unit for usual energy supplies and materials, products and pollutants. The compare these tree methodologies, two different cargo capacity trucks had been selected, with data of resources use and pollutants production for an international database, the ecoinvent. The results and conclusions are presented about the evaluation methods of life cycle impact, exergy analysis and emergetic analysis.

**Key-words:** *Emergy; Life Cycle Analysis; Exergy, Environmental Impacts, Transport.*

## SUMÁRIO

RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DO TRANSPORTE COM O MEIO AMBIENTE .....	2
1.2 OBJETIVOS E METAS .....	5
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	6
<b>2 SUSTENTABILIDADE: TÉCNICAS AMBIENTAIS DE AVALIAÇÃO .....</b>	<b>7</b>
2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA .....	7
2.1.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO .....	8
2.1.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA .....	9
2.1.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO .....	14
2.1.4 INTERPRETAÇÃO .....	27
2.2 EMERGIA .....	28
2.2.1 HISTÓRICO DA EMERGIA .....	28
2.2.2 CONCEITOS DE EMERGIA .....	32
2.2.3 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA EMERGÉTICA .....	33
2.2.4 ÍNDICES EMERGÉTICOS .....	37
2.3 ANÁLISE ENERGÉTICA .....	40
2.3.1 ANÁLISE PELA PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA .....	40
2.3.2 ANÁLISE PELA SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA .....	42
2.4 ANÁLISE EXERGÉTICA .....	42
2.4.1 CONCEITO DE EXERGIA .....	42
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>48</b>
3.1 DEFINIÇÕES DOS DADOS A SEREM COLETADOS .....	48
3.1.1 METODOLOGIA EMERGÉTICA .....	48
3.1.2 METODOLOGIA EXERGÉTICA .....	52
3.1.3 MÉTODO DA ACV .....	54
3.2 ANÁLISE DOS DADOS DO ECOINVENT PARA EMERGIA E EXERGIA .....	55
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
4.1 ANÁLISE EMERGÉTICA .....	68
4.2 ANÁLISE EXERGÉTICA .....	73
4.3 ANÁLISE PELO ECO-INDICATOR 99 .....	76
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>79</b>
5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS .....	81



REFERÊNCIAS .....	82
ANEXO A – TRANSFORMIDADE DE ALGUNS ELEMENTOS.....	89
ANEXO B – EXERGIA QUÍMICA ESPECÍFICA DE ALGUMAS SUBSTÂNCIAS .....	90

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1– FASES DE UMA ACV .....	8
FIGURA 2 – RELAÇÃO ENTRE O ECOINVENT E OS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL.....	11
FIGURA 3 – EXEMPLO DE RELACIONAMENTO DO INVENTÁRIO NO ECOINVENT .....	12
FIGURA 4 – INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA NO ECOINVENT .....	13
FIGURA 5 – MODELO DE ENTRADAS E SAÍDAS DE TRANSPORTE .....	13
FIGURA 6 – ETAPAS DA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA CONFORME A NBR ISO 14042 .....	16
FIGURA 7 – METODOLOGIA DO ECO-INDICADOR 95 .....	21
FIGURA 8 – METODOLOGIA DO ECO-INDICADOR 99 .....	23
FIGURA 9 – CONCEITO DO NÚCLEO DO ECO-INDICADOR 99.....	27
FIGURA 10 – EXEMPLO DO PRINCÍPIO DA MÁXIMA POTÊNCIA .....	31
FIGURA 11 - DIAGRAMA DA VISÃO RESUMIDA DO FUNCIONAMENTO DO PLANETA .....	34
FIGURA 12 - SÍMBOLOS DA METODOLOGIA EMERGÉTICA .....	35
FIGURA 13 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DOS FLUXOS DE ENERGIA .....	39
FIGURA 14 – DIAGRAMA EMÉRGÉTICO SIMPLIFICADO DO TRANSPORTE DE CARGA .....	49
FIGURA 15 – EMERGIA CONFORME RECURSOS DO TRANSPORTE 16 t.....	70
FIGURA 16 – EMERGIA CONFORME RECURSOS DO TRANSPORTE 32 t.....	71
FIGURA 17 – AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CAMINHÃO 16 t DA BASE DE DADOS ECOINVENT COM USO DO MÉTODO DE AICV ECOINDICADOR 99 H/A (SIMAPRO 7) .....	76
FIGURA 18 – AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CAMINHÃO 32 t DA BASE DE DADOS ECOINVENT COM USO DO MÉTODO DE AICV ECOINDICADOR 99 H/A (SIMAPRO 7) .....	77

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – TONELADAS DE CARGAS TRANSPORTADA .....	4
TABELA 2 – BIBLIOTECA DA BASE DE DADOS NO SIMAPRO.....	10
TABELA 3 – CATEGORIA DE IMPACTOS AMBIENTAIS RELACIONADAS A ESTUDOS DE ACV .....	17
TABELA 4 – MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA.....	18
TABELA 5 – EXEMPLOS DE CATEGORIAS DE IMPACTO POR ALGUNS MÉTODOS DE AICV.....	20
TABELA 6 – CLASSE DOS DANOS NO ECO-INDICATOR 99.....	24
TABELA 7 – COMPONENTES DO MECANISMO AMBIENTAL DA AICV PELA EXERGIA .....	52
TABELA 8 – RELAÇÃO DOS DADOS DO ECOINVENT COM OS VALORES DE TRANSFORMIDADE.....	56
TABELA 9 – RELAÇÃO DOS DADOS DO ECOINVENT COM OS VALORES DE EXERGIA PADRÃO DAS SUBSTÂNCIAS.....	58
TABELA 10 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (MATÉRIA-PRIMA) .....	60
TABELA 11 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (AR).....	63
TABELA 12 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (ÁGUA).....	65
TABELA 13 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (SOLO).....	67
TABELA 14 – RESULTADOS DOS VALORES EMERGÉTICOS DOS TRANSPORTES DE 16 t E DE 32 t (UNIDADE: sej/1 tkm).....	69
TABELA 15 – ÍNDICES EMERGÉTICOS DO SETOR DE TRANSPORTE (1tkm)....	72
TABELA 16 – VALOR EXERGÉTICO DOS TRANSPORTES (kJ/1 tkm).....	75
TABELA 17 – RESULTADOS DO TRANSPORTE 16 t E 32 t NO ECO-INDICATOR 99 (H) V2.03 / EUROPE EI 99 H/A (1 tkm).....	78
TABELA 18 – TRANSFORMIDADE DE ALGUNS ELEMENTOS .....	89
TABELA 19 – EXERGIA QUÍMICA ESPECÍFICA DE ALGUMAS SUBSTÂNCIAS ..	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

% R	- percentual de Energia Renovável
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	- Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	- Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
ANNT	- Agência Nacional de Transportes Terrestres
CFC	- Cloro-Flúor-Carbono
CML	- <i>Centre for Environmental Science of Leiden University</i>
DALY	- <i>Disability Adjusted Life Years</i>
DBO	- Demanda Biológica do Oxigênio
DDT	- Dicloro-Difenil-Tricloroetano
DQO	- Demanda Química do Oxigênio
EI-99	- <i>Eco-indicator 99</i>
EIA	- Estudos de Impacto Ambiental
EIR	- Investimento Emergético
ELR	- Carga Ambiental
EPA	- <i>Environmental Protection Agency</i>
EPS	- <i>Environmental Priority Strategies</i>
ETC	- Empresas Transportadoras de Carga
EYR	- Rendimento Emergético
HFC	- Hidro Cloro Flúor Carbonos
IARC	- <i>International Agency for Research on Cancer</i>
ICV	- Inventário do Ciclo de Vida
ISO	- <i>International Standards Organization</i>
LCA	- <i>Life Cycle Assesment</i>

LIME	- <i>Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling</i>
mPts	- pontos médios
PAF	- <i>Potentially Affected Fraction</i>
PAH	- Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
PDF	- <i>Potentially Disappeared Fraction of Plant Species</i>
PIB	- Produto Interno Bruto
RNTRC	- Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Carga
SENAT	- Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte
SEST	- Serviço Social do Transporte
SI	- Índice de Sustentabilidade
SPM	- Material Particulado em Suspensão
TCA	- Transportadores de Carga Autônomos
TCP	- Transportadores de Carga Própria
TKU	- toneladas por quilômetros úteis
TRACI	- <i>Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts</i>
VOC	- Compostos Orgânicos Voláteis
YLD	- <i>Years Lived Disabled</i>
YLL	- <i>Years of Life Lost</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

sej	- enjoule
MJ	- mega joule
km <sup>2</sup> *yr	- quilômetros quadrados por ano
m/s <sup>2</sup>	- metros por segundo ao quadrado
kJ/kg	- quilojoule por quilograma
ppm	- partes por milhão
µg	- micrograma
ng	- nanograma
mg	- miligrama
in <sup>3</sup>	- polegadas cúbica
tkm	- toneladas por quilômetro

# 1 INTRODUÇÃO

Em meio ao renascimento das cidades europeias após a idade média e a revolução industrial, houve um grande período de urbanização acelerada, com a retirada do homem do campo, a instalação e o desenvolvimento do parque industrial, a explosão demográfica das cidades sempre próximas ou dentro dos grandes centros consumidores. Nesse processo, ambientes inteiros foram degradados, pouco sendo feito para minimizar e abrandar os impactos causados (GOLDEMBERG, 2003).

A poluição ambiental conseqüentemente instalava-se junto com a industrialização e o crescimento populacional, o que provocava uma série de problemas ambientais que, para a época da revolução industrial, não eram considerados danosos, sempre supondo o caráter infinito dos recursos naturais (BRAGA et al., 2002).

Durante esse período da revolução industrial, não havia preocupação com a questão ambiental. Os recursos naturais eram abundantes, e a poluição não era foco da atenção da sociedade industrial e intelectual da época.

Mais recentemente, surgiu a consciência de que a degradação de um ambiente qualquer provoca vários impactos, de baixa ou de alta relevância, mas que somados podem levar ao desaparecimento de ecossistemas inteiros.

Uma das principais causas dos impactos ambientais decorre das utilizações intensivas e crescentes de energias, que acarreta no consumo de recursos fósseis (petróleo, gás natural, carvão), que são limitados, como conseqüência, a sociedade buscar fontes alternativas de energia. (GOLDEMBERG, 2003).

A ascensão da conscientização ambiental da sociedade acarretou a pressão de clientes e organizações ambientalistas, em legislações cada vez mais severas, e de normas internacionais na área de qualidade ambiental (GOLDEMBERG, 2003). Como decorrência, cresceu a necessidade de produzir produtos de maneira mais racional e harmônica com o meio ambiente, criando alternativas mais limpas para o uso de recursos, processos e produtos, uso e descarte, de modo a criar uma melhoria do desempenho ambiental das atividades, processos e produtos.

As questões ambientais conseqüentemente tornaram-se um dos mais importantes fatores de conquista para a continuidade da aceitação dos produtos de uma empresa nos mercados interno e externo. A empresa moderna vive no dilema de adaptar-se ou correr o risco de perder espaços arduamente conquistados (BRAGA et al., 2002). Além disso, a indústria moderna nota que é responsabilidade de todos agir de modo a minimizar e prevenir impactos ambientais negativos sobre o meio ambiente, incluindo este conceito no planejamento estratégico da empresa (GOLDEMBERG, 2003).

Desta forma, a busca por métodos de avaliação de impactos ambientais no ecossistema tem ganhado cada vez mais importância na sociedade atual. Recentemente, surgiram muitos métodos para quantificar e qualificar os impactos ambientais gerados pelo homem. Dentre os quais pode-se citar a Avaliação do Ciclo de Vida, a análise Exergética, e a metodologia Emergética.

## **1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DO TRANSPORTE COM O MEIO AMBIENTE**

Desde muito tempo atrás, o transporte de mercadorias tem sido usado para disponibilizar produtos onde existe demanda, dentro do prazo adequado às necessidades do comprador (NAZÁRIO et al., 2000). As principais funções do transporte estão ligadas basicamente aos fatores de tempo e utilidade de lugar (NAZÁRIO et al., 2000). Além disso, o transporte tem a função básica de proporcionar aumento na disponibilidade de bens ao permitir o acesso a produtos que de outra maneira não estariam disponíveis para uma sociedade ou estariam disponíveis apenas a um elevado preço.

Mesmo com o avanço de tecnologias que permitem a troca de informações em tempo real, o transporte continua sendo fundamental para que seja atingido o objetivo logístico que é o produto certo, na quantidade certa, na hora certa, no lugar certo, ao menor custo possível (NAZÁRIO et al., 2000).

No Brasil, a ênfase do transporte rodoviário consolidou-se na mesma época da implantação da indústria automobilística, e à mudança da capital para a região Centro-Oeste, acompanhadas de um amplo programa de construção de rodovias. Diferentemente do que ocorreu em termos mundiais, contudo, esta ênfase traduziu-



se não só na prioridade, mas na quase exclusividade das políticas de transporte voltadas para o modal rodoviário, pelo menos até a década de 70 (SCHROEDER; CASTRO, 1996).

Tal cenário é resultado direto da escolha estratégica, adotada no início dos anos 1950, de privilegiar as rodovias em relação aos diversos modais de transporte e da capacidade limitada de investimentos do Estado em infra-estrutura. Até 1950, o modal rodoviário correspondia a apenas 38% e havia um predomínio do modal ferroviário. A partir de então, foi adotada a estratégia de privilegiar as rodovias (GOLDENSTEIN; ALVES; AZEVEDO, 2006).

Entre as décadas de 1960 e 1980, os investimentos foram direcionados à construção de estradas de rodagem. Diversos fatores, como a ampliação da indústria automobilística, o baixo preço do petróleo e o crescimento econômico ocorrido até a década de 1970, levaram o transporte rodoviário de cargas a consolidar sua posição de predominância na matriz de transporte, alcançando a participação de 70% (GOLDENSTEIN; ALVES; AZEVEDO, 2006).

Para VALENTE (1997), o sistema rodoviário é o principal responsável pelo escoamento das cargas no Brasil, respondendo por aproximadamente 60% do total. Transportando desde simples encomendas até safras inteiras, abastecendo as cidades e viabilizando o desenvolvimento econômico do País.

O Brasil ainda apresenta uma distribuição modal no transporte de carga excessivamente centrada na rodovia, decorrente de um processo que se estendeu por várias décadas e onde predominou o crescimento rápido e desproporcional do segmento rodoviário relativamente ao conjunto das demais modalidades. Assim, o setor de transportes apresenta-se no Brasil de hoje segundo características que o diferenciam da maioria dos países desenvolvidos e até mesmo de grande parte dos subdesenvolvidos.

TABELA 1 – TONELADAS DE CARGAS TRANSPORTADA

<i>MODAL</i>	<i>Milhões TKU 2004</i>	<i>PARTICIPAÇÃO (%)</i>	<i>Milhões TKU 2005</i>	<i>PARTICIPAÇÃO (%)</i>
Rodoviário	470.888	61,5%	485.625	61,1%
Ferroviário	155.950	20,4%	164.809	20,7%
Aquaviário	103.390	13,5%	108.000	13,6%
Dutoviário	33.246	4,3%	33.300	4,2%
Aéreo	2.432	0,3%	3.169	0,4%
TOTAL	765.906	100,0%	794.903	100,0%

FONTE: ANTT, (2007)

De acordo com a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2007), o modal rodoviário em 2005 representa cerca de 61% da matriz de transporte brasileira, enquanto o ferroviário conta com 21%, o aquaviário, com 14%, e o aéreo e o dutoviário, com 4%, conforme mostrado na Tabela 1. A sigla *TKU* apresentada na Tabela 1 (toneladas por quilômetros úteis) representa o percurso que efetivamente se circulou com carga.

Conforme o Anuário de Transportes da NTC (ANTT, 2007) dados do Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Carga (RNTRC) mostram que estão cadastradas apenas 110 mil empresas, sendo que destas, apenas 20 mil tem sua denominação ligada a transportes. Isso ocorre devido à inclusão – por parte da ANTT de uma grande quantidade de empresas de carga própria como indústrias, postos de gasolina, lojas, distribuidoras de produtos, construtoras e madeireiras.

Segundo WANKE (2003), no Brasil, na origem dos problemas estruturais estão as questões de priorização de investimentos governamentais, regulação, fiscalização e custo de capital, que levaram o país à dependência exagerada do modal rodoviário e, como conseqüência, a baixos índices de produtividade, ao elevado nível de insegurança nas estradas, a baixa eficiência energética e a altos níveis de poluição ambiental. Tudo isso vem ocorrendo ao mesmo tempo em que o transporte aumenta sua importância na economia brasileira.

A atividade de transporte, a mais importante entre os diversos componentes logísticos, vem aumentando sua participação no Produto Interno Bruto (PIB), crescendo de 3,7% para 4,3% entre 1985 e 1999. Em 30 anos, ou seja, entre 1970 e 2000, o setor de transportes cresceu cerca de 400%, enquanto o crescimento do PIB

foi de 250%. Este crescimento foi fortemente influenciado pela desconcentração geográfica da economia brasileira nas últimas décadas, na direção das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste (FLEURY, 2003).

Apesar da importância deste setor na economia, o transporte rodoviário de carga consome grande quantidade de energia e demanda outros recursos no ciclo de vida dos produtos.

Outros aspectos a ressaltar da justificativa desta investigação nesta dissertação são:

- a) Permitir a análise ambiental por diferentes ferramentas ambientais no setor de transporte rodoviário de cargas;
- b) Buscar a redução dos impactos ambientais gerados pelo processo;
- c) Analisar os resultados e através deles permitir a melhoria do processo.

## 1.2 OBJETIVOS E METAS

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre metodologias para a avaliação dos impactos ambientais de um processo a ser estudado, no caso o setor de transporte rodoviário. Neste caso, o método de comparação utilizado será a ACV, a metodologia emergética, e a metodologia exergética.

Os principais objetivos específicos a serem realizados neste trabalho são:

- a) Avaliar os impactos ambientais gerados pelo setor de transporte rodoviário de cargas por técnicas ambientais de avaliação de sustentabilidade;
- b) Comparar os resultados obtidos por meio da avaliação do impacto do ciclo de vida do produto, na área de transporte, usando outras concepções, como a metodologia emergética e a metodologia exergética.

### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Para atender os objetivos da dissertação, foram divididos em vários capítulos, nas quais cada um tem um foco principal:

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre as técnicas de análise ambiental, a análise do ciclo de vida (ACV), a emergia e a exergia;

O Capítulo 3 consiste na descrição da utilização das técnicas ambientais no setor de transporte rodoviário de cargas;

Nos Resultados são apresentados os valores e os dados obtidos através da aplicação das metodologias.

Encerra-se com a Conclusão que é a discussão sobre os resultados obtidos e recomendações para trabalhos futuros.

## 2 SUSTENTABILIDADE: TÉCNICAS AMBIENTAIS DE AVALIAÇÃO

### 2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode ser definida como uma técnica para determinar os potenciais impactos ambientais associados a um produto pela compilação de um inventário das intervenções ambientais relevantes desse produto em todo o ciclo de vida, desde a retirada das matérias-primas necessárias à produção até deposição final no meio ambiente, avaliando os potenciais impactos ambientais dessas intervenções. Portanto, essa técnica considera todos os processos que contribuem para o impacto ambiental de um produto final (CURRAN, 1996).

A ACV leva em consideração, principalmente, os impactos ambientais dos sistemas em estudo nos âmbitos da saúde ecológica, da saúde humana e do esgotamento dos recursos naturais. Porém, a NBR ISO 14040 cita que os estudos podem considerar os aspectos econômico e social (ABNT, 2001).

Na NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), é mencionado que há quatro etapas, conforme mostrado na Figura 1. Na ACV ocorre:

- a) Definição do objetivo e do escopo
- b) Levantamento e compilação das entradas e saídas significativas do sistema, etapa denominada Análise de Inventário;
- c) Avaliação dos impactos potenciais associados a essas entradas e saídas, que consiste na etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida;
- d) Interpretação dos resultados das fases de levantamento e avaliação, em relação aos objetivos de estudo.

Ainda na Figura 1, são apresentadas as principais aplicações da ACV

Sendo que CURRAN (1996) menciona que a ACV é importante para comparar o desempenho de produtos com as mesmas funções e indicar qual é menos impactante para o meio ambiente. Ainda, ajuda na tomada de decisões na indústria, em organizações governamentais e não-governamentais e auxilia também na seleção de indicadores de desempenho ambiental e no marketing (ABNT, 2001).

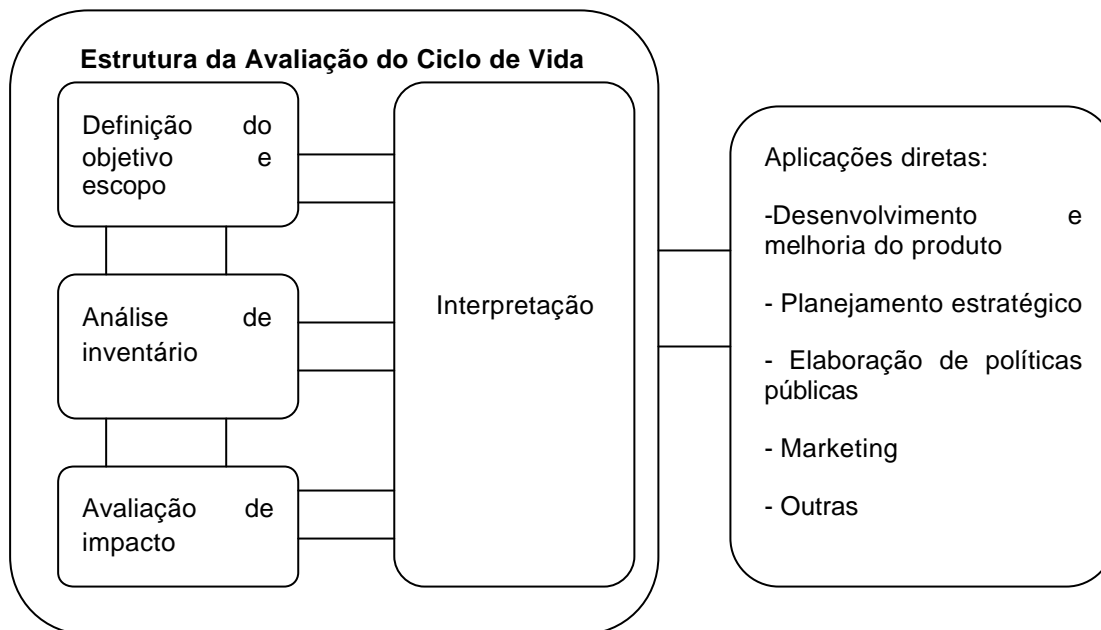


FIGURA 1– FASES DE UMA ACV  
 FONTE: ABNT, (2001)

### 2.1.1 Definição do Objetivo e Escopo

Nessa fase, deve ser descrita a proposta de condução do estudo e as aplicações pretendidas. É preciso que se defina se o objetivo do estudo, que pode ser a comparação de produtos, a rotulagem ambiental, a intenção de promover alguma melhoria ambiental em um determinado produto existente ou projetar um produto completamente novo; ou simplesmente pretende-se obter mais informações sobre o produto (CIAMBRONE, 1997).

Devem também ser delineados o sistema analisado, as fronteiras, os dados necessários, a unidade funcional, as considerações adotadas e as limitações. Todas as limitações, metodologias, categorias de dados, hipóteses, extensão geográfica (local, regional, nacional, continental ou global) e temporal (vida do produto, horizonte de tempo dos processos e impactos), devem ser claramente definidas, de forma compreensível e visível (CURRAN, 1996).

Segundo a NBR ISO 14041 (ABNT, 2004) o elemento chave na definição do escopo é a especificação da unidade funcional, que consiste em fornecer uma referência com relação à qual os dados de entrada e saída são padronizados (num

sentido matemático). Portanto, a unidade funcional deve ser claramente definida e mensurável.

Uma vez definida a unidade funcional, a quantidade de produto que é necessária para cumprir a função deve ser quantificada. O resultado desta quantificação é o fluxo de referência.

O fluxo de referência é então utilizado para calcular as entradas e saídas do sistema. Comparações entre sistemas devem ser feitas com base na mesma função, quantificada pela mesma unidade funcional na forma dos seus fluxos de referência, conforme a NBR ISO 14041 (ABNT, 2004).

### **2.1.2 Inventário do Ciclo de Vida**

A fase de inventário constitui uma etapa indispensável para a avaliação quantitativa de impactos ambientais e engloba a coleta de dados e procedimentos de cálculo utilizados na quantificação de fluxos de entrada e de saída de matéria e energia para um determinado sistema de produto (MANZINI; VEZZOLI, 2005).

Segundo CHEHEBE (1998), os inventários possibilitam a identificação de limitações ou a necessidade de maiores informações para a avaliação do processo e podem gerar mudanças nos procedimentos de coleta de dados, revisão dos objetivos ou escopo do estudo que está realizado. A consistência dos dados viabiliza a obtenção de resultados mais precisos e confiáveis. O inventário, na prática, é difícil e trabalhoso de ser executado por uma série de razões que vão desde a ausência de informações conhecidas e a necessidade de estimá-las à qualidade do dado especificado. Dados de boa qualidade podem algumas vezes somente ser obtidos através de medições *in loco*. O tempo e os recursos limitados, no entanto, algumas vezes não permitem investigações detalhadas, exigindo uma abordagem mais simples, sendo as principais fontes de informação como: normas técnicas, estatísticas ambientais, licenças ambientais, literatura técnica, informação interna das empresas, fornecedores reais ou potenciais e bancos de dados de ACV internacionais.

Um inventário do ciclo de vida (ICV) consiste na descrição do processo com as entradas e saídas (fluxos elementares, intermediários e de produtos).

Existem atualmente diversos bancos de dados de inventário de ciclo de vida, como mostrado na Tabela 2, na qual se nota que a mais extensa é a base de dados do ecoinvent.

TABELA 2 – BIBLIOTECA DA BASE DE DADOS NO SIMAPRO

<b>Nome</b>	<b>Ano</b>	<b>Conteúdo</b>	<b>Processos</b>
Danish IO database	2003	Base de dados detalhada para a Dinamarca	793
Danish Food Database	2003	Base de dados de alimentação, desenvolvido pelo LCA 2.0	671
Ecoinvent v2	2007	Processos de energia, transporte, materiais, etc.	3500
Ecoinvent Demo	2007	50 processos utilizados no Demo (sistema)	50
USA IO	2003	Sets de dados IO dos EUA compilado pelo CML Leiden	500
Industry data	2001	Dados publicados por associações de indústrias	74
Idemat	2001	Base de dados neolandesa, compilada a partir de diferentes fontes pela Delft Univ. Tec.	508
Buwal 250	1997	Materiais, energia, transporte e resíduos gerais desenvolvido pelo Instituto de Embalagem da Suíça	248
ETH-SEU	1996	Todos os processos da famosa base de dados de energia e transporte. ETH-ESU Zurich	1100
Franklin	1996	Base de dados dos EUA em materiais, transporte e energia, etc. Franklin associates	78

FONTE: UGAYA, (2009)

### 2.1.2.1. ECOINVENT

No ecoinvent é utilizado o formato EcoSpold que permite a troca de dados, baseado na linguagem XML (*eXtensible Markup Language*) e nas tecnologias relacionadas (XSL, XSLT, Schema). O formato é inteiramente condizente com as especificações técnicas da ISO/TS 14048 (FRISCHKNECHT et al., 2007).

Segundo FRISCHKNECHT et al., (2007) o sistema de banco de dados do ecoinvent fundamenta-se na elaboração de um conjunto básico de inventários de



qualidade, uniformes e consistentes, nas diversas áreas das atividades humanas válidos para as condições suíças e europeias, tais como sistema de energia, materiais de construção, metais, embalagens, tecnologia de informação e comunicação, eletrônica, engenharia mecânica, energias renováveis e materiais, produtos químicos, insumos agrícolas, sistema de transporte, tratamento e disposição de resíduos.

O ecoinvent, originalmente, foi construído para o mercado suíço e posteriormente para o mercado europeu, e envolveu diversos setores federais daquele país com o intuito de efetivamente possibilitar a harmonização e a atualização dos inventários de ciclo de vida para serem utilizados nos estudos de ACV (FRISCHKNECHT et al., 2007).

Os principais fornecedores de software de ACV oferecem licenças do Ecoinvent e dados Ecoinvent ou interfaces EcoSpold encaixados dentro de suas ferramentas de software, como o *SimaPro*, Umberto, EMIS, REGIS e outros. A Figura 2 ilustra essa interação.



FIGURA 2 – RELAÇÃO ENTRE O ECOINVENT E OS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO AMBIENTAL  
 FONTE: FRISCHKNECHT et al., (2007)

A partir das informações fornecidas em cada ICV, é possível então conectar as diversas unidades de processo. Um exemplo simplificado é mostrado na Figura 3 para o ICV do uso de um caminhão. Como no ICV do uso do caminhão é necessário um caminhão montado, a unidade do processo “Montagem do caminhão” é imediatamente conectada à unidade do processo, uso do caminhão e assim sucessivamente (UGAYA, 2009).

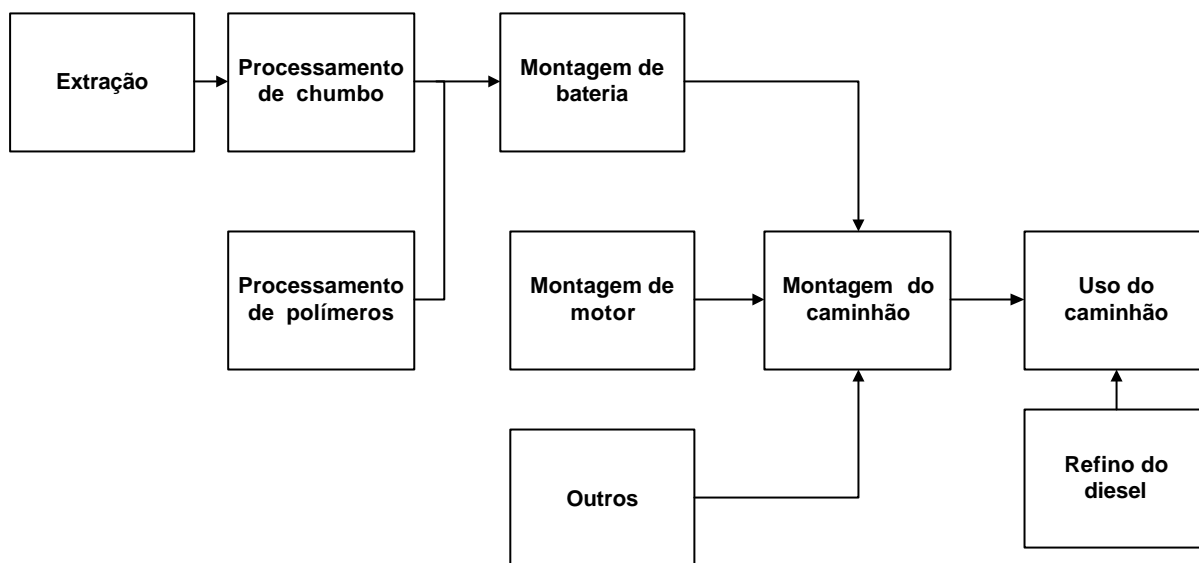


FIGURA 3 – EXEMPLO DE RELACIONAMENTO DO INVENTÁRIO NO ECOINVENT

Nos inventários de ciclo de vida existentes no ecoinvent são consideradas as unidades de processos com entradas de recursos naturais e materiais de energia da esfera tecnológica e saídas para o meio ambiente e a tecnofesta, conforme a Figura 4 (UGAYA, et al., 2005).

Além das entradas usuais (energia, matéria prima, emissões, ar, água e solo), no ecoinvent também é incluída a infra-estrutura, que inclui: área (tanto de áreas transformadas como ocupadas), construções e equipamento.

Outro ponto importante em cada inventário do ciclo de vida do ecoinvent é a inclusão do transporte a montante da unidade de processo, em que são incluídos, além da quantidade de recursos / materiais consumidos, o meio de transporte e a distância.

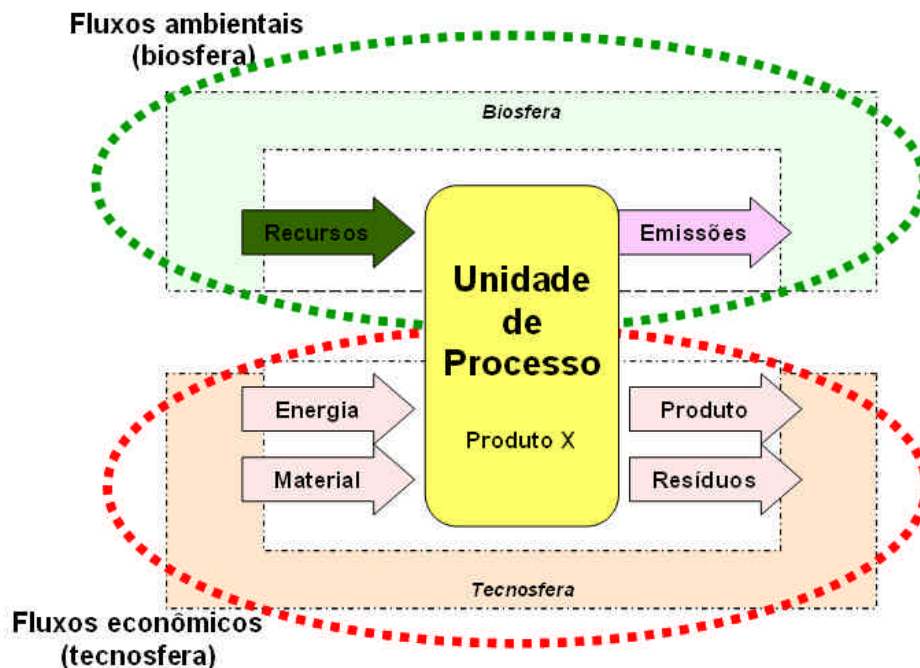


FIGURA 4 – INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA NO ECOINVENT  
 FONTE: UGAYA, et al., (2007)

**2.1.2.2. Inventário do Ciclo de Vida de Transporte**

Toda produção de uma indústria tem o transporte e a distribuição em uma das etapas do ciclo de vida, o que mostra a importância da realização de um inventário do ciclo de vida do setor de transporte.

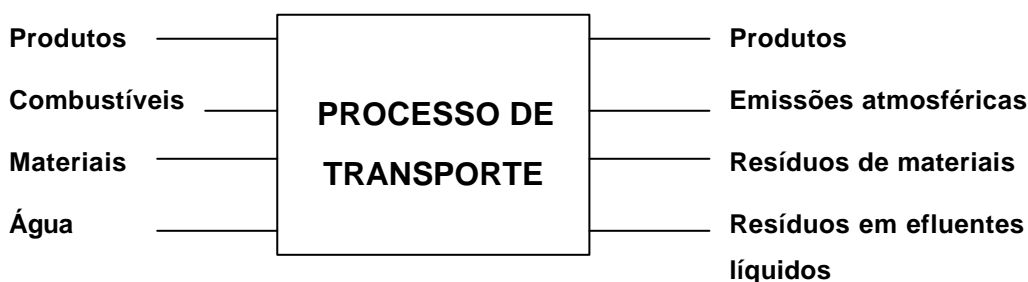


FIGURA 5 – MODELO DE ENTRADAS E SAÍDAS DE TRANSPORTE  
 FONTE: CIAMBRONE, (1997)

A Figura 5 representa as entradas e as saídas para o processo de transporte envolvendo um caminhão.

Conforme RIBEIRO (2001), os impactos ambientais no setor de transporte podem ter duas fontes. Uma se refere à *infra-estrutura* que causa a segregação espacial, intrusão visual, modificações no uso e ocupação do solo e outra, refere-se

à *operação* que causa efeitos sobre a qualidade de vida da população derivados dos ruídos, vibrações, acidentes, poluição do ar e da água provocados pelo movimento dos veículos.

### 2.1.3 Avaliação do Impacto

A Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é a terceira etapa da Avaliação do Ciclo de Vida do Produto, em que se modelam as questões ambientais selecionadas, denominadas de categorias de impacto, e utiliza-se indicadores de categoria para condensar e explicar os resultados do ICV (ABNT, 2004).

De acordo com a norma NBR ISO 14.042 (ABNT, 2004) a AICV é composta de elementos obrigatórios e opcionais, da seguinte forma:

- a) *Classificação*: consiste no relacionamento qualitativo entre os aspectos identificados no ICV e as categorias de impacto às quais estes contribuem. É importante ressaltar que muitas vezes algum dos aspectos ambientais do ICV, principalmente algumas emissões de poluentes, podem contribuir para mais de uma categoria de impacto simultaneamente. Deve-se, portanto ter cuidado com o modo de realizar a classificação, evitando equívocos.
- b) *Caracterização*: a caracterização consiste na quantificação da classificação, ou seja, na determinação numérica de qual é a contribuição de cada aspecto a cada categoria de impacto. Este procedimento é feito por meio da conversão dos resultados do ICV em unidades comuns (através de fatores de equivalência, também conhecidos como fatores de caracterização), e posterior agregação de resultados, dentro de cada categoria de impacto (ABNT, 2004). Ao final da caracterização obtém-se um valor total de contribuição daquele ciclo de vida para cada categoria de impacto. Este resultado muitas vezes já é o suficiente para os propósitos da ACV, uma vez que permite conhecer, dentro das hipóteses admitidas, as contribuições do ciclo de vida do produto para as categorias de impacto.
- c) *Normalização*: tem por objetivo prover uma melhor avaliação da magnitude dos resultados da caracterização, calculando a representatividade dos valores encontrados em relação a um valor de

referência estabelecido para cada categoria de impacto. Alguns exemplos de valores de referência são: total das emissões (ou uso de recursos) de uma determinada área (país, região, etc) em um ano, ou o mesmo per capita, ou ainda um cenário de referência, elaborado a partir do uso de uma alternativa ao sistema de produto avaliado (comparação entre alternativas) (ABNT, 2001).

d) *Agrupamento*: nada mais é do que uma reordenação da apresentação das categorias de impacto. Basicamente, segundo a norma NBR ISO 14.040 (ABNT, 2001), há duas maneiras de realizar este processo:

d.1) ordenação das categorias de acordo com seu “tipo”, ou seja, em “efeitos sobre o meio físico”, “efeitos sobre o meio biótico”, “consumo de recursos não-renováveis”, entre outros;

d.2) hierarquização das categorias segundo o critério não numérico da ordem de importância (ex: alta, média e baixa importância), o que evidentemente subentende um julgamento de valores. Este procedimento já é um encaminhamento para uma interpretação para a tomada de decisões, e deve ser coerente com os objetivos e escopo do estudo. Cada instituição ou grupo social tem valores e preferências distintos, e, portanto em cada situação onde for pesquisado pode haver diferentes hierarquizações, sendo muito importante determinar, também em função do objetivo e escopo, como esta será desenvolvida (ABNT, 2004);

e) *Valoração (ou ponderação)*: consiste em determinar uma ponderação das categorias de impacto, ou seja, escolher um “peso” relativo entre estas. Dependendo da posterior agregação, essa etapa pode ser útil para converter os valores da normalização de modo a expressar numericamente a preferência ou para agregar as categorias de impacto de modo ponderado formando um único indicador do desempenho ambiental do sistema de produto.

A Figura 6, adaptada da NBR ISO 14042 (ABNT, 2004), mostra os elementos que constituem as etapas da AICV.

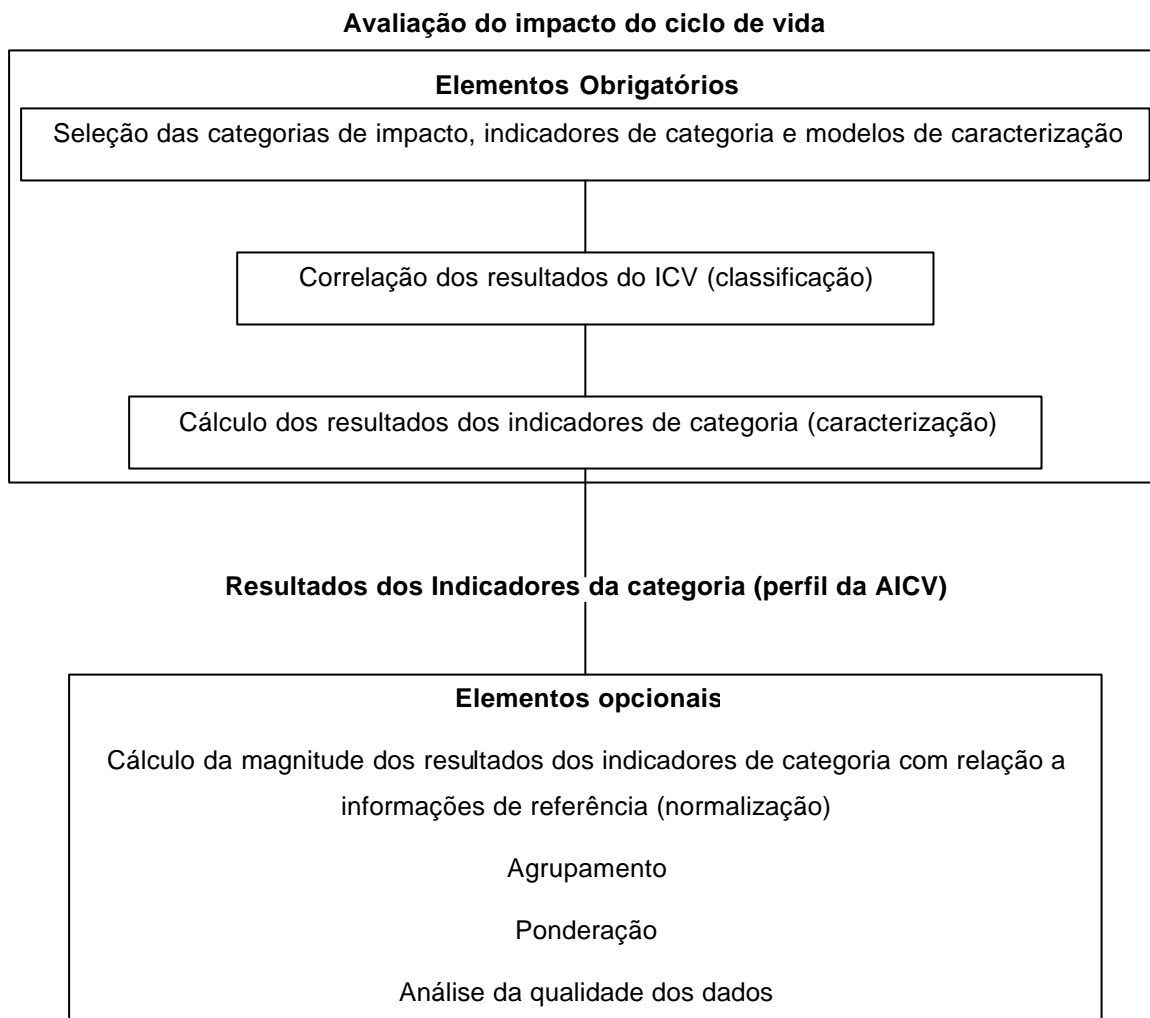


FIGURA 6 – ETAPAS DA AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO CICLO DE VIDA CONFORME A NBR ISO 14042

FONTE: ABNT, (2004)

Além disso, a AICV representa um processo qualitativo/quantitativo de entendimento e avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais baseado nos resultados obtidos na análise do inventário. O nível de detalhe, escolha dos impactos a serem avaliados e a metodologia utilizada dependem do objetivo e escopo do estudo. As principais categorias de impacto listadas por CHEHEBE (1998), são o esgotamento de fontes não renováveis; aquecimento global; redução da camada de ozônio; toxicidade humana; ecotoxicidade; acidificação; oxidantes fotoquímicos; e nitrificação (eutrofização). A Tabela 3 correlaciona as categorias de impactos com os fluxos da ACV, com as entradas e as saídas segundo WEIDEMA (1997).

A NBR ISO 14042 (ABNT, 2004) cita que a AICV pode ser usada para:

- a) Identificar oportunidades de melhoria no sistema de produto e auxiliar na sua priorização;
- b) Caracterizar ou servir de referência para um sistema de produtos e seus processos elementares ao longo do tempo;
- c) Efetuar comparações relativas entre sistemas de produtos com base em indicadores de categoria selecionados;
- d) Indicar questões ambientais para as quais outras técnicas podem fornecer dados ambientais complementares e informações úteis para a tomada de decisão.

TABELA 3 – CATEGORIA DE IMPACTOS AMBIENTAIS RELACIONADAS A ESTUDOS DE ACV

<b>Categorias de impactos relacionadas aos fluxos</b>	
<b>Categorias relacionadas às entradas (inputs)</b>	<b>Categorias relacionadas às saídas (outputs)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo de recursos energéticos;</li> <li>• Redução de recursos, incluindo recursos genéticos, culturais e aqueles relativos à paisagem.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aquecimento global;</li> <li>• Redução da camada de ozônio;</li> <li>• Impactos toxicológicos na saúde humana;</li> <li>• Impactos ecotóxicos;</li> <li>• Formação de fotooxidantes;</li> <li>• Acidificação;</li> <li>• Eutrofização;</li> <li>• Incômodos, incluindo odores, barulho, vibrações e impactos visuais.</li> </ul>
<b>Categorias de impacto independentes dos fluxos</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bem estar das pessoas, incluindo acidentes e aspectos relacionados à saúde ocupacional;</li> <li>• Bem estar de animais domésticos ou de laboratórios;</li> <li>• Bem estar social.</li> </ul>	

FONTE: WEIDEMA, (1997)

Conforme SILVA (2005) os conceitos e métodos de avaliação de impactos ambientais atuais continuam em fase de desenvolvimento, ressaltando-se que até o momento, nenhum acordo internacional sobre metodologias específicas encontra-se consolidado. Para facilitar a interpretação dos dados, métodos para a avaliação de impactos têm sido desenvolvidos, cabendo citar: o *Eco-indicator 99*; *CML method 92*; *Ecopoints 97*; e o *EPS 2000* dentre outros, usualmente disponibilizados por vários softwares de apoio à análise do ciclo de vida. A Tabela 4 indica algumas características de cada método de AICV.

GOEDKOOOP (2005) cita que em países da América Latina é aceitável esperar que talvez haja outras categorias de impacto mais importantes relacionadas aos sistemas de produto. O mesmo autor sugeriu uma lista com algumas categorias importantes (não obrigatórias) para a América Latina como um todo.

TABELA 4 – MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

<b>Métodos</b>	<b>Características</b>
<i>Eco-indicator 99</i>	A pontuação fornecida pelo <i>Eco-indicator 99</i> baseia-se na metodologia de avaliação de impactos que transforma os dados da planilha de inventário em pontuações de dano. De acordo com as necessidades e escolha do usuário, os dados podem ser agregados em categorias de danos como recursos (combustíveis fósseis e minerais), qualidade dos ecossistemas (acidificação/eutrofização, ecotoxicidade e uso do solo) e saúde humana (liberação de compostos orgânicos e inorgânicos respiráveis, radiação, mudança climática, depleção da camada de ozônio e emissão de substâncias carcinogênicas), ou em uma pontuação única;
<i>CML method 92</i>	Método desenvolvido pelo <i>Centre for Environmental Science of Leiden University</i> (CML), tendo por princípio, a utilização de indicadores referenciais. Os resultados do inventário são convertidos a partir de fatores de caracterização ou equivalência, sendo posteriormente normalizados em relação a uma base de referência, gerando um único indexador dos impactos ambientais por classe de impacto, seguida de um índice ambiental para o sistema;
<i>Ecopoints 97</i>	Este método baseia-se no princípio da distância até o alvo. A distância entre o nível atual de um impacto e o nível alvo indica a gravidade da contribuição de uma determinada emissão.
<i>EPS 2000</i>	Neste método, calcula-se a cadeia completa de causa e efeito de cada impacto sobre o equivalente humano

FONTE: SILVA, (2005)



GOEDKOOOP (2005) alega que as categorias de impacto seguintes precisarão ser mais bem estudadas e se possível e pertinente, outras precisam ser acrescentadas à lista:

- a) Mudanças no uso do solo devido a sistemas de produção, especialmente relativa à gestão de floresta e, por exemplo, plantações;
- b) Efeitos de salinização devido à irrigação e a drenagem de minérios; - Erosão;
- c) Extração de água de rios e solos;
- d) Diminuição de solos devido a falta de fertilização; na realidade este é o inverso do problema da eutrofização na Europa;
- e) Os impactos de substâncias orgânicas de degradação rápida em água (alta DBO ou DQO). Tradicionalmente não são levados em conta demanda biológica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) em ACVs europeias, pois estas substâncias são bem reguladas.

Na Tabela 5, estão apresentadas as categorias de impacto consideradas em alguns métodos de AICV, incluindo o Eco-indicator 99, segundo PEGORARO et. al (2007). É importante notar que algumas delas são igualmente consideradas na maioria dos métodos avaliados, como a mudança climática, a acidificação e a eutrofização, enquanto outras são limitadas a alguns métodos, como expectativa de vida, desertificação e uso de água.

TABELA 5 – EXEMPLOS DE CATEGORIAS DE IMPACTO POR ALGUNS MÉTODOS DE AICV

Área de proteção	Categoria de impacto	EPS (1999) <sup>(A)</sup>	EI 99 (2001) <sup>(B)</sup>	TRACI (2002) <sup>(C)</sup>	Impact 2002+ <sup>(D)</sup>	LIME (2003) <sup>(E)</sup>	Handbook LCA (2001) <sup>(F)</sup>
Saúde Humana	Expectativa de vida	X					
	Morbidez e Morbidez severa e sofrimento	X					
	Incômodo (doença ligeira)	X					
	Cancerígenos		X	X	X		
	Não-cancerígenos			X	X		
	Toxicidade humana					X	X
	Contaminação atmosférica urbana					X	
	Efeitos respiratórios		X		X		
	Material particulado			X			
	Mudança climática		X		X		X
	Aquecimento global			X	X	X	
	Diminuição da camada de ozônio			X	X	X	X
	Oxidação fotoquímica (NOx e VOCs)			X	X	X	X
	Radiação ionizante		X		X		X
Odor (mal cheirosos) na água; ar						X	
Qualidade do ecossistema	Ecotoxicidade: aquática de água doce; de sedimento de água doce; aquática de água do mar; de sedimento marinho; e, terrestre		X <sup>(1)</sup>	X	X <sup>(2)</sup>	X	X
	Acidificação		X	X	X	X	X
	Eutrofização		X	X	X	X	X
	Uso e ocupação do solo		X		X	X <sup>(3)</sup>	
	Extinção de espécies	X		X			
	Capacidade de produção do ecossistema: Colheita / plantação; Madeira; Peixe e carne; Acidificação do solo; Água para irrigação, e Água para beber.	X					
Recursos	Dessecação						X
	Extração de minerais		X		X		
	Extração ou uso de combustíveis fósseis ou não renováveis	X	X	X	X		
Água	Diminuição de recursos (abióticos) e (bióticos)	X				X	X
	Uso da água			X			
Resíduos	Resíduos					X	
Calor	Calor						X
Cultura	Mudança em valores de recreação e cultural	X					
Acidentes	Acidentes						X
Ruído	Ruído						X

**NOTA:** (1) No EI99 (Ecoindicator 99) consideram-se efeitos causados por emissões ecotóxicas no ar, água e solos industrial e agrícola. (2) No Impact 2002+ a categoria de impacto ecotoxicidade é somente dividida em aquática e terrestre. (3) No LIME os impactos do uso do solo são divididos em competição do uso; perda de função de suporte a vida; e, perda de biodiversidade.

FONTE: PEGORARO et al. (2007).

2.1.3.1. ECO-INDICADOR 99

Vários métodos foram desenvolvidos para analisar os impactos ambientais de serviços, produtos e atividades. Cada um apresenta um indicador de impacto diferente como resultado. Dentre os vários modelos pode-se citar o *Eco-indicador 95* e o *Eco-indicador 99* (LUO, WIROJANAGUD, CAUDILL, 2001).

O Eco-indicador (95 ou 99), é um método que de AICV de danos (PEGORARO, 2008). A Figura 7 apresenta a metodologia do Eco-Indicador 95 desde o impacto até o resultado final, e demonstrando a subjetividade no cálculo do impacto GOEDKOOOP; SPRIENSMA, (2001).

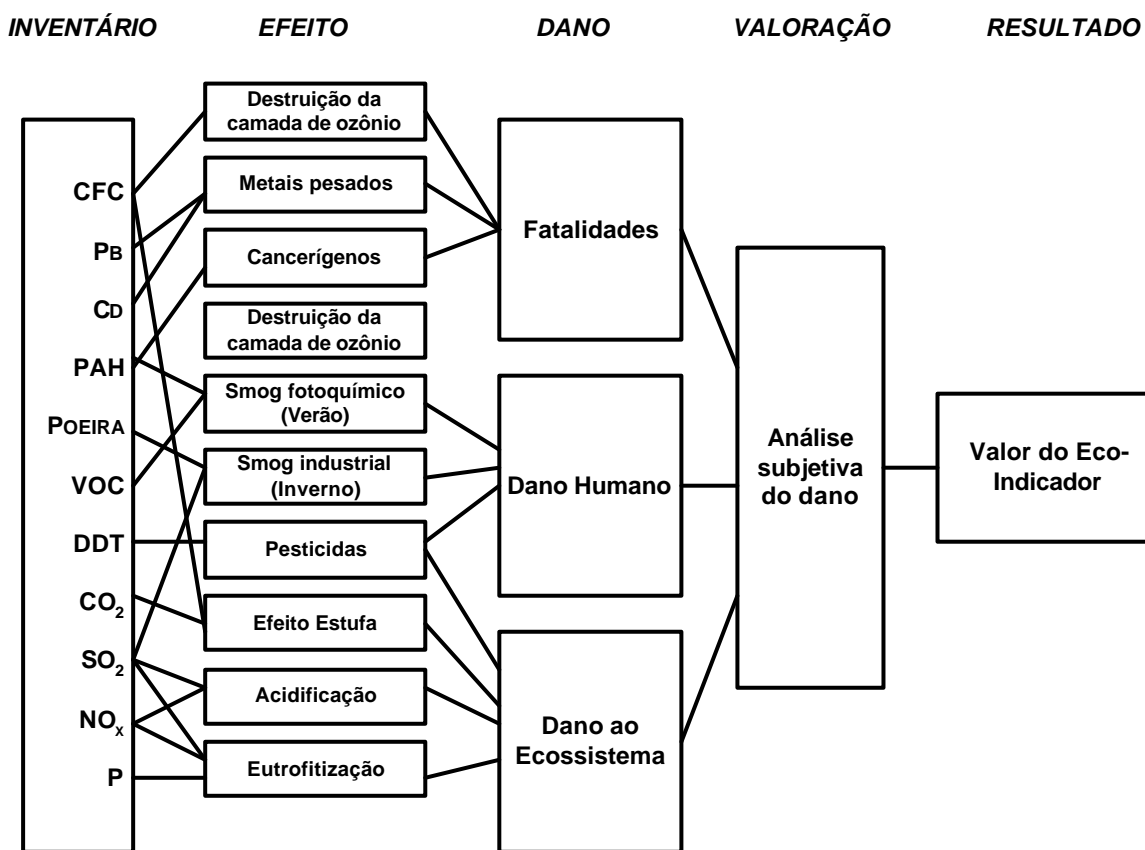


FIGURA 7 – METODOLOGIA DO ECO-INDICADOR 95  
 FONTE: GOEDKOOOP; SPRIENSMA, (2001)

Conforme GOEDKOOOP, SPRIENSMA, (2001), o Eco-indicador 99 é uma versão atualizada e melhorada da metodologia do Eco-indicador 95. O Eco-indicador 99 é fundamentado em uma metodologia que utiliza os danos orientados (*endpoints*). Três tipos dos danos ambientais foram considerados: ao ecossistema, à saúde humana e aos recursos humanos.

No Eco-indicador 95, um único valor é calculado baseado nos dados do impacto de um estudo do inventário do ciclo de vida combinado com as técnicas de pesos para os diferentes impactos ambientais (GOEDKOOOP; SPRIENSMA, 2001).

A estrutura do *Eco-indicator 99* está baseada no conceito de eco-indicadores, que envolve a *caracterização* dos efeitos ambientais, a *avaliação dos danos ambientais* sobre a saúde humana, a qualidade dos ecossistemas e degradação dos recursos naturais, a *normalização*, e a *valoração* dos impactos ambientais (GOEDKOOOP; SPRIENSMA, 2001).

O Eco-indicador é expresso nos pontos finais (mPts) pela unidade funcional. Para materiais esta unidade funcional é o quilograma.

A Figura 8 ilustra as etapas do Eco-indicador 99 para a obtenção do indicador ambiental.

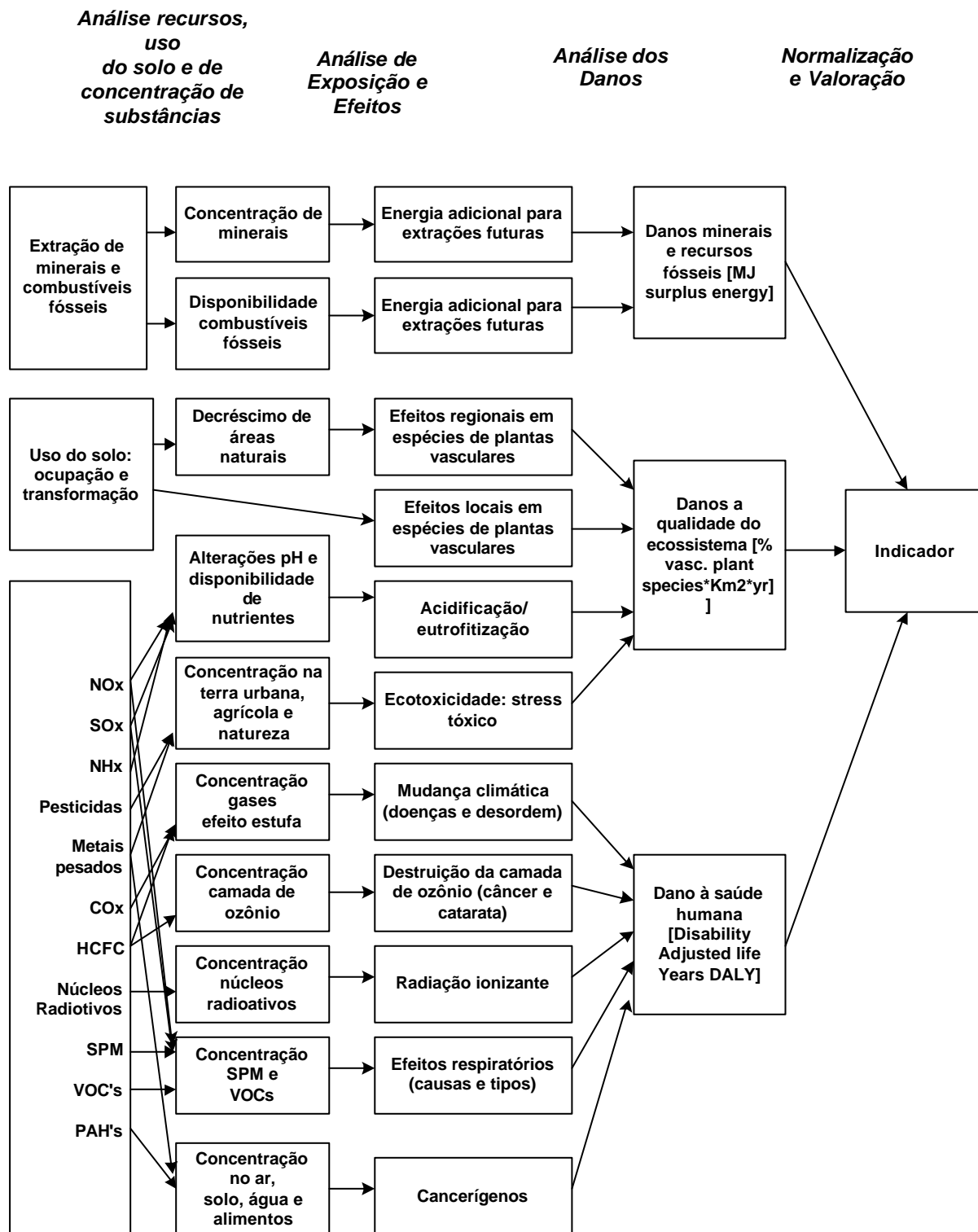


FIGURA 8 – METODOLOGIA DO ECO-INDICADOR 99

FONTE: GOEDKOOOP; SPRIENSMA, (2001)

Segundo GOEDKOOP e SPRIENSMA (2001), o Eco-indicador-99 é ponderado somando as três classes dos danos mostradas na Tabela 6:

TABELA 6 – CLASSE DOS DANOS NO ECO-INDICADOR 99

<b>Danos à saúde humana</b>	Nesta categoria são incluídas o número e a duração dos efeitos, fatalidades e incapacitações advindas de causas ambientais. Os danos são expressos em <i>DALY (Disability Adjusted Life Years)</i> utilizando o <i>Years Lived Disabled (YLD)</i> e o <i>Years of Life Lost (YLL)</i> . A modelagem de emissões é realizada a partir de análises de concentração ( <i>fate analysis</i> ), exposição ( <i>exposure analysis</i> ), análises de efeitos ( <i>effect analysis</i> ) e finalmente, de danos ambientais ( <i>damage analysis</i> ).
<b>Danos à Qualidade do Ecossistema</b>	Os danos sobre a qualidade dos ecossistemas incluem os efeitos sobre a completa e irreversível extinção de espécies, assim como o reversível ou irreversível desaparecimento de espécies de uma certa região, durante um período de tempo.
<b>Danos aos Recursos</b>	Os impactos desta categoria são quantificados em relação à energia necessária para futuras extrações de recursos minerais e combustíveis fósseis e expressos em <i>MJ Surplus Energy</i> por kg de material extraído. O uso de recursos bióticos (agricultura e silvicultura) e de extração de recursos minerais como argila, areia, dentre outros, são cobertos pela classe de uso do solo. Recursos bióticos como peixes e caças não são modeladas pelo <i>Eco-indicador 99</i> .

FONTE: GOEDKOOP, SPRIENSMA, (2001).

Os modelos dos danos à **Saúde Humana** foram desenvolvidos para efeitos respiratórios e os efeitos cancerígenos, os efeitos do climáticos, a radiação iônica e a redução da camada de ozônio.

- a) **Cancerígenos**, são os danos à saúde humana como resultado de uma emissão de todas as substâncias classificadas nos grupos IARC (*International Agency for Research on Cancer*) 1, 2A, 2B e 3 para os que se encontram disponíveis na informação necessária sobre características psico-químicas e cancerígenos;
- b) **Os efeitos respiratórios (orgânicos e inorgânicos)**: são os danos à saúde humana como resultado das emissões de poeiras, orgânicas e não-orgânicas substâncias relacionadas aos problemas respiratórios.
- c) **A radiação iônica**: são os danos à saúde humana - relacionada às emissões rotineiras da substância radioativa ao meio ambiente.
- d) **A redução da camada de ozônio**: são os danos à saúde humana - relacionada ao aumento da radiação ultravioleta da terra causada pelo destruição da camada de ozônio aumentando o buraco.

Os danos à categoria da **Qualidade do Ecossistema** infelizmente não são tão homogêneos quanto a definição da saúde humana. Consiste:

- a) **Ecotoxicidade:** expressa os danos causados em espécies expostas à concentração de substâncias tóxicas. Os efeitos são calculados em *Potentially Affected Fraction* (PAF), com base em dados de toxicidade para organismos terrestres e aquáticos como microorganismos, plantas, algas, anfíbios, moluscos, crustáceos, peixes e uma diversidade de plantas;
- b) **O uso, ocupação e transformação da terra:** utiliza o *Potentially Disappeared Fraction of Plant Species* (PDF\*m<sup>2</sup>\*yr) como indicador. A modelagem dos danos sobre o decréscimo de espécies utiliza modelos distintos que visam calcular os efeitos locais da ocupação e conversão do solo de uma área natural em um complexo industrial, assim como os efeitos regionais da ocupação e conversão do solo. Os efeitos ambientais associados à utilização direta de pesticidas em solos agrícolas e/ou liberados para o ar ou água durante a aplicação devem ser inventariados e avaliados
- c) **Acidificação/eutrofização:** não é possível aplicar diretamente o conceito de PAF, tendo em vista que estes efeitos são causados por mecanismos bioquímicos distintos e complexos. O *Potentially Disappeared Fraction of Plant Species* (PDF) é utilizado para expressar o acréscimo ou decréscimo de espécies a partir da deposição de emissões aéreas como o NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e NH<sub>3</sub>, com influência negativa sobre os ecossistemas aquáticos. No estágio atual de desenvolvimento, este método ainda não inclui os efeitos advindos da concentração de fosfato (PO<sub>4</sub>) ou outras emissões para rios e lagos;

Os danos aos **Recursos** são expressos como a energia necessária para a mineração futura dos recursos (MÜLLER-WENK, 1998). Uma distinção entre minerais e combustíveis fósseis pode ser feita:

- a) **Os minerais:** calculam-se usando os modelos geo-estatísticos que relacionam a disponibilidade dos recursos e a sua concentração.
- b) **Os combustíveis fósseis:** são o total excessivo da energia baseado no uso futuro do petróleo extraído das areias de piche (CAMPBELL, 1998).

Conforme GOEDKOOOP; SPRIENSMA (2001), o *Eco-indicator 99*, considera na valoração dos impactos ambientais, a influência dos valores culturais e conseqüentemente, das preferências individuais sobre os resultados e na conseqüente hierarquização dos impactos ambientais. Com base em fundamentos sociológicos, filosóficos e psicológicos diferenciados, as perspectivas individualista (I), igualitária (E) e hierárquica (H), fundamentadas na *Teoria Cultural* e, freqüentemente utilizadas em ciências sociais, podem ser adotadas, estando caracterizadas por distintos critérios e pesos para a valoração dos impactos ambientais, retratado tanto na caracterização quanto na ponderação.

HOFSTETTER et al., (1999) cita que a avaliação do impacto do ciclo de vida tem que lidar com três campos do conhecimento científico. O autor refere-se a três campos como esferas:

- a) Tecnosfera: a descrição do ciclo de vida, as emissões provenientes dos processos, o procedimento de alocação como a medida em que se baseiam em relações causais.
- b) Ecosfera: a modelagem das mudanças (danos) que são infligidos ao meio ambiente.
- c) Valoresfera: a modelagem das percepções de gravidade dessas alterações (danos), bem como a gestão de modelização da escolha que são feitas na Tecno e na Ecoesfera.

A Figura 9 mostra o conceito do núcleo do *Eco-indicator 99*.



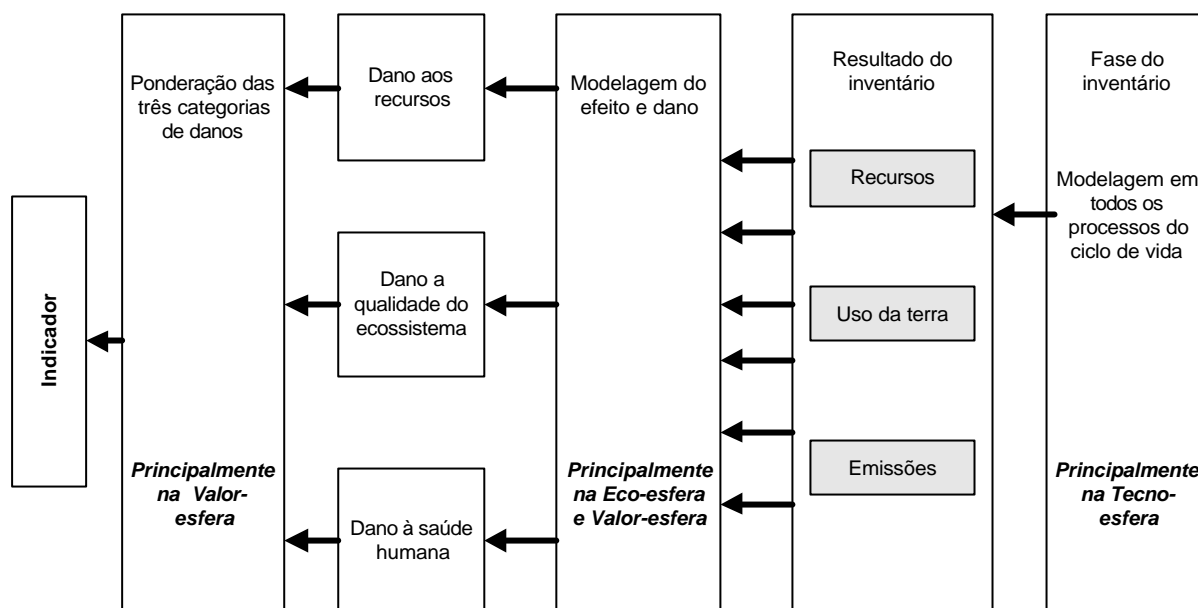


FIGURA 9 – CONCEITO DO NÚCLEO DO ECO-INDICATOR 99

FONTE: GOEDKOOP; SPRIENSMA, (2001)

### 2.1.4 Interpretação

A fase final da ACV é a interpretação, na qual é um procedimento de identificação e análise dos resultados obtidos nas fases de inventário e/ou avaliação de impacto de acordo com o objetivo e o escopo previamente definidos para o estudo. Os resultados dessa fase podem tomar a forma de conclusões e recomendações aos tomadores de decisões (ABNT, 2001).

Além disso, a fase de Interpretação é realizada em interação com as outras três fases da ACV.

A conclusão final na fase de interpretação consiste em uma ou mais recomendações para melhoria, ou a recomendação de substituição por outro produto. Nesta fase, em complemento à informação ambiental, outros aspectos podem ser incluídos, como argumentos técnicos ou econômicos para escolha de diferentes possibilidades de melhoria de determinado processo. Porém, os resultados da ACV devem ser interpretados em função do objetivo principal do estudo (ABNT, 2001).

## 2.2 EMERGIA

### 2.2.1 Histórico da Emergia

Em 1896, Ludwig Boltzman (1844-1906), na Academia Imperial de Ciências de Viena, enunciou que a “luta pela vida” travava-se no campo da luta pela disponibilidade energética, ou seja, que o sucesso de todas as espécies, assim como a espécie humana, poderia ser analisado em termos de aprendizado do uso das fontes energéticas. Ludwig Boltzman influenciou diretamente Lotka que por sua vez formulou a base teórica da Ecologia de Sistemas, proposta por Howard Odum. O conceito, introduzido por Boltzman, é o primeiro que procura relacionar as leis termodinâmicas com a evolução das espécies (MARTINEZ-ALIER, 1994).

No fim do século XIX e início do XX, Wilhelm Ostwald (1853 - 1932) postulou que todas as transformações energéticas possíveis estavam associadas à transformação máxima em um dado período de tempo (ODUM, 1994). Este autor também deu inspiração a Lotka, que estabeleceu os princípios que motivaram H.T.Odum e R.C. Pinkerton (1955) a propor seus postulados.

O princípio clássico que correlaciona energia e a teoria da evolução - proposta por Charles Darwin, com base na seleção natural - foi elaborado por Alfred Lotka (1880 - 1949). Em 1925, Lotka postulou a existência da relação direta entre as leis da termodinâmica e a evolução das espécies. Segundo este pesquisador, todo o excedente de energia disponível que fosse utilizado de forma adequada por qualquer espécie, na sua reprodução, representaria vantagens adaptativas que possibilitariam a ampliação de sua população. Entende-se aqui por excedente de energia disponível, aquela presente no sistema que não está sendo empregada por nenhum dos componentes do mesmo, ou seja, a energia que possui potencial de utilização, mas que não foi devidamente apropriada por qualquer população. Esta formulação entendeu como teoria da evolução o sucesso reprodutivo das espécies, que é baseada na lei de energia máxima ou fluxo máximo de energia em sistemas biológicos (MARTINEZ-ALIER, 1994; ODUM, 1988).

A teoria de H.T. Odum e Pinkerton, de 1955, postulava que a baixa eficiência da natureza em transferir energia é uma conseqüência da tendência para a maximização da potência de saída do sistema (Princípio da Máxima Potência), ao

invés da eficiência máxima da utilização da energia em si (ODUM, 1968; ODUM, 1994).

H.T. Odum e E.P. Odum demonstraram que as regras gerais mais importantes dos ecossistemas poderiam ser deduzidas através das medidas do metabolismo de uma comunidade, sem a necessidade de informações detalhadas sobre todos os componentes de sua população. Estes pesquisadores também foram os responsáveis pela introdução do diagrama de fluxo de energia, derivado da física e engenharia, o qual aprimorou-se ao longo dos anos (ODUM, 1968).

Nos anos 1950 H.T. Odum começou a desenvolver o conceito de Emergia, quando ele e seu irmão, E.P. Odum identificaram a importância energética para a ecologia (ODUM, 1953). Subseqüentemente, os irmãos perceberam a importância da qualidade da energia e da necessidade de usar "*um denominador comum para fluxos da energia de diferentes tipos*". Deste conceito, H.T. Odum estendeu o conceito original como o "Princípio da Máxima Potência", e desenvolveu uma linguagem dos sistemas de energia para a termodinâmica de sistemas abertos. Passados os anos, a emergia tornou-se o conceito dominante deste trabalho. Por volta dos anos 1970, durante a crise de energia, e enquanto a humanidade se tornou mais ciente do impacto negativo de atividades industriais nos ecossistemas, H.T. Odum já havia reconhecido o papel crítico da influência dos ecossistemas na economia global.

O conceito de *emergia* passou por uma evolução, procurando a melhor forma de quantificar e definir a energia dentro dos sistemas. Entre os anos de 1967 e 1971, os tipos de energia de alta qualidade eram expressos em unidades de matéria orgânica (base seca) incluindo madeira, carvão, gás natural e biomassa. No período de 1973 e 1980, as quantidades energéticas de plantas, madeiras e combustíveis fósseis foram diferenciadas. Os cálculos e comparações eram feitos com base em combustíveis fósseis, como o carvão.

Entre os anos de 1980 e 1982, estudos reconheceram a contribuição dos fenômenos atmosféricos, como a chuva, o vento e as ondas do mar como expressões da energia solar para a produtividade terrestre. A partir de 1983, há o reconhecimento de que a energia solar apresentava-se como uma base adequada para a representação dos processos globais de transformação.

Antes de 1983, energia era denominada “energia incorporada” e transformidade era denominada “razão de transformação energética” ou “fator de qualidade” (ODUM,1996).

Logo, a grande parte da teoria de análise emergética foi desenvolvida por H.T. Odum sobre funcionamento da Ecologia de Sistemas e de outros processos. Esta teoria explica como os sistemas sobrevivem e se organizam nas hierarquias usando a energia na eficiência que gera a Máxima Potência (ODUM; ODUM, 1981). Com isso, os estudos de Odum, fundamentaram e aprimoraram o conceito de “*Princípio da Máxima Potência*” como uma hipótese geral dos sistemas durante toda a sua carreira.

#### **2.2.1.1. O Princípio da Máxima Potência**

O Princípio da Máxima Potência indica porque certos modelos de organização de sistemas sobrevivem e outros não. O princípio explica porquê sistemas de êxito possuem redes de organização parecidos. Um projeto que teve êxito é aquele que sobreviveu à prova do tempo. O princípio, segundo ODUM (1996), são “*esquemas de sistemas que sobrevivem são aqueles organizados de tal modo, que trazem energia para si o mais rápido possível e utilizam essa energia para se retroalimentar e trazer mais energia*”.

Os esquemas de sistemas que maximizam o poder de transformar energia em produtos de alta qualidade são aqueles que se retroalimentam para ajudar a ganhar mais energia, e a usam o mais eficientemente possível sem que o processo reduza o ritmo de sua atividade. Diagramas de ecossistemas, como a Figura 10, apresenta o exemplo de retroalimentação que aumentam o processo de produção.

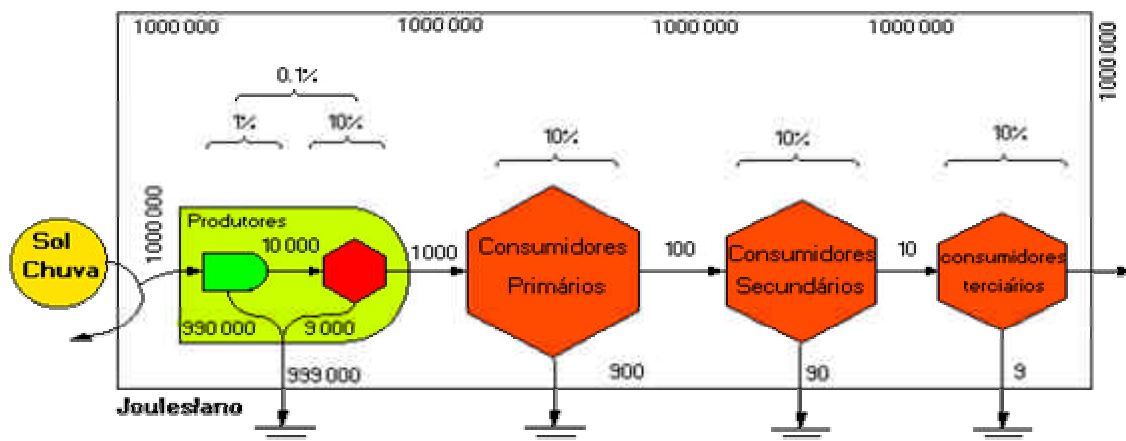


FIGURA 10 – EXEMPLO DO PRINCÍPIO DA MÁXIMA POTÊNCIA  
 FONTE: ORTEGA et al., (2003b)

Os sistemas que maximizam a potência também são sistemas que retroalimentam a um sistema maior, do qual fazem parte (ULGIATI; ODUM; BASTIANONI; 1994). Por exemplo, as espécies em um ecossistema estão organizadas para serem parcialmente responsáveis pelo uso de todo o sistema de energia. Em sistemas grandes, como a floresta, uma árvore usa energia solar para que suas folhas aumentem em tamanho e em número, e possam captar mais energia do sol. O processo da árvore auxilia o sistema da floresta, produzindo nutrientes, construindo um micro-clima estável, reciclando nutrientes e proporcionando comida aos animais. Assim, a árvore maximiza ambos: sua própria potência e a potência de um sistema maior ao qual pertence (ORTEGA et al., 2003b).

Para maximizar a potência em uma atividade econômica, recursos locais são usados e modificados por recursos adicionais (ODUM, 1996). Por exemplo, considerando uma fazenda na qual a safra é plantada na melhor época do ano. Os melhores fertilizantes são utilizados e quando a safra for colhida, as pessoas a comprarão. Esta fazenda produzirá suficiente retorno financeiro para que o fazendeiro viva bem e mantenha o solo e repita o processo ano a ano. Ele também poderá expandir seu sistema comprando fazendas menos eficientes. Os êxitos da administração da fazenda sobreviverão e serão copiadas por outros fazendeiros. Devido a que seu trabalho ajuda a incrementar o consumo da energia de toda a economia, este comportamento é sustentado pela economia e sobrevive (ORTEGA, 2003a).

Durante o tempo de abastecimento abundante de energia, maximizar o crescimento, maximiza a potência. Assim, durante as etapas iniciais da seqüência, as comunidades incrementam sua biomassa rapidamente (ORTEGA, 2003b).

Quando o abastecimento de energia é estável, máxima potência significa menos competição e um aumento na diversidade e eficiência. Como são os recursos energéticos que se tornam limitantes, o desenvolvimento da eficiência através da diversidade maximiza a potência útil. Em uma floresta madura, cada organismo tem seu nicho e há pouca competição. Os organismos tendem a cooperar entre si em lugar de competir. Em um sistema econômico maduro a cooperação também é mais comum que a competição. É de esperar, então, que quando os combustíveis fósseis estejam acabando e os países corram atrás de fontes alternativas de energia, a tendência de expansão e crescimento entre eles irá diminuir. As relações entre as nações serão, então, mais pacíficas (ODUM, 1996).

### 2.2.2 Conceitos de Energia

ORTEGA (2003b) denomina que *sistema*, é o conjunto de elementos com atributos e funções específicas, que interagem entre si e com o meio externo de forma organizada (natural ou artificialmente), conformando assim um ente funcional. Todos os sistemas podem estar sujeitos a forças externas e/ou possuem estoques internos que poderão ser aproveitados como fonte de energia; possuem elementos que interagem entre si e criam uma coesão interna; podem produzir algum trabalho, matéria, bem ou serviço; armazenam energia (matéria e informação em alguns casos); exercem alguma influência no meio em que atuam e dissipam calor e materiais.

Visando a elucidação dos temas que serão abordados a seguir, os quais fundamentam-se na análise energética, lançou-se mão de algumas definições necessárias à sua compreensão. A energia pode ser definida como a capacidade de realizar um trabalho, comum a todos os sistemas, sendo seu comportamento descrito segundo as Leis da Termodinâmica. É avaliada segundo parâmetros de medição indireta, ou seja, não há uma conceituação desta capacidade que não esteja relacionada com a mudança de estado de um dado material. Numa concepção mais abrangente, pode-se dizer que (ODUM, 1994) a “*Energia é uma*

*quantidade comum a todos os processos; pode entrar ou sair dos sistemas; pode ser armazenada nos mesmos, e pode ser transformada de uma forma em outra”.*

A energia é uma característica de toda a matéria, podendo ser usada como parâmetro de quantificação. Há diversas formas de energia, porém, todas podem ser transformadas em calor, que é medido a partir da variação da atividade molecular de um corpo. Esta transformação ocorre com 100% de eficiência, isto é, não há perda neste processo, proporcionando uma forma adequada de medir energia (ODUM, 1994).

Foi observado em diversos processos de transformação - principalmente nas máquinas a vapor – que a energia não era criada nem destruída, de acordo com seu equivalente calórico, ou seja, permanecia constante ao longo desse processo, dentro de um sistema isolado. A partir desta constatação, surgiu a Primeira Lei da Termodinâmica, denominada Lei da Conservação de Energia. Esta lei postula que a energia possui a propriedade de se transformar, porém não pode ser criada ou destruída. Esta propriedade é aplicável dentro de um sistema fechado, onde não haja perda ou ganho de energia externa. Esta lei não foi alterada em sua essência pela teoria da relatividade, pois a matéria pode ser transformada em energia, segundo uma constante, mantendo o princípio da conservação (BRANCO, 1989).

Segundo BRANCO (1989), a descoberta da Segunda Lei da Termodinâmica, em 1850, iniciou uma série de debates na comunidade científica da época.

Esta lei pode ser enunciada como: nenhum processo onde haja transformação de energia ocorrerá espontaneamente, a menos que haja uma degradação de energia de uma forma concentrada para uma forma dispersa. Esta lei também é denominada lei da degradação da energia e demonstra que, nas transformações térmicas, a energia vai sofrendo um processo de degradação qualitativa, irreversível e passível de medição, tornando impossível sua reutilização para trabalho mecânico (BRANCO, 1989; ODUM, 1988; e ODUM, 1994).

### **2.2.3 Descrição da Metodologia Emergética**

Os *diagramas sistêmicos* são utilizados para permitir uma melhor visão de cada componente do sistema. Esses componentes podem ser de origem natural, ou

seja, os recursos naturais renováveis e os não-renováveis, de origem econômica, divididos entre os materiais e os serviços, além da circulação do dinheiro entre o sistema. Nestes diagramas, os itens são organizados da esquerda para a direita de acordo com o valor da sua *transformidade*. Os da esquerda possuem valor de *transformidade* inferior aos da direita (ODUM, 1996).

A Figura 11 representa uma visão simplificada do funcionamento do planeta através de um diagrama sistêmico utilizado na metodologia emergética, conforme ORTEGA (2003a).

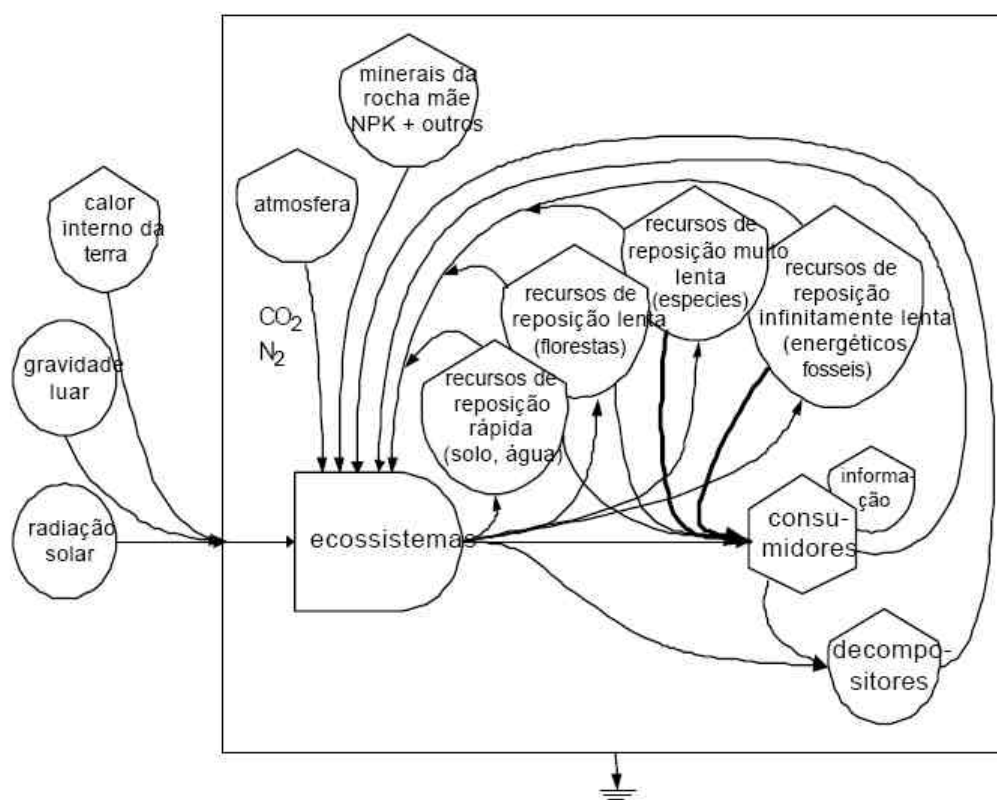


FIGURA 11 - DIAGRAMA DA VISÃO RESUMIDA DO FUNCIONAMENTO DO PLANETA  
 FONTE:ORTEGA, (2003a)

A Figura 12 indica os símbolos mais utilizados na linguagem de energia. Essa linguagem permite cálculos emergéticos, assim como modelagens e simulações para analisar o desempenho de processos ao longo do tempo.



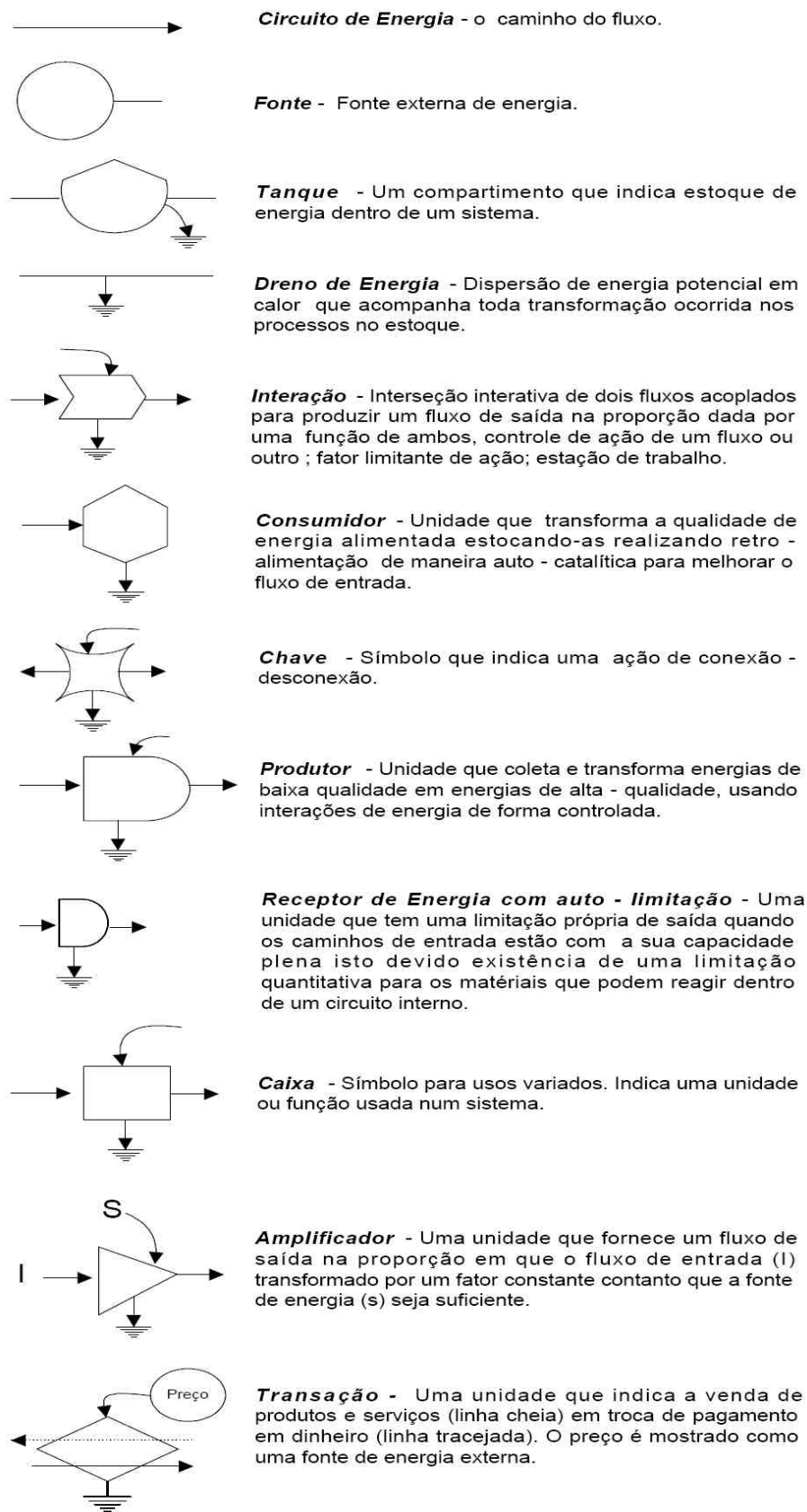


FIGURA 12 - SÍMBOLOS DA METODOLOGIA EMERGÉTICA  
 FONTE: ORTEGA, (2003a)

Os fluxos dos símbolos da Figura 12 podem representar energia, matéria, dinheiro, seres vivos, informação. Na Terra, dispõe-se de duas fontes básicas de energia: o estoque interno da biosfera e o fluxo de fontes externas à camada externa (ODUM, 1994). A cada símbolo corresponde uma função diferente e variável de estado com valores distintos. Os símbolos são unidos com flechas que indicam fluxos.

A metodologia emergética trata todos os fluxos (matéria, energia, dinheiro, informação) através de uma unidade comum denominada energia, ou energia solar incorporada em cada fluxo. Para tal é necessário transformar todos esses fluxos (kg, J, \$, bites) em energia solar (sej), usando o fator de conversão conhecido como transformidade um valor específico para cada fluxo. Um exemplo: requerem-se três Joules de carvão um emjoule de serviços para gerar um Joule de eletricidade, a transformidade da eletricidade obtida a partir de carvão é quatro emjoules por um Joule (ODUM,1996).

Na *metodologia emergética*, o Joule de energia de radiação solar equivalente da memória energética em cada produto e serviço (expresso emjoule solar ou sej) passa a ser a medida comum que unifica natureza, economia e cultura, descortinando a enorme e ramificada cadeia energética que une as partes do sistema (ORTEGA, 2003b)

Conforme ORTEGA (2003b), *emjoule* é a unidade de energia. Um Joule de energia disponível de um certo tipo de energia previamente usada para fazer um produto ou serviço.

Da definição de energia como a *memória da energia* ou a energia total incorporada em um produto, processo ou serviço, os indicadores que resultam da análise emergética refletem tanto a contribuição do sistema econômico como a do meio ambiente (BROWN; ULGIATI, 2002). A avaliação ambiental com base na análise emergética leva em conta a taxa de exploração de reservas naturais, o uso eficiente destas reservas e a capacidade de suporte do meio ambiente (ODUM, 1996).

O processo de avaliação de Energia inclui três passos, explicados resumidamente a seguir (ORTEGA, 2003a):

- (a) Análise dos fluxos emergéticos de entrada e saída do sistema de produção;
- (b) Obtenção dos índices emergéticos (serão detalhados posteriormente);
- (c) Interpretação dos índices emergéticos, indicando os esforços que devem ser feitos para aprimorar o sistema.

#### 2.2.4 Índices Emergéticos

A *transformidade* é um fator de conversão de energia que nos diz quanta energia de um tipo é necessária para produzir uma unidade de outro tipo de energia e pode ser expressa em outras unidades: sej/unidade monetária, sej/kg de produto, sej/kg de componente do produto, conforme a Equação 1. É também definida com a razão entre a energia mínima necessária para um ecossistema produzir um recurso e a energia final contida nos recursos produzidos. Ao analisar um sistema produtivo é necessário vinculá-lo aos sistemas que produzem seus insumos, os quais podem estar em outras regiões e, inclusive, em outros tempos. E esses tempos podem ser históricos ou geológicos. Por esta razão a energia tem como sinônimo "*memória energética*" (ODUM, 1996).

$$\text{Transformidade} = \frac{\text{Soma da energia necessária}}{\text{Valor calórico do produto}} = \frac{\text{energia}}{\text{energia calórica}} = \frac{\text{sej}}{\text{ano}} \quad \text{Eq. 1}$$

Logo, energia é toda a energia externa e interna, renovável ou não, da qual a biosfera se utiliza para produzir um recurso, seja natural ou antrópico (ORTEGA, 2003a). O princípio antrópico se divide em forte e fraco. O forte diz em linhas gerais que todo o comportamento do Universo se deu para resultar justamente no homem. O fraco diz que o Universo se comportou de forma a surgir o homem sem esse pleito pré-definido.

Os fluxos de energia provêm dos recursos naturais (renováveis e não renováveis) e da contribuição da economia (materiais e serviços). Também se contabiliza a energia dos produtos do sistema (ULGIATI; BROWN, 2002).

$$\text{Fluxo anual de energia} = \text{Fluxo anual de energia calórica} \times \text{transformidade} \quad \text{Eq. 2}$$

Os índices de energia permitem comparar as contribuições da Natureza e da Economia na composição do produto e medir, entre outros parâmetros, a sustentabilidade, o impacto ambiental e a capacidade de carga do ecossistema. O uso destes índices contribuirá para a elaboração de estratégias para obter os ajustes necessários ao “*Eco-Desenvolvimento*” (ORTEGA, 2003b).

Entre os principais itens de reconhecimento da análise emergética pode-se destacar o valor da biodiversidade; o valor da contribuição energética dos combustíveis fósseis à economia atual e a consciência energética do seu esgotamento; a limitação da capacidade de suporte da população humana dos diversos ecossistemas terrestres encoberta pela alta disponibilidade momentânea e forçada do petróleo; a necessidade de planejar o desenvolvimento sustentável (ORTEGA, 2003b).

As fontes de recursos que constituem determinado tipo de processo podem ser divididas em três categorias: *renováveis*, *não-renováveis* e *provenientes da economia*. Este desdobramento é essencial para o estudo emergético e a inter-relação do setor ou processo com o meio ambiente (ULGIATI e BROWN, 2002),

Os *recursos renováveis (R)* são extraídos do ambiente e possuem a capacidade de renovação temporal e espacial mais rápida que o seu consumo. Exemplos: a energia solar, energia dos ventos, energia da chuva, entre outros.

Os *recursos não-renováveis (N)* são armazenados na natureza, porém, seu consumo é mais rápido do que a sua capacidade de renovação. Exemplos: carvão, petróleo, florestas, água potável, entre outros.

Os *recursos provenientes da economia (F)* são referentes a bens e serviços ou a recursos provenientes de outras regiões fora dos limites do sistema estudado.

A Figura 13 mostra um diagrama simplificado em que são identificados os fluxos de entrada (*R*, *N* e *F*), fluxo do processo (*I*) e o fluxo de saída do produto (*Y*) (ULGIATI; BROWN, 2002; BROWN; BURANAKARN, 2003).

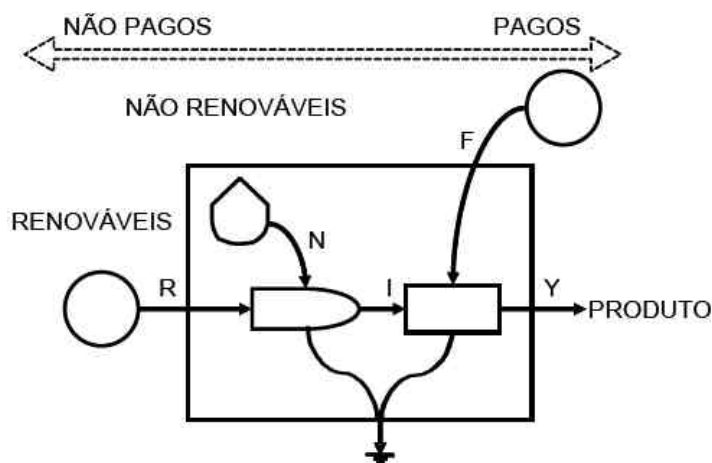


FIGURA 13 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DOS FLUXOS DE ENERGIA  
 FONTE: ULGIATI; BROWN, (2002)

A metodologia emergética fornece vários índices, nas quais temos, segundo ODUM (1996):

- a) *Eficiência Emergética (EYR)*: medida da contribuição dos recursos naturais frente aos recursos provenientes da economia. Portanto indica o grau da eficiência e da regeneração natural do processo analisado. Além disso, representa a Energia adicionada pelo sistema avaliado na economia regional. Portanto, quanto maior for este índice, maior é a eficiência natural do processo, mais regenerativo e menos dependente dos recursos econômicos;
- b) *Taxa de Investimento de Energia (EIR)*: é a razão entre a contribuição da economia ou Energia total dos recursos econômicos, que requerem dinheiro para sua aquisição, e a contribuição dos recursos naturais, quase sempre gratuitos. Este índice representa o investimento de materiais e de serviços da sociedade para produzir um bem, em relação à contribuição da natureza para essa produção. Pode ser visto, também, como o grau de dependência do sistema em relação aos recursos econômicos utilizados versus os naturais;
- c) *Carga Ambiental (ELR)*: é a proporção da Energia dos recursos não renováveis e os da Economia em relação à Energia dos renováveis. É calculada pela divisão do somatório da Energia dos recursos não-

renováveis e dos obtidos da economia pela Energia dos recursos renováveis;

d) *Renovabilidade (%R)*: indica a porcentagem de Energia utilizada no sistema que advém de recursos renováveis. Os sistemas com alto valor percentual de renovabilidade são menos dependentes da economia e de recursos não renováveis. Portanto, este índice expressa a razão de energia renovável usada em relação à energia total consumida do sistema;

e) *Sustentabilidade (SI)*: expressa a eficiência energética do processo analisado em relação à sua carga ambiental. A sustentabilidade do sistema é diretamente proporcional à eficiência energética e indiretamente proporcional à carga ambiental.

## 2.3 ANÁLISE ENERGÉTICA

### 2.3.1 Análise pela Primeira Lei da Termodinâmica

A análise de sistemas e processos pela Primeira Lei da Termodinâmica baseia-se na conservação da energia. As equações que representam os processos são ajustadas para volumes de controle com fluxos de massa e de energia em cada subsistema que os compõe.

A lei da conservação da massa, para um processo que ocorre em regime permanente, inclui somente a análise do fluxo de massa que está entrando e saindo do volume de controle, desconsiderando a variação de massa no interior do mesmo (MORAN; SHAPIRO, 2002).

Dessa forma, a Equação (3) indica que a taxa total do fluxo de massa entrando no volume do controle é igual à taxa total do fluxo de massa que sai do volume do controle:

$$\sum \dot{m}_s - \sum \dot{m}_e = 0 \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo:

$\dot{m}_e$  : vazão mássica entrando no volume de controle (kg/s );

$\dot{m}_s$  : vazão mássica saindo do volume de controle (kg/s).

Para um processo ocorrendo em regime permanente, a Primeira Lei da Termodinâmica pode ser escrita como (Eq. 4):

$$\dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + g \cdot z_e \right) - \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + g \cdot z_s \right) = 0 \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo:

$g$ : aceleração gravitacional (m/s<sup>2</sup>);

$h_e$ : entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg);

$h_s$ : entalpia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);

$\dot{Q}_{v.c.}$ : taxa de transferência de calor para (ou do) volume de controle (kW);

$v_e$ : velocidade do fluxo de massa na entrada do volume de controle (m/s);

$v_s$ : velocidade do fluxo de massa na saída do volume de controle (m/s);

$\dot{W}_{v.c.}$ : potência desenvolvida (ou requerida) pelo volume de controle (kW);

$z_e$ : cota na entrada do volume de controle em relação a uma referência (m);

$z_s$ : cota na saída do volume de controle em relação a uma referência (m).

Considerando desprezíveis as variações de energia cinética e potencial, a Equação 5 pode ser reescrita na seguinte forma (BEJAN, 1988):

$$\sum_j \dot{Q}_j + \dot{Q}_o + \sum_e \dot{m}_e h_e = \dot{W}_{v.c.} + \sum_s \dot{m}_s h_s \quad \text{Eq. 5}$$

### 2.3.2 Análise pela Segunda Lei da Termodinâmica

A Segunda Lei da Termodinâmica para um volume de controle, considerando o processo em regime permanente, pode ser representada pela Equação 6 :

$$\dot{S}_{v.c.} + \sum \left( \frac{\dot{Q}_{v.c.i}}{T_i} \right) + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s = 0 \quad \text{Eq. 6}$$

sendo:

$s_e$ : entropia específica na entrada do volume de controle (kJ/kgK);

$s_s$ : entropia específica na saída do volume de controle (kJ/kgK);

$T_i$ : temperatura superficial do volume de controle (K);

$\dot{S}_{ger, v.c.}$ : taxa de geração de entropia no volume de controle (kW/K).

A entropia pode ser utilizada para prever se um processo qualquer que envolve interações de energia pode, de fato, ocorrer ou, ainda, se as direções dos processos de interações de energia são factíveis. Também se pode dizer que a Segunda Lei da Termodinâmica governa os limites de conversão entre diferentes formas de energia (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1997).

## 2.4 Análise Exergética

### 2.4.1 Conceito de Exergia

A exergia é o mais geral dos potenciais termodinâmicos (EVANS, 1969) e pode ser usada para contabilizar, com base em uma única unidade de medida, os vetores energéticos, insumos materiais, produtos e poluentes (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988). No conceito de exergia são incorporadas a primeira e segunda leis da termodinâmica. Além das quantidades de energia, determinadas nos balanços energéticos de cada processo, a qualidade da energia, (ou sua disponibilidade) e as irreversibilidades geradas são consideradas na análise exergética. Daí a importância da contabilidade exergética para a Ecologia Industrial. De um ponto de vista físico, torna-se possível verificar as eficiências e perdas



exergéticas das atividades econômicas na transformação dos materiais, no consumo de bens e na prestação de serviços. A reorganização das atividades econômicas em bases sustentáveis, ensejada pela Ecologia Industrial, em muito pode se beneficiar desta metodologia de análise.

Das Equações (5) e (6) pode-se eliminar o valor da transferência de calor com o ambiente,  $\dot{Q}_o$ , e escrever uma equação envolvendo a 1ª e a 2ª Leis da Termodinâmica, explícita para a interação de trabalho,  $\dot{W}_{v.c.}$ :

$$\dot{W}_{VC} = \sum_j \dot{Q}_j \left( 1 - \frac{T_o}{T_j} \right) + \sum_e \dot{m}_e (h_e - T_o s_e) - \sum_s \dot{m}_s (h_s - T_o s_s) + T_o \dot{S}_{ger,vc} \quad \text{Eq. 7}$$

Para um processo livre de irreversibilidades,  $\dot{S}_{ger,vc} = 0$  e a Equação (8)

fica:

$$\dot{W}_{máx} = \sum_j \dot{Q}_j \left( 1 - \frac{T_o}{T_j} \right) + \sum_e \dot{m}_e (h_e - T_o s_e) - \sum_s \dot{m}_s (h_s - T_o s_s) \quad \text{Eq. 8}$$

A Equação (8) representa o valor máximo de potência que poderia ser obtida, a partir de um determinado sistema, operando em regime permanente. Apesar dos recentes desenvolvimentos, a análise exergética ainda é pouco usada em relação a outros métodos consagrados da análise energética. As razões são variadas e vão desde a desinformação geral sobre o método até as dificuldades da obtenção de dados apropriados, que de fato são bastante significativas. Não obstante, a análise exergética se presta a uma série de aplicações:

- a) Até hoje a utilização mais específica e abrangente da análise exergética deu-se nos estudos e projetos de otimização de sistemas térmicos, principalmente para equipamentos industriais (PISA; TSATSARONIS, 1994; KOTAS, 1995);

- b) Uma outra vertente de autores da área aplicou o método de contabilidade exergética para fluxos energéticos e materiais das economias nacionais (VIERA; DONATELLI; CRUZ, 2005);
- c) Trabalhos que, a partir do método do consumo exergético cumulativo (SZARGUT, 1999), realizam Análises de Ciclo de Vida com base na contabilidade exergética dos fluxos de energia e materiais, incluindo poluentes (OMETTO, 2005);
- d) Aplicação em sistemas ecológicos, especialmente os aquáticos e os agrícolas (ROSEN; DINCER, 1999).

A exergia também pode ser interpretada como uma medida do potencial que um fluxo de matéria ou energia, em desequilíbrio com o ambiente tem para modificar este ambiente. Além disso, a análise exergética permite otimizar os processos industriais e consiste basicamente em localizar, avaliar e reduzir a destruição e as perdas de exergia nestes processos. Também contabiliza em termos de exergia todos os fluxos relacionados ao sistema, facilitando com isso a comparação entre diferentes sistemas (MORAN; SHAPIRO, 2002),

O impacto ambiental causado por um sistema está relacionado à destruição e às perdas de exergia deste sistema. Entretanto, é conveniente ressaltar que o impacto causado pela destruição de exergia difere daquele causado pela exergia contida nos resíduos lançados na natureza. A destruição de exergia não provoca impactos ambientais diretos. Porém, a elevada destruição de exergia nos processos industriais é compensada pelo sistema através do aumento do consumo de insumos exergéticos, provocando assim a redução das reservas de recursos naturais. Para diminuir a utilização de recursos nos processos, e conseqüentemente, minimizar o impacto ambiental associado à degradação de recursos naturais é necessário aumentar a eficiência industrial (WALL; GONG, 2001).

Segundo MORAN e SHAPIRO (2002), e SZARGUT (1999), citam que a Exergia total de uma substância pode ser dividida em: cinética, potencial, física (temperatura e pressão) e química. A Exergia cinética pode ser calculada pelo significado da velocidade em relação à superfície da Terra e a um potencial pelo nível da vizinhança com relação ao sistema considerado. A Exergia física resulta da diferença de temperatura e de pressão em relação ao ambiente e a química, da

diferença entre a composição química dos componentes do sistema e a composição padrão do ambiente de referência.

Conforme o critério de SZARGUT; MORRIS; STEWARD; (1988), definido como o parâmetro termodinâmico que corresponde à quantidade de trabalho máximo obtida, quando alguma matéria é trazida de seu estado inicial para um estado de equilíbrio termodinâmico (conhecido como estado morto) com os componentes comuns da natureza circunvizinha por meio de processos reversíveis de trocas de calor e de matéria, exclusivamente com o ambiente.

Assim, para sistemas energéticos cujos fluxos operam com parâmetros fora das condições do ambiente de referência, a exergia pode ser entendida como a parte da energia que pode ser transformada em trabalho mecânico de forma reversível e útil, sendo a destruição de exergia o resultado direto das irreversibilidades de um sistema. Um dos aspectos que pode aumentar a geração de irreversibilidades é o funcionamento do equipamento fora das condições de projeto inerentes ao mesmo, aspecto que geralmente incrementa não só a destruição de exergia, mas também as perdas exergéticas para o ambiente.

Como a exergia é uma propriedade termodinâmica, uma vez fixado o ambiente de referência, pode-se utilizá-lo para calcular a exergia de um material em qualquer outro estado, diferente daquele do ambiente. Sendo uma propriedade termodinâmica, a variação de exergia entre dois estados será independente do processo seguido desde o estado inicial até o estado final. Isto permite, por sua vez, definir uma trajetória composta por vários processos para separar a variação total de exergia no somatório de vários termos.

SZARGUT; MORRIS; STEWARD; (1988), KOTAS (1985) e outros autores propõem a seguinte relação para o cálculo da exergia, conforme a Equação 9:

$$b_t = b_{fis} + b_{qui} \quad \text{Eq. 9}$$

Sendo,

$b_{fis}$  = exergia física específica (kJ/kg);

$b_{qui}$  = exergia química específica (kJ/kg).

A exergia física ou termomecânica de um fluxo é calculada com base num estado de referência restrito ( $P_0, T_0$ ) onde há equilíbrio térmico e mecânico com o meio, através da seguinte Equação 10:

$$b_{fis} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad \text{Eq. 10}$$

Segundo KOTAS (1985), a disponibilidade de trabalho acontece por processos físicos envolvendo somente interações de pressão e temperatura com o meio ambiente. Quando a pressão e temperatura do sistema se igualam com o meio ambiente, afirma-se que esse é o Estado Inativo (Estado Morto), e, portanto, não tem mais capacidade de transferir energia (calor ou trabalho).

Portanto, para haver equilíbrio completo com o meio, o sistema deve estar também em equilíbrio químico com ele. O trabalho que pode ser obtido através de um processo reversível que leva o sistema do estado de referência restrito até o estado de referência onde há equilíbrio completo (“estado morto”), é a exergia química, definida pela Equação 11:

$$b_{qui} = \sum (m_i - m_{0,i}) x_i \quad \text{Eq. 11}$$

sendo:

$\mu_i$ : potencial químico de referência do elemento ( $T_0, P_0$ );

$\mu_{0,i}$ : potencial químico do elemento na mistura ( $T_0, P_0$ );

$x_i$ : fração molar do componente na mistura.

Logo, a exergia total ( $b_t$ ) pode ser representada pela Equação 12:

$$b_t = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \sum (m_i - m_{0,i}) x_i \quad \text{Eq. 12}$$

ROSEN; DINCER (1999) consideram que a Exergia de uma emissão que se atribua ao seu desequilíbrio físico (temperatura e pressão) não apresenta significativo potencial de impacto ambiental, pois as diferenças de pressão entre uma emissão e o ambiente normalmente se dissipam logo após a emissão e as diferenças de temperatura são localizadas, normalmente, perto da fonte de emissão

e podem ser controladas. Entretanto a Exergia de uma emissão causada pelo desequilíbrio químico (Exergia química) é, freqüentemente, significativa e difusa, e, conseqüentemente, de difícil controle e de alto potencial de impacto ambiental.

### 3 METODOLOGIA

Esta realização o estudo consistiu em quatro etapas, descritas a seguir:

1. *Definição dos dados a serem coletados, por meio da revisão bibliográfica realizado no capítulo anterior, para o calculo de emergia e exergia;*
2. *Análise dos dados de entrada e saída do Ecoinvent e verificação dos dados a serem utilizados para as análises exergética e emergética;*
3. *Cálculo dos fatores a partir dos três métodos e avaliação dos resultados e comparação dos resultados obtidos, assim como avaliar o processo de transporte em um foco ambiental;*
4. *Considerações finais sobre a metodologia aplicada e discussão sobre a aplicabilidade desta metodologia como ferramenta de valoração ambiental e planejamento ambiental.*

#### 3.1 DEFINIÇÕES DOS DADOS A SEREM COLETATOS

##### 3.1.1 METODOLOGIA EMERGÉTICA

Na metodologia emergética, os fluxos de materiais e de energia são quantificados e avaliados através de conceitos que visam mensurar respectivamente, a energia necessária para gerar um fluxo ou armazenamento energético e para a produção de outro tipo de energia. Além disso, os índices são utilizados para avaliar a relação entre a energia que entra e a que sai de um sistema definido, permitindo observar o grau de pressão que uma determinada atividade pode exercer sobre o meio ambiente, ou mesmo avaliar o custo-benefício em termos emergéticos. De forma simplificada, esta metodologia procura obter a história energética de cada elemento que entra na composição do empreendimento, traduzindo os diversos componentes como materiais e energia em uma mesma linguagem, possibilitando sua comparação e integração.

A emergia no contexto de valoração ambiental, por estar diretamente relacionada à produtividade e baseada em relações físico-biológico-sociais, que

descrevem a relação de causa e efeito do consumo da energia solar incorporada nos insumos e serviços utilizados em processos produtivos, pode ser enquadrada como um método de valoração direta. Como em sua abordagem se incluem os aspectos ecológicos e os humanos, a valoração ocorre por meio do valor de uso indireto dos insumos, de acordo com seu valor ecossistêmico de formação.

Para a elaboração dos diagramas sistêmicos, os elementos são organizados da esquerda para a direita, de acordo com a seqüência do processo e de sua transformidade. De acordo com ODUM (1996), os elementos da esquerda apresentam menor energia incorporada (ou Emergia) que os da direita. Eles são construídos por blocos que representam os principais componentes do sistema e as entradas e as saídas de matéria e de energia.

Conhecendo as entradas e saídas do processo a ser estudado, em seguida, elabora-se o diagrama dos fluxos emergéticos, com as entradas e as saídas, como na Figura 14. Os fluxos podem ser divididos em: não-renováveis (N); renováveis (R); mão-de-obra (S); e recursos provenientes da economia (F). Este diagrama construído apresenta uma visão geral do setor de transporte analisado.

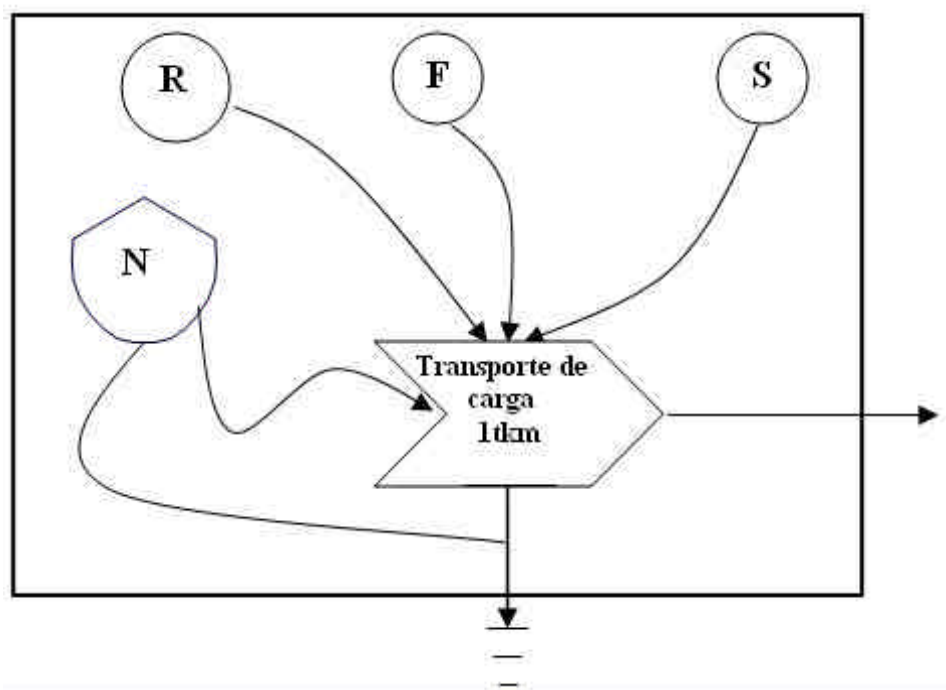


FIGURA 14 – DIAGRAMA EMÉRGÉTICO SIMPLIFICADO DO TRANSPORTE DE CARGA

Os diagramas auxiliam a visualização do sistema, a avaliação e os cálculos emergéticos dos seus componentes, ou seja, a energia solar incorporada de

formação dos insumos utilizados no processo produtivo. Os cálculos são o centro do método. Os valores utilizados nos cálculos emergéticos encontram-se no ANEXO A, onde consta o tipo de substância, a transformidade, unidade e classificação.

Primeiramente, avalia-se se há valores emergéticos para todos os dados de entradas do ICV doecoinvent. Os compostos que não apresentaram transformidade não foram considerados no cálculo.

Segundo ODUM (1996) é por meio dos Índices Emergéticos que o método desenvolve uma imagem dos fluxos dos recursos e dos serviços utilizados. A síntese dos resultados da avaliação emergética é, desse modo, representada por meio desses índices. Os índices calculados foram:

1. Eficiência Emergética (EYR);
2. Taxa de Investimento de Emergia (EIR);
3. Carga Ambiental (ELR);
4. Sustentabilidade (SI);
5. Renovabilidade (%R);

Para calcular o rendimento emergético ou eficiência emergética (**EYR**), divide-se a relação entre a emergia total do produto ( $Y = R + N + F$ ) pela emergia de entrada do setor econômico ( $F$ ), que não é fornecida gratuitamente pelo meio ambiente (Equação 13). Este índice reflete a habilidade do processo de utilizar recursos locais (ULGIATI; BROWN, 2002), mas não diferencia recursos renováveis de não-renováveis.

$$EYR = \frac{Y}{F} = \frac{R + N + F}{F} \quad \text{Eq. 13}$$

A taxa de investimento emergético (**EIR**) é a relação entre a emergia fornecida pelo sistema econômico e a fornecida diretamente pelo meio ambiente ao sistema estudado, quer seja renovável ou não-renovável (Equação 14).

$$EIR = \frac{F}{N + R} \quad \text{Eq. 14}$$



A carga ambiental (**ELR**) é definida como a relação entre a soma da energia de entrada proveniente do sistema econômico e do recurso local não-renovável e a energia do recurso local renovável (Equação 15). Este índice fornece um balizamento dos serviços ambientais num sistema e mostra um balanço entre os investimentos locais renováveis e não-renováveis. Um valor alto de *ELR* pode indicar um estresse de utilização dos recursos renováveis locais.

$$ELR = \frac{N + F}{R} \quad \text{Eq. 15}$$

O índice de sustentabilidade (**SI**) é obtido da relação entre o rendimento emergético e o índice de carga ambiental (Equação 16). O conceito de sustentabilidade está atrelado à maximização de *EYR* (rendimento) e a minimização de *ELR* (impacto), ou seja, o máximo do aproveitamento do investimento com um mínimo de estresse dos recursos locais.

$$SI = \frac{EYR}{ELR} \quad \text{Eq. 16}$$

Por fim, o percentual de energia renovável ou renovabilidade (**%R**) que é a parcela de energia total processada de um determinado sistema, que provém de fontes de recursos renováveis (Equação 17).

$$\%R = \frac{R \times 100}{R + N + F} = \frac{R \times 100}{Y} \quad \text{Eq. 17}$$

Logo, para os cálculos emergéticos são necessários dados como *R*, *N* e *F*, além da transformidade específica. Desta forma, os compostos do ICV doecoinvent com índices de transformidade foram classificados em renováveis, não renováveis e do setor econômico, para posteriormente avaliar os índices emergéticos do processo em análise.

### 3.1.2 METODOLOGIA EXERGÉTICA

Vários exemplos de ambiente de referência para cálculo da exergia química têm sido propostos, sendo usado por OMETTO (2005) o modelo de substâncias de referências utilizando o ambiente de referência padrão e os valores de exergia química dados por SZARGUT; MORRIS; STEWARD, (1988). Segundo OMETTO (2005) o uso da exergia para poluentes se justifica pelo fato de o modelo ser um dos mais aceitos e utilizados pela comunidade científica internacional.

OMETTO (2005) complementa seu trabalho sobre a avaliação exergética das emissões atmosféricas com uma avaliação da exergia físico-química da queimada da cana-de-açúcar, por meio do cálculo da exergia do combustível da biomassa da cana. Com isso, é avaliado e valorado o impacto atmosférico físico-químico direto destas emissões, em termos da perda de trabalho mecânico disponível, em kJ. A Tabela 7 resume os componentes do mecanismo ambiental da AICV comparando com a Exergia.

TABELA 7 – COMPONENTES DO MECANISMO AMBIENTAL DA AICV PELA EXERGIA

<b>Componentes do mecanismo ambiental AICV</b>	<b>Aplicação na Exergia</b>
<i>Categoria de impacto</i>	Impacto atmosférico físico-químico direto
<i>Resultados do impacto no ciclo de vida</i>	Emissões atmosféricas
<i>Modelo de caracterização</i>	Exergia
<i>Indicador de categoria</i>	Perda de trabalho mecânico
<i>Fator de caracterização</i>	Trabalho mecânico disponível do gás de acordo com suas propriedades físico-químicas kJ/kg gás
<i>Resultado do indicador</i>	kJ
<i>Ponto final da categoria</i>	Atmosfera
<i>Relevância ambiental</i>	Espacial: global/regional

FONTE: OMETTO, (2005)

Neste caso, o resultado do indicador, ou resultado final obtido pela metodologia exergética é em kJ, ou seja, uma pontuação única de diferentes categorias de impactos ambientais em uma unidade comum, na qual pode-se comparar os diferentes fluxos de saída para diferentes processos. Por exemplo, pode-se comparar o impacto causado pela emissão de diferentes substâncias (como metano e óleo) em uma mesma unidade comum (kJ).

Na avaliação dos impactos do ciclo de vida, a exergia segue as orientações e os requisitos para a seleção de categorias de impacto, os indicadores de categoria e os modelos de caracterização de acordo com a ABNT ISO 14042 (2004).

Portanto, em relação aos dados das emissões de poluentes gasosos, utilizou-se a análise exergética química proposta por OMETTO (2005). A Tabela completa dos dados utilizados no cálculo exergético encontra-se no ANEXO B.

Na tese de OMETTO (2005) o cálculo da exergia de cada substância emitida, multiplicou-se a quantidade dada no inventário doecoinvent pela sua respectiva exergia química específica, seguindo a Eq. 18.

$$B = b_{ch} \times Q_e \quad \text{Eq. 18}$$

onde:

$B$  = exergia da substância emitida;

$B_{ch}$  = exergia química específica

$Q_e$  = quantidade da emissão atmosférica

Para a valoração ambiental, a exergia, por estar diretamente relacionada à produtividade e baseada em relações físico-químicas que descrevem a relação de causa e efeito das perdas de energia mecânica em processos produtivos, pode se enquadrar como um método de valoração direta. Tal valoração ocorre pelo valor de uso direto das emissões atmosféricas passíveis de serem convertidas em trabalho mecânico e que foram emitidas na atmosfera, gerando impactos físico-químicos diretos.

Além disso, ROSEN; DINCER (1997) cita que as perdas de exergia associadas à emissão resíduos industriais podem modificar o meio ambiente de maneira prejudicial, provocando a degradação dos ecossistemas nos quais os rejeitos foram lançados. O potencial que os resíduos têm para provocar prejuízos nos sistemas naturais pode ser medida pela exergia destas substâncias, ou seja, quanto maior a exergia do processo, maior será o prejuízo para o meio ambiente.

Neste caso, a exergia calculada teve a finalidade de comparação dos diferentes processos de transporte de carga para os fluxos de matéria de saída de cada um, fornecendo uma pontuação única em kJ.

Logo, são necessárias dados de quantidade da substância (ecoinvent) e valor de exergia padrão para as emissões (ANEXO B).

Conforme ROSEN; DINCER (1999) consideram que a Exergia de uma emissão que se atribua ao seu desequilíbrio físico (temperatura e pressão) não apresenta significativo potencial de impacto ambiental, pois as diferenças de pressão entre uma emissão e o ambiente normalmente se dissipam logo após a emissão e as diferenças de temperatura são localizadas, normalmente, perto da fonte de emissão e podem ser controladas. Portanto, devido alguns fatores desconhecidos, como pressão e temperatura das substâncias, considerou apenas a exergia química das emissões.

### 3.1.3 MÉTODO DA ACV

Entre os softwares disponíveis no mercado para a ACV, BENJAMIN (2001) cita que o *SimaPro* destaca-se pela maior simplicidade, flexibilidade de manipulação e adaptabilidade a diversos objetivos, características que justificam a sua notável aplicabilidade diante dos segmentos industriais, públicos e privados, e extensiva utilização como ferramenta de gerenciamento de dados para vários softwares e bancos de dados comercialmente disponíveis. Nesta dissertação foi utilizada a plataforma do software *SimaPro 7.0*

Neste estudo, utilizaram-se os dados do inventário do *Ecoinvent* que contém dados quantitativos sobre consumo de energia e de materiais, entradas de produtos e emissões de processos individuais.

Na fase da avaliação de impactos ambientais, o método adotado nesta análise foi o *Eco-indicator 99 H/A* (descrito conforme seção 2.1.3.1), desenvolvido pela *Pré Consultants BV*, da Holanda, modelo baseado nos princípios da ABNT ISO 14042. Além disso, o método do *Eco-indicator 99 H/A* tem o objetivo de transformar os dados da planilha de inventário (no caso, o *ecoinvent*) em categorias de danos relativas a *recursos* (minerais e combustíveis fósseis), *qualidade dos ecossistemas*

(acidificação/eutrofização, ecotoxicidade e uso do solo) e *saúde humana* (substâncias carcinogênicas, substâncias orgânicas e inorgânicas respiráveis, mudança climática, depleção da camada de ozônio e radiação), ou em uma pontuação única, o índice ambiental do sistema, um indicador-padrão para diversos tipos de materiais, processos ou serviços (GOEDKOOOP; SPRIENSMA, 2001).

Ou seja, para o cálculo dos impactos ambientais pela ACV, utilizou-se o software *Sima-Pro 7.0*.

### 3.2 ANÁLISE DOS DADOS DO ECOINVENT PARA EMERGIA E EXERGIA

No ciclo de vida, para transportar 1 tkm em caminhões no ecoinvent há um total de 652 entradas e saídas.

De acordo com o apresentado na seção anterior, os dados de entrada são utilizados para o cálculo de emergia, enquanto os de saídas, para o cálculo de exergia.

Os índices de transformidade para obtenção da emergia existentes, contudo, não contemplam toda a lista de entradas apresentadas no ecoinvent. Além disso, no ecoinvent, muitas vezes há a especificação de alguma entrada ou saída. Por exemplo, enquanto o recurso ouro (fluxo de entrada de matéria-prima) apresenta apenas um índice de transformidade, no ecoinvent há separação do ouro conforme a composição química. Desta forma foi necessário estabelecer uma relação entre a lista do ecoinvent e os de transformidade disponíveis, conforme o exemplo da Tabela 8.

O mesmo acontece no cálculo exergético. Por exemplo, o gás carbônico na metodologia de exergia é uma emissão gasosa (fluxo de saída), e no ecoinvent há diferentes tipos de gás carbônico (biogênico e fóssil). Assim, precisou-se estabelecer o mesmo valor de exergia química padrão para cada composto, conforme a Tabela 9.

Após a definição dos dados a serem utilizadas, revisões das metodologias a serem utilizadas, apresentam-se os resultados e discussões no capítulo 4.

TABELA 8 – RELAÇÃO DOS DADOS DO ECOINVENT COM OS VALORES DE TRANSFORMIDADE

<b>Substância (ecoinvent)</b>	<b>Classificação (R, N ou F)</b>	<b>Transformidade (sej/kg)</b>
Energia, solar, convertida	R	1
Energia, cinética (em vento), convertida	R	1.496
Energia, potencial (reservatório em usina hidrelétrica), convertida	R	27.874
Água, lago	N	1,10E+05
Água, rio	N	1,10E+05
Água, salgada, oceano	N	1,10E+05
Água, salgada, solo	N	1,10E+05
Água, uso em turbina, origem natural não especificada	R	27874
Água natural, origem não especificada m <sup>3</sup>	N	1,10E+05
Água, mina, do solo	N	1,10E+05
Óleo cru, do solo	N	2,76E+12
Areia, não especificada, do solo	F	1,00E+12
Madeira, dura, permanecendo	N	1,64E+11
Madeira, de floresta primária, permanecendo	N	1,64E+11
Madeira, branda	N	1,64E+11
Madeira, não especificado, m <sup>3</sup>	N	1,64E+11
Carvão, marrom, da solo	N	1,00E+12
Carvão, duro, não especificado, do solo	N	1,00E+12
Cobre, 0.99% em sulfureto, Cu 0.36% e Mo 8.2E -3% em minério simples, do solo	F	6,80E+13
Cobre, 1.18% em sulfureto, Cu 0.39% e Mo 8.2E -3% em minério simples, do solo	F	6,80E+13
Cobre, 1.42% em sulfureto, Cu 0.81% e Mo 8.2E -3% em minério simples, do solo	F	6,80E+13
Cobre, 2.19% em sulfureto, Cu 1.83% e Mo 8.2E -3% em minério simples, do solo	F	6,80E+13
Prata, 0.007% em sulfureto, Ag 0.004%, Pb, Zn, CD, Em, do solo	F	3,00E+17
Prata, 3.2ppm em sulfureto, Ag 1.2ppm, Cu e Te, em minério simples, do solo	F	3,00E+17
Prata, Ag 2.1E-4%, Au 2.1E-4%, em minério, do solo	F	3,00E+17
Prata, Ag 4.2E-3%, Au 1.1E-4%, em minério, do solo	F	3,00E+17
Prata, Ag 4.6E-5%, Au 1.3E-4%, em minério, do solo	F	3,00E+17
Prata, Ag 9.7E-4%, Au 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, em minério, do solo	F	3,00E+17
Alumínio, 24% em bauxita, 11% em minério simples, do solo	F	1,63E+13
Argila, bentonite, do solo	F	1,71E+12
Argila, não especificado, do solo	F	1,71E+12
Ouro, Au 1.1E-4%, Ag 4.2E -3%, em minério, do solo	F	4,40E+17
Ouro, Au 1.3E-4%, Ag 4.6E -5%, em minério, do solo	F	4,40E+17
Ouro, Au 1.4E-4%, em minério, do solo	F	4,40E+17
Ouro, Au 2.1E-4%, Ag 2.1E -4%, em minério, do solo	F	4,40E+17

TABELA 8 – RELAÇÃO DOS DADOS DO ECOINVENT COM OS VALORES DE TRANSFORMIDADE - (CONTINUAÇÃO)

Ouro, Au 4.3E-4%, em minério, do solo	F	4,40E+17
Ouro, Au 4.9E-5%, em minério, do solo	F	4,40E+17
Ouro, Au 6.7E-4%, em minério, do solo	F	4,40E+17
Ouro, Au 7.1E-4%, em minério, do solo	F	4,40E+17
Ouro, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, em minério, do solo	F	4,40E+17
Fósforo, 18% em apatite, 12% em minério simples, do solo	F	3,50E+12
Fósforo, 18% em apatite, 4% em minério simples, do solo	F	3,50E+13
Zinco, 9.0% em sulfureto, Zn 5.3%, Pb, Ag, Cd, do solo	F	6,80E+13
Ferro, 46% em minério, 25% em minério simples, do solo	F	1,80E+12
Gás, mina, gás de escape, processo minado, m3	N	4,80E+04
Gás, natural, do solo	N	4,80E+04

TABELA 9 – RELAÇÃO DOS DADOS DO ECOINVENT COM OS VALORES DE EXERGIA PADRÃO DAS SUBSTÂNCIAS

<b>Substância (ecoinvent)</b>	<b>Exergia química padrão (b<sub>ch</sub>) kJ/kg</b>
Gás carbônico, biogênico	451,49
Gás carbônico, fóssil	451,49
Gás carbônico, transformação terrestre	451,49
Óxidos de nitrogênio	2.962,73
Monóxido de carbono, biogênico	9.821,32
Monóxido de carbono, fóssil	9.821,32
Dióxido de enxofre	4.892,07
Hidrocarbonetos, alifáticos, alcanos, cíclico	42.876,92
Hidrocarbonetos, alifáticos, alcanos, não especificado	42.876,92
Hidrocarbonetos, alifáticos, não saturado	42.876,92
Hidrocarbonetos, aromático	42.876,92
Hidrocarbonetos, clorado	42.876,92
Hidrocarbonetos, alifáticos, alcanos, não especificado	42.876,92
Hidrocarbonetos, alifáticos, não saturado	42.876,92
Hidrocarbonetos, aromático	42.876,92
Hidrocarbonetos, não especificado	42.876,92
Monóxido de dinitrogênio	2.428,84
Tolueno	42.797,07
Tolueno	42.797,07
Óxidos de nitrogênio	2.962,73
Metano, biogênico	51.838,71
Metano, fóssil	51.838,71
Nitrogênio	51,39
Água	527,19
Hidrogênio	130.505,95
Enxofre	9.507,17
Enxofre	9.507,17
Sulfureto de hidrogênio	23.829,09
Sulfureto de hidrogênio	23.829,09
Etano	49.745,26
Amônia	19.841,46
Metanol	22.409,49
Metanol	22.409,49
Etanol	29.470,37
Etanol	29.470,37
Particulados, < 2.5 um	7.878
Particulados, > 10 um	7.878
Particulados, > 2.5 um, e < 10um	7.878
Benzeno	42.292,00
Pah, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos	41.000
Pah, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos	41.000
Voc, compostos orgânicos voláteis, origem não especificada	42.239
Óleos, não especificados	37.450
Óleos, não especificados	37.450



## 4 RESULTADOS

As informações necessárias à elaboração deste estudo foram coletadas através do inventário do ecoinvent (Tabela 10, 11, 12 e 13) por ser um inventário completo na área de transporte. Os dados do inventário dos processos estudados são transporte de carga de 16 toneladas (caminhão 16 t) e 32 toneladas (caminhão 32 t). Neles, os valores consultados dos dois processos no ecoinvent são expressos em tkm (tonelada quilômetro). Cada um dos processos tem a substância, categoria, unidade e valor. São listadas várias substâncias e cada uma indica a quantidade necessária de material de entrada requerida para movimentar uma tonelada a cada quilômetro. Cabe lembrar que os dados apresentados correspondem do inventário decorrente de 1tkm.

Outra observação importante analisada na tabela do inventário é que esta possui variações para a mesma substância, como a água. Esta pode ser do rio, oceano, ou usada para mover turbinas. Foram considerados os fluxos mais importantes do processo de transporte para o cálculo de exergia e emergia, pois estes não possuem dados completos para conversão e transformidade de todas as substâncias citadas pelo ecoinvent.

A seguir, as substâncias apresentadas no ecoinvent foram divididos em quatro partes, conforme a listagem abaixo:

1. *Tabela 10 - Dados de ICV do ecoinvent (entradas: matéria-prima);*
2. *Tabela 11 - Dados de ICV do ecoinvent (saídas: ar);*
3. *Tabela 12 - Dados de ICV do ecoinvent (saídas: água);*
4. *Tabela 13 - Dados de ICV do ecoinvent (saídas: solo).*

TABELA 10 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (MATÉRIA-PRIMA)

<b>Substância – Fluxo de Entrada (Matéria-Prima)</b>		
Água, de arrefecimento, de origem natural não especificado/m3	Magnésio, 0,13% na água	Transformação, área de tráfego, terreno de ferrovia
Água, de manancial, em solo	Magnesita, 60% em minério simples, em solo	Transformação, área de tráfego, rede de estrada
Água, lago	Manganês, 35,7% em depósito sedimentar, 14,2% em minério simples, em solo	Transformação, área de tráfego, rede de ferrovia
Água, não especificado, origem natural/m3	Molibdênio, 0,010% em sulfeto, Mo 8,2E-3% e Cu 1,83% em minério simples, em solo	Transformação, área de tráfego, terreno de estrada
Água, rio	Molibdênio, 0,014% em sulfeto, Mo 8,2E-3% e Cu 0,81% em minério simples, em solo	Transformação, aterro
Água, salina, fundo do oceano	Molibdênio, 0,022% em sulfeto, Mo 8,2E-3% e Cu 0,36% em minério simples, em solo	Transformação, aterro, aterro sanitário
Água, salina, oceano	Molibdênio, 0,025% em sulfeto, Mo 8,2E-3% e Cu 0,39% em minério simples, em solo	Transformação, aterro, bentos
Água, usada em turbina, origem natural não especificada	Molibdênio, 0,11% em sulfeto, Mo 4,1E-2% e Cu 0,36% em minério simples, em solo	Transformação, aterro, compartimento de escória
Alumínio, 24% em bauxita, 11% em minério simples, em solo	Níquel, 1,13% em sulfeto, Ni 0,76% e Cu 0,76% em minério simples, em solo	Transformação, aterro, material inerte de aterro
Anidrita, em solo	Níquel, 1,98% em silicatos, 1,04% em minério simples, em solo	Transformação, aterro, material residual de aterro
Areia, não especificada, em solo	Nitrato de sódio, em solo	Transformação, corpos de água, artificial
Argila, bentonita, em solo	Ocupação, arbusto terrestre, sclerophyllous	Transformação, cursos de água, artificial
Argila, não especificado, em solo	Ocupação, área de tráfego, rede de estrada	Transformação, de arbusto terrestre, sclerophyllous
Barita, 15% em minério simples, em solo	Ocupação, área de tráfego, rede de ferrovia	Transformação, de área desconhecida
Basalto, em solo	Ocupação, área de tráfego, terreno de estrada	Transformação, de área industrial
Bórax, em solo	Ocupação, área de tráfego, terreno de ferrovia	Transformação, de área industrial, bentos
Cádmio, 0,30% em sulfeto, CD 0,18%, Pb, Zn, Ag, In, em solo	Ocupação, área industrial	Transformação, de área industrial, construída
Calcita, em solo	Ocupação, área industrial, bentos	Transformação, de área industrial, vegetação
Carbono, em matéria orgânica, em solo	Ocupação, área industrial, construída	Transformação, de aterro, aterro sanitário
Carvão, duro, não especificado, em solo	Ocupação, área industrial, vegetação	Transformação, de aterro, compartimento de escória
Carvão, marrom, em solo	Ocupação, aterro	Transformação, de aterro, material inerte de aterro
Cascalho, em solo	Ocupação, aterro, bentos	Transformação, de aterro, resíduos de material de aterro

TABELA 10 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (MATÉRIA-PRIMA) - CONTINUAÇÃO

Caulinita, 24% em minério simples, em solo	Ocupação, colheita permanente, fruta, intensiva	Transformação, de cultivável
Chumbo, 5,0% em sulfeto, Pb 3,0%, Zn, Ag, Cd, In, em solo	Ocupação, corpos de cursos, artificial	Transformação, de cultivável, não irrigada
Cinábrio, em solo	Ocupação, cultivável, não irrigada	Transformação, de cultivável, não irrigada, alqueive
cloreto de sódio, em solo	Ocupação, floresta, ciclo intensivo, pequeno	Transformação, de floresta
Cobalto, em solo	Ocupação, floresta, intensiva	Transformação, de floresta tropical
Cobre, 0,99% em sulfeto, Cu 0,36% e Mo 8,2E -3% em minério simples, em solo	Ocupação, floresta, intensiva, normal	Transformação, de floresta, extensiva
Cobre, 1,18% em sulfeto, Cu 0,39% e Mo 8,2E -3% em minério simples, em solo	Ocupação, local de construção	Transformação, de floresta, intensiva
Cobre, 1,42% em sulfeto, Cu 0,81% e Mo 8,2E -3% em minério simples, em solo	Ocupação, local de extração mineral	Transformação, de local de extração mineral
Cobre, 2,19% em sulfeto, Cu 1,83% e Mo 8,2E -3% em minério simples, em solo	Ocupação, urbana, construções descontinuadas	Transformação, de pastos e prados
Colemanita, em solo	Ocupação, corpos de água, artificial	Transformação, de pastos e prados, intensivo
Crisótilo, em solo	Óleo, simples, em solo	Transformação, do mar e oceano
Cromo, 25,5% em cromita, 11,6% em minério simples, em solo	Olivina, em solo	Transformação, para arbusto terrestre, sclerophyllous
Diatomito, em solo	Ouro, Au 1,1E -4%, Ag 4,2E -3%, em minério, em solo	Transformação, para área industrial
dióxido de carbono, em ar	Ouro, Au 1,3E -4%, Ag 4,6E -5%, em minério, em solo	Transformação, para área industrial, bentos
Dolomita, em solo	Ouro, Au 1,4E -4%, em minério, em solo	Transformação, para área industrial, construída
Energia, cinética (em vento), convertida	Ouro, Au 2,1E -4%, Ag 2,1E -4%, em minério, em solo	Transformação, para área industrial, vegetação
Energia, potencial (em reservatório hidrelétrico), convertida	Ouro, Au 4,3E -4%, em minério, em solo	Transformação, para colheita permanente, fruta, intensivo
Energia, solar, convertida	Ouro, Au 4,9E -5%, em minério, em solo	Transformação, para cultivável
Energia, valor calorífico bruto, em biomassa	Ouro, Au 6,7E -4%, em minério, em solo	Transformação, para cultivável, não irrigada
Energia, valor calorífico bruto, em biomassa, floresta primária	Ouro, Au 7,1E -4%, em minério, em solo	Transformação, para cultivável, não irrigada, alqueive
Enxofre, em solo	Ouro, Au 9,7E -4%, Ag 9,7E -4%, Zn 0,63%, Cu 0,38%, Pb 0,014%, em minério, em solo	Transformação, para desconhecido
Estanho, 79% em cassiterita, 0,1% em minério simples, em solo	Pd, Pd 2,0E -4%, Pt 4,8E -4%, Rh 2,4E -5%, Ni 3,7E -2%, Cu 5,2E -2% em minério, em solo	Transformação, para floresta
Estibina, em solo	Pd, Pd 7,3E -4%, Pt 2,5E -4%, Rh 2,0E -5%, Ni 2,3E +0%, Cu 3,2E +0% em minério, em solo	Transformação, para floresta, ciclo intensivo, pequeno
Feldspato, em solo	Pedra Metamórfica, contendo grafita, em solo	Transformação, para floresta, intensiva

TABELA 10 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (MATÉRIA PRIMA) – CONTINUAÇÃO

Ferro, 46% em minério, 25% em minério simples, em solo	Prata, 0,007% em sulfeto, Ag 0,004%, Pb, Zn, Cd, In, em solo	Transformação, para floresta, intensiva, normal
Flúor, 4,5% em apatite, 1% em minério simples, em solo	Prata, 3,2ppm em sulfeto, Ag 1,2ppm, Cu e Te, em minério simples, em solo	Transformação, para floresta, intensivo
Flúor, 4,5% em apatite, 3% em minério simples, em solo	Prata, Ag 2,1E-4%, Au 2,1E-4%, em minério, em solo	Transformação, para heterogênea, agrícola
Fluorita, 92%, em solo	Prata, Ag 4,2E-3%, Au 1,1E-4%, em minério, em solo	Transformação, para local de extração mineral
Fósforo, 18% em apatita, 12% em minério simples, em solo	Prata, Ag 4,6E-5%, Au 1,3E-4%, em minério, em solo	Transformação, para o mar e oceano
Fósforo, 18% em apatita, 4% em minério simples, em solo	Prata, Ag 9,7E-4%, Au 9,7E-4%, Zn 0,63%, Cu 0,38%, Pb 0,014%, em minério, em solo	Transformação, para urbana, discontinuously construído
Gálio, 0,014% em bauxita, em solo	Pt, Pt 2,5E-4%, Pd 7,3E-4%, Rh 2,0E-5%, Ni 2,3E+0%, Cu 3,2E+0% em minério, em solo	Transformação, pastos e prados
Gás, mina, gás de escape, processo minado, m3	Pt, Pt 4,8E-4%, Pd 2,0E-4%, Rh 2,4E-5%, Ni 3,7E-2%, Cu 5,2E-2% em minério, em solo	Turfa, em solo
Gás, natural, em solo	Rênio, em minério simples, em solo	Ulexita, em solo
Gipsita, em solo	Rh, Rh 2,0E-5%, Pt 2,5E-4%, Pd 7,3E-4%, Ni 2,3E+0%, Cu 3,2E+0% em minério, em solo	Urânio, em solo
Granito, em solo	Rh, Rh 2,4E-5%, Pt 4,8E-4%, Pd 2,0E-4%, Ni 3,7E-2%, Cu 5,2E-2% em minério, em solo	Vermiculita, em solo
Hélio, 0,08% em gás natural, em solo	Silvita, 25 % em silvita, em solo	Volume ocupado, depósito final para lixo baixo-radioativo
Índio, 0,005% em sulfeto, In 0,003%, Pb, Zn, Ag, Cd, em solo	Sulfato de sódio, várias formas, em solo	Volume ocupado, depósito final para lixo radioativo
Kieserita, 25% em minério simples, em solo	Talco, em solo	Volume ocupado, depósito subterrâneo
Madeira, dura, permanente	Tântalo, 81,9% em tantalite, 1,6E-4% em minério simples, em solo	Volume ocupado, reservatório
Madeira, floresta primária, permanente	Telúrio, 0,5ppm em sulfeto, Te 0,2ppm, Cu e Ag, em minério simples, em solo	Xisto, em solo
Madeira, não especificado, permanente/m3	TiO2, 54% em ilmenita, 2,6% em minério simples, em solo	Zinco, 9,0% em sulfeto, Zn 5,3%, Pb, Ag, Cd, In, em solo
Madeira, suave, permanente	TiO2, 95% em rutila, 0,40% em minério simples, em solo	Zircônio, 50% em zircão, 0,39% em minério simples, em solo

FONTE: ECOINVENT

TABELA 11 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (AR)

Substância – Fluxo de Saída (Emissões para o Ar)		
1,4-Butanodiol	Cromo VI	Metanol
1-Propanol	Cromo-51	Metil acrilato
2-Propanol	Cumeno	Metil amina
Acenapitene	Diamina de etileno	Metil formate
Acetaldeído	Diclorato de sódio	Molibdênio
Acetato de etílico	Dióxido de enxofre	Monoetanolamina
Acetona	Disulfeto de carbono	Monóxido de carbono, biogênico
Acetonitrile	Enxofre hexafluoreto	Monóxido de carbono, fóssil
Ácido acético	Escândio	Monóxido de dinitrogênio
Ácido acrílico	Espécies radioativas, outros emissores de beta	m-Xileno
Ácido de Fluossilicica	Estireno	Niobium-95
Ácido fórmico	Estrôncio	Níquel
Ácido isocianico	Etano	Nitrato
Ácido propiônico	Etano, 1,1,2-tricloro-de 1,2,2 trifluoros-, CFC-113	NMVOC, origem não especificada
Ácido sulfúrico	Etano, 1,2-dicloro-de 1,1,2,2 tetrafluoros-, CFC-114	Óxido de Etileno
Acroleína	Etano, de 1,1 difluoros-, HFC-152a	Óxido de Propileno
Actinídios, radioativo, não especificado	Etano, de 1,1,1 tricloros-, HCFC-140	Óxidos de nitrogênio
Aerossóis, radioativos, não especificados	Etano, de 1,1,1,2 tetrafluoros-, HFC-134a	Ozônio
Água	Etano, de 1,2 dicloros-	PAH, Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
Água oxigenada de hidrogênio	Etanol	Parafinas
Aldeídos, não especificados	Eteno	Particulados, < 2,5 um
Alumínio	Eteno, cloro-	Particulados, > 10 um
Amônia	Eteno, tetracloro-	Particulados, > 2,5 um, e < 10um
Antimônio	Ethane, hexafluoro-, HFC-116	Pentane
Antimônio-124	Etilo de metil pentane	Platina
Antimônio-125	Etino	Plutônio - alfa
Argônio-41	Fenol	Plutônio-238
Arsênico	Fenol, pentachloro-	Polônio-210
Arsênio	Ferro	Potássio
Bário	Fluoreto de hidrogênio	Potássio-40
Bário-140	Fluorina	Prata
Benzaldeído	Formaldeído	Prata
Benzeno	Formiato de sódio	Prata-110
Benzeno, etil	Fosfina	Propanal
Benzeno, hexacloro-	Fósforo	Propano
Benzeno, pentacloro-	Furan	Propeno
Benzo(a)pireno	Gás carbônico, biogênico	Protactínio-234
Berillium	Gás carbônico, fóssil	Rádio-226
Bifenil policlorado	Gás carbônico, transformação terrestre	Rádio-228
Borato de metil	Gases nobres, radioativos, não especificados	Radon-220
Boro	Hélio	Radon-222
Boro trifluoreto	Heptano	Rutênio-103
Bromo	Hexano	Selênio

TABELA 11 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (AR) - CONTINUAÇÃO

Butadieno	Hidrocarbonetos, alifáticos, alcanos, cíclico	Silício
Butano	Hidrocarbonetos, alifáticos, alcanos, não especificado	Silício tetrafluoreto
Butanol	Hidrocarbonetos, alifáticos, não saturado	Sódio
Buteno	Hidrocarbonetos, aromático	Sulfato
Butirolactono	Hidrocarbonetos, clorados	Sulfeto de hidrogênio
Cádmio	Hidrogênio	Tálio
Cálcio	Hidrogênio-3, Tritium	Terpeno
Calor, perda	Hidróxido de sódio	t-éter de metil de Butil
Carbonato de amônio	Iodo	Titânio
Carbono-14	Iodo-129	Tolueno
Celulose de etílico	Iodo-131	Tório
Cério-141	Iodo-133	Tório-228
Césio-134	Iodo-135	Tório-230
Césio-137	Isopreno	Tório-232
Chumbo	Lantânio-140	Tório-234
Chumbo-210	Magnésio	Urânio
Cianeto	Manganês	Urânio alfa
Clorato de sódio	Manganês-54	Urânio-234
Cloreto de Benzal	Mercúrio	Urânio-235
Cloreto de hidrogênio	Metano, biogenico	Urânio-238
Cloro	Metano, bromo-, Halon 1001	Vanádio
Clorofórmio	Metano, bromoclorodifluoro-, Halon 1211	Xenônio-131m
Clorosilano, trimetil-	Metano, bromotrifluoro-, Halon 1301	Xenônio-133
Cobalto	Metano, clorodifluoro-, HCFC-22	Xenônio-133m
Cobalto-58	Metano, dichlorofluoro-, HCFC-21	Xenônio-135
Cobalto-60	Metano, dicloro-, HCC-30	Xenônio-135m
Cobre	Metano, diclorodifluoro-, CFC-12	Xenônio-137
Crípton-85	Metano, fóssil	Xenônio-138
Crípton-85m	Metano, monocloro-, R-40	Xileno
Crípton-87	Metano, tetracloro-, CFC-10	Zinco
Crípton-88	Metano, tetrafluoro-, CFC-14	Zinco-65
Crípton-89	Metano, triclorofluoro-, CFC-11	Zircônio
Cromo	Metano, trifluoro-, HFC-23	Zircônio-95

FONTE: ECOINVENT

TABELA 12 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (ÁGUA)

Substância – Fluxo de Saída (Emissões para a Água)		
1,4-Butanediols	COD	Nitrogênio
4-Metil, 2 pentano	Cromo VI	Nitrogênio, orgânico
Acenapiteno	Cromo, íon	Óleos, não especificados
Acenapitileno	Cromo-51	Óxido de Etileno
Acetaldeído	Cumeno	Óxido de propileno
Acetato de Butilo	DBO	o-Xileno
Acetato de etilo	Dicromato	PAH
Acetona	DQO	Parafinas
Acidez, não especificada	Enxofre	Peróxido de hidrogênio
Ácido acético	Escândio	Polônio-210
Ácido Fluossilico	Espécie radioativas, emissores de alfa	Potássio, íon
Ácidos carboxílicos, não especificado	Espécie radioativas, Nuclides, não especificado	Potássio-40
Acrilato, íon	Estanho, íon	Prata, íon
Actinídios, radioativo, não especificado	Estrôncio	Prata-110
Alumínio	Estrôncio-89	Propeno
Amônio, íon	Estrôncio-90	Protactínio-234
Antimônio	Etano, 1,2 dicloros-	Rádio-224
Antimônio-122	Etanol	Rádio-226
Antimônio-124	Eteno	Rádio-228
Antimônio-125	Eteno, choro-	Rubídio
AOX	Etileno diamina	Rutênio-103
Arsênico, íon	Fenol	Selênio
Bário	Ferro, íon	Silício
Bário-140	Ferro-59	Sódio, íon
Barita	Fluoreto	Sódio-24
Benzeno	Formaldeído	Sólidos solventes
Benzeno, cloro-	Formiato de sódio	Sólidos suspensos, não especificados
Benzeno, de 1,2 dicloros-	Fosfato	Sólidos, inorgânicos
Benzeno, etilo-	Fósforo	Solventes clorados, não especificados
Berílio	Glutaraldeído	Sulfato
Boro	Hidrocarbonetos, alifático, alcanos, não especificado	Sulfeto
Bromato	Hidrocarbonetos, alifáticos, não saturado	Sulfeto de hidrogênio
Bromo	Hidrocarbonetos, aromático	Sulfito
Butanol	Hidrocarbonetos, não especificado	Tálio
Buteno	Hidrogênio-3, Trítio	Tecnécio-99m
Butirolactona	Hidróxido	Telúrio-123m
Cádmio, íon	Hipoclorito	Telúrio-132
Cálcio, íon	Iodide	t-éter de metil de Butil
Calor, desperdício	Iodo-131	Titânio, íon
Carbonato	Iodo-133	TOC, Carbono Orgânico Total
Cério-141	Lantânio-140	Tolueno
Cério-144	Lítio, íon	Tório-228
Césio	Magnésio	Tório-230
Césio-134	Manganês	Tório-232

TABELA 12 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (ÁGUA) - CONTINUAÇÃO

Césio-136	Manganês-54	Tório-234
Césio-137	Mercúrio	Tributil-estanho
Chumbo	Metano, dichloro-, HCC-30	Trietileno glicol
Chumbo-210	Metanol	Tungstênio
Cianeto	Metil acrilato	Urânio alfa
Clorato	Metil amina	Urânio-234
Cloreto	Metil formiato	Urânio-235
Cloro	Molibdênio	Urânio-238
Clorofórmio	Molibdênio-99	Vanadium, íon
Cobalto	m-Xileno	VOC, compostos orgânicos voláteis
Cobalto-57	Nióbio-95	Xileno
Cobalto-58	Níquel, íon	Zinco, íon
Cobalto-60	Nitrato	Zinco-65
Cobre, íon	Nitrito	Zircônio-95

FONTE: ECOINVENT



TABELA 13 –DADOS DE ICV DO ECOINVENT (SOLO)

<b>Substância – Fluxo de Saída (Emissões para o Solo)</b>		
2,4-D	Cloreto	Metolacoloro
Ácido sulfúrico	Clorotalonil	Metribuzina
Aclonifena	Cobalto	Molibdênio
Aldrina	Cobre	Napropamida
Alumínio	Cromo	Níquel
Antimônio	Cromo VI	Óleos, biogenico
Arsênico	Enxofre	Óleos, não especificados
Atrazina	Estanho	Orbencarbo
Bário	Estrôncio	Pirimicarbe
Benomil	Fenpiclonil	Potássio
Bentazona	Ferro	Silício
Boro	Fluoreto	Sódio
Cádmio	Fósforo	Tebutam
Cálcio	Glifosato	Teflubenzuron
Calor, desperdicado	Linuron	Thiram
Carbetamida	Magnésio	Titânio
Carbofuran	Mancozebe	Vanádio
Carbono	Manganês	Zinco
Chumbo	Mercúrio	
Cipermetrina	Metaldeido	

FONTE: ECOINVENT

## 4.1 ANÁLISE EMERGÉTICA

Antes de elaborar os cálculos emergéticos, é necessário pesquisar as substâncias a serem analisadas. O ANEXO A, baseado em ODUM (1996), ORTEGA (2003a) BROWN; ULGIATI (2002) indica os valores de transformidades de cada substância na metodologia emergética. Além disso, apresenta uma classificação em relação aos recursos, unidades e referências, necessárias para os cálculos emergéticos. Os recursos podem ser classificados em renováveis (R), não-renováveis (N), e provenientes da economia (F). Estes valores são extremamente importantes para obter os índices emergéticos do processo em estudo.

As substâncias utilizadas para o cálculo emergético foram somente as entradas do processo, Tabela 10 - DADOS DE ICV DO ECOINVENT (MATÉRIA-PRIMA) dependeram do conhecimento da transformidade de cada elemento, assim como a sua classificação. Alguns itens doecoinvet, como a transformação, gases e outras substâncias químicas não foram consideradas devido à falta de dados emergéticos para o cálculo emergético. Outro fator a destacar que esta ferramenta ambiental faz a análise das entradas do processo, verificando a sustentabilidade em relação ao uso de recursos no sistema. Assim, das 192 substâncias disponíveis no ecoinvent, foi utilizada somente 46 substâncias no cálculo emergético, ou seja, 24% dos dados disponíveis.

A Tabela 14 apresenta os valores emergéticos calculados de cada substância considerada do ecoinvent, sendo obtidos pela multiplicação do valor de cada item pela sua transformidade, conforme descrito na metodologia. A unidade é sej/1tkm. O método emergético, o qual, segundo ODUM (1996), baseia-se na quantidade de energia solar equivalente utilizada pelos insumos, equipamentos, edificações e pelos serviços para a formação do produto, pode ser aplicado à avaliação e à valoração ambiental no que se refere ao uso ou ao consumo de recursos.

TABELA 14 – RESULTADOS DOS VALORES EMERGÉTICOS DOS TRANSPORTES DE 16 t E DE 32 t (UNIDADE: sej/1 tkm)

Substância	Transporte 16 t	Transporte 32 t
Energia, solar, convertida	1,941E+01	1,655E+01
Energia, cinética (de vento), convertida	1,559E+06	1,353E+06
Energia, potencial (reservatório em usina hidrelétrica), convertida	6,541E+08	5,386E+08
Água, lago	2,150E+02	1,910E+02
Água, rio	1,274E+04	1,098E+04
Água, salgada, oceano	1,975E+03	1,736E+03
Água, salgada, solo	2,608E+03	2,449E+03
Água, uso em turbina, origem natural não especificada	4,558E+06	3,776E+06
Água natural, origem não especificada m <sup>3</sup>	4,099E+04	3,870E+04
Água, mina, em solo	3,862E+03	3,297E+03
Óleo cru (petróleo), em solo	1,037E+11	9,730E+10
Areia, não especificada, em solo	8,935E+04	7,458E+04
Madeira, dura	1,142E+07	9,844E+06
Madeira, de floresta primária	6,117E+04	5,254E+04
Madeira, branda	2,751E+07	2,348E+07
Madeira, não especificado, m <sup>3</sup>	7,775E+02	6,603E+02
Carvão, marrom, em solo	2,434E+09	2,122E+09
Carvão, duro, não especificado, em solo	5,123E+09	4,476E+09
Cobre, 0.99% em sulfeto, Cu 0.36% e Mo 8.2E -3% em minério bruto, em solo	1,029E+08	8,501E+07
Cobre, 1.18% em sulfeto, Cu 0.39% e Mo 8.2E -3% em minério bruto, em solo	5,610E+08	4,636E+08
Cobre, 1.42% em sulfeto, Cu 0.81% e Mo 8.2E -3% em minério bruto, em solo	1,488E+08	1,230E+08
Cobre, 2.19% em sulfeto, Cu 1.83% e Mo 8.2E -3% em minério bruto, em solo	7,521E+08	6,214E+08
Prata, 0.007% em sulfeto, Ag 0.004%, Pb, Zn, Cd, em solo	1,017E+09	8,302E+08
Prata, 3.2ppm em sulfureto, Ag 1.2ppm, Cu e Te, em minério simples, em solo	7,255E+08	5,922E+08
Prata, Ag 2.1E-4%, Au 2.1E-4%, em minério, em solo	6,699E+07	5,467E+07
Prata, Ag 4.2E-3%, Au 1.1E-4%, em minério, em solo	1,530E+08	1,249E+08
Prata, Ag 4.6E-5%, Au 1.3E-4%, em minério, em solo	1,500E+08	1,224E+08
Prata, Ag 9.7E-4%, Au 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, em minério, em solo	9,895E+07	8,076E+07
Alumínio, 24% em bauxita, 11% em minério bruto, em solo	1,536E+09	1,262E+09
Argila, bentonita, em solo	1,097E+08	9,676E+07
Argila, não especificado, em solo	1,981E+09	1,878E+09
Ouro, Au 1.1E-4%, Ag 4.2E -3%, em minério, em solo	6,751E+07	5,509E+07
Ouro, Au 1.3E-4%, Ag 4.6E -5%, em minério, em solo	1,238E+08	1,010E+08
Ouro, Au 1.4E-4%, em minério, em solo	1,482E+08	1,210E+08
Ouro, Au 2.1E-4%, Ag 2.1E-4%, em minério, em solo	2,264E+08	1,848E+08
Ouro, Au 4.3E-4%, em minério, em solo	5,611E+07	4,579E+07
Ouro, Au 4.9E-5%, em minério, em solo	1,344E+08	1,097E+08

TABELA 14 – RESULTADOS DOS VALORES EMERGÉTICOS DOS TRANSPORTES DE 16 t E DE 32 t (UNIDADE: sej/1 tkm) – CONTINUAÇÃO

Ouro, Au 6.7E-4%, em minério, em solo	2,081E+08	1,698E+08
Ouro, Au 7.1E-4%, em minério, em solo	2,346E+08	1,915E+08
Ouro, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, em minério, em solo	1,406E+07	1,147E+07
Fósforo, 18% em apatita, 12% em minério bruto, em solo	7,762E+05	6,941E+05
Fósforo, 18% em apatita, 4% em minério bruto, em solo	1,441E+07	1,317E+07
Zinco, 9.0% em sulfureto, Zn 5.3%, Pb, Ag, Cd, em solo	1,442E+09	1,202E+09
Ferro, 46% em minério, 25% em minério bruto, em solo	8,153E+09	7,137E+09
Gás, mina, gás de escape, processo minado, m <sup>3</sup>	1,259E+08	1,102E+08
Gás, natural, em solo	1,063E+10	9,657E+09
<b>EMERGIA TOTAL (sej/1 tkm)</b>	<b>1,409E+11</b>	<b>1,299 E+11</b>

As substâncias de maior “peso” no valor da emergia total utilizada, em ordem decrescente foram: o petróleo, o gás natural e o ferro. Devido ao petróleo ser um recurso não renovável, este elevou o valor total dos recursos não renováveis de ambos os processos (caminhão 16 t e caminhão 32 t), conforme as Figuras 15 e 16.

A Figura 15 representa a Emergia dos recursos do transporte 16 t, os índices foram: recursos renováveis = 6,60E+08 sej/1 tkm; recursos não renováveis = 1,22E+11 sej/1 tkm; recursos da economia = 1,82E+10 sej/1 tkm. Isto indica o alto uso de combustíveis fósseis, carvão e minérios.

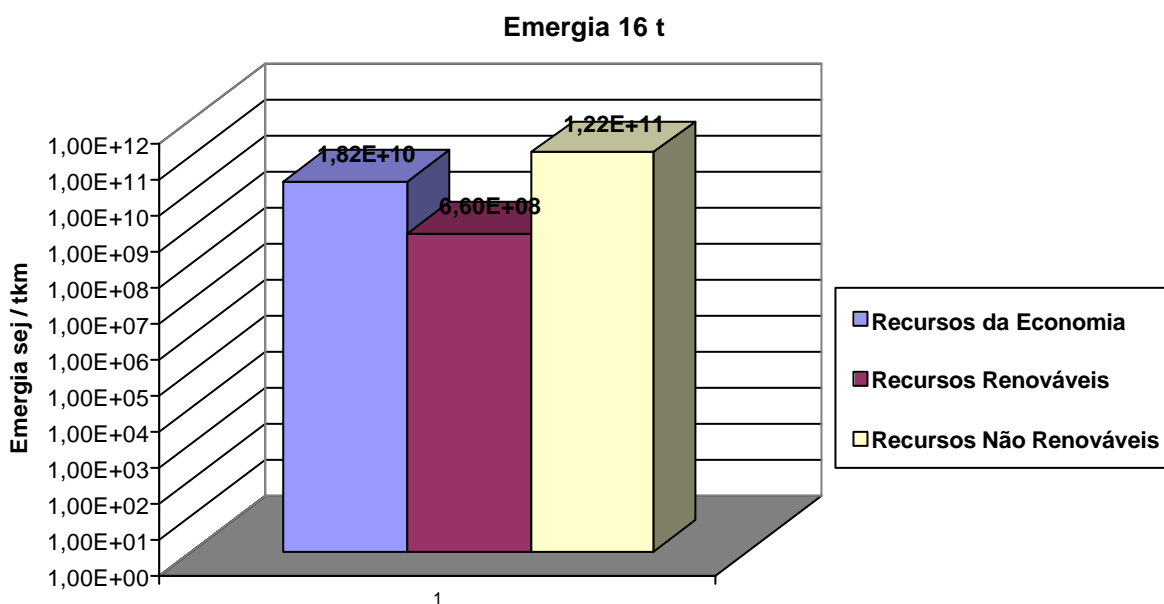


FIGURA 15 – EMERGIA CONFORME RECURSOS DO TRANSPORTE 16 t

Na Figura 16, os índices de Energia dos recursos do transporte 32 t foram: recursos renováveis = 5,45 E+08 sej/1 tkm; recursos não renováveis = 1,14 E+11 sej/1 tkm; recursos da economia = 1,57 E+10 sej/1 tkm. Logo, o uso de energias renováveis como energia eólica, solar e da chuva é pouco aproveitado resultando em um índice baixo dos recursos renováveis. O petróleo foi o recurso que obteve o maior índice, 1,037E+11 (caminhão 16 t) e 9,730E+10 (caminhão 32 t) representando mais de 70% da energia total nos dois processos de transporte.

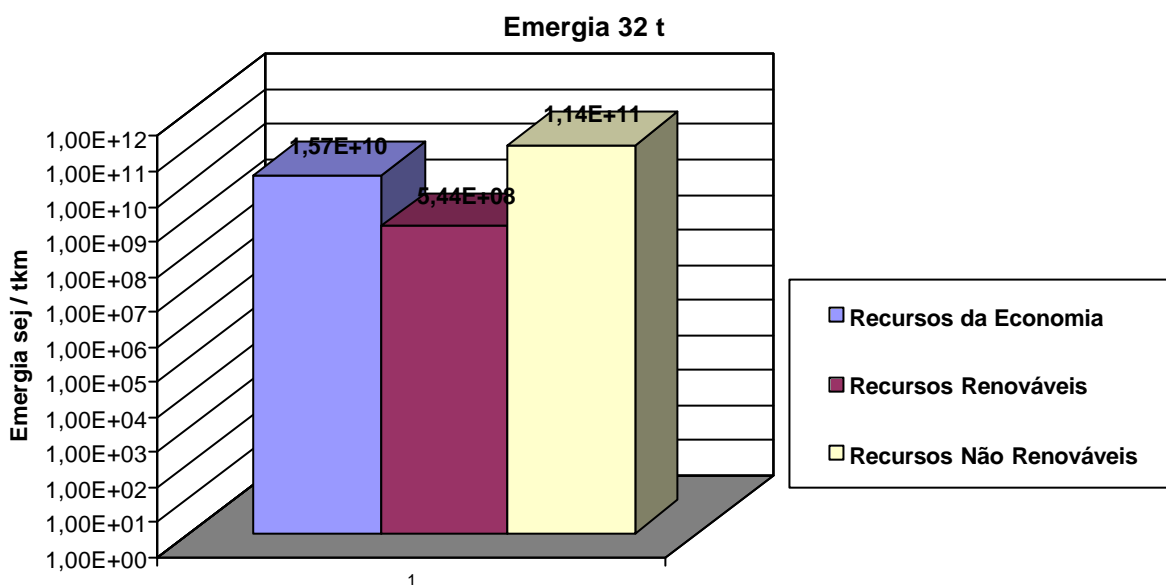


FIGURA 16 – ENERGIA CONFORME RECURSOS DO TRANSPORTE 32 t

Na Tabela 15 são apresentados os resultados dos índices emergéticos analisados. Todos os valores são adimensionais. Como podem ser observados, ambos os processos geram impactos ambientais elevados e apresentam baixo índice de sustentabilidade no ecossistema. Isso se deve a pouca utilização de recursos renováveis (energia solar, eólica, da chuva, entre outros). Conseqüentemente, ambos apresentaram alto ELR que indica um forte stress ambiental. Neste caso, o ELR do caminhão 32 t (237,950) foi maior que no caminhão de 16 t (212,378). Um dos motivos que para produzir um caminhão que transporta 32 t, utiliza-se mais material e energia do que um caminhão de 16 t.

TABELA 15 – ÍNDICES EMERGÉTICOS DO SETOR DE TRANSPORTE (1tkm)

Processo	Caminhão (transporte)	
	16 t	32 t
EYR rendimento emergético	7,729	8,287
EIR investimento emergético	0,148	0,137
ELR impacto ambiental	212,378	237,950
SI índice de sustentabilidade	0,036	0,035
%R percentual de energia renovável	0,468	0,418

Em relação ao EYR, quanto maior o valor, mais competitiva a empresa se torna, pois indica um bom aproveitamento dos recursos locais e renováveis. Logo, o EYR do transporte de 32 t (8,287) é um pouco mais competitivo que o EYR do transporte 16 t (7,729), representando uma diferença de 7%.

Como o valor de EIR é alto, o índice de investimento sugere que o processo será competitivo no meio, pois poderá ter um custo inferior, já que recebe um maior percentual de entrada emergética gratuita do meio ambiente com relação ao processo concorrente. Entretanto, processos com valor inferior a um (1), exploram uma menor porcentagem dos recursos, com relação a sua possibilidade. A intenção seria de aumentar a entrada da economia, elevando o valor do índice, mas mantendo um valor competitivo com relação ao processo alternativo. Isso foi que ocorreu no EIR do transporte 16 t (0,148), sendo um pouco mais competitivo economicamente que o EIR do 32 t (0,137). Os dois caminhões são pouco competitivos, pois os dados indicam que o uso de recursos gratuitos são baixos.

O índice do impacto ambiental (ELR) pode complementar informações adicionais do EYR, expressando o uso dos serviços ambientais pelo sistema. Os serviços ambientais são avaliados como a energia desta porção R do ambiente que é utilizada. Quando o valor do ELR é baixo, há um pequeno stress ambiental. Ao contrário, quando o valor do ELR aumenta, desta forma acontece um grande stress ambiental. Neste caso, o ELR do transporte 16 t (212,378) é mais vantajoso, apesar do ELR do transporte de 32 t ser maior, não chega a uma diferença de 20%.

Conforme BROWN; ULGIATI (2002) valores de SI menores que 1 são indicativos de produtos ou processos que não são sustentáveis a longo prazo. Sistemas com valores maiores que 1 indicam produtos e processos que dão

contribuições sustentáveis para a economia. Sustentabilidade em médio prazo pode ser caracterizada por um SI entre 1 e 5, enquanto produtos e processos com sustentabilidade em longo prazo têm SI maiores. Os dois processos (16 t e 32 t) tiveram índice abaixo de 1, com valor de 0,036 (16 t) e 0,035 (32 t) ou seja, não são sustentáveis ao longo do tempo. Neste caso, o caminhão 16 t foi ligeiramente um pouco melhor para cada tonelada quilômetro transportada. Ambos os processos estão longe de serem sustentáveis.

E em relação ao %R, percentual de energia renovável, os valores baixos eram esperados pela análise do inventário de ambos processos, pois a maioria das substâncias era combustíveis fósseis, minerais, e recursos não renováveis extraídos da natureza (conforme classificação da Tabela 8). Houve pouco aproveitamento dos recursos naturais, como a energia solar, energia eólica, energia das marés e água da chuva. Somente processos que tem um alto valor de porcentagem de energia renovável são sustentáveis.

Logo, a energia não é uma propriedade de estado. O mesmo fluxo ou produto pode ser obtido por diversos processos, especialmente os processos sob controle humano. Esses processos darão origem a diferentes transformidades para o mesmo produto.

A energia não é uma grandeza conservativa como a energia, a sua álgebra não segue a lógica da conservação, mas sim da “memorização”, isto é, a memória da energia ou energia total incorporada em um produto, processo ou serviço.

## 4.2 ANÁLISE EXERGÉTICA

Na parte referente às emissões de poluentes gasosos (saídas do processo), a avaliação de impacto e a valoração ambiental foram realizadas pela análise exergética, para as substâncias emitidas, em sua parte química, visto que, para estes elementos, a parte exergética é a que mais influencia em termos de danos ou de impactos ambiental. De acordo com OMETTO (2005), são postuladas ambientes com concentrações padrão para os compostos mais significativos, para as substâncias emitidas, são utilizados os valores das exergias química padrão das substâncias em ambientes padrão de referência, conforme o Anexo B. Tais valores

podem ser utilizados em avaliações exergéticas amplas, independentemente do local. Ou seja, foi considerado apenas a exergia química das substâncias.

Determinados valores de exergia química padrão de algumas substâncias (Anexo B) foram fornecidos na unidade kJ/Kmol, portanto foi necessário conhecer o valor da massa molar da respectiva substância química para transformar em kJ/kg, porque grande parte dos valores fornecidos peloecoinvent está expressa em unidade de massa, com a necessidade de padronizar os valores para ter um resultado em um denominador comum.

Por exemplo, no Anexo B, a amônia possui exergia química de 337.900 kJ/kmol e massa molar de 17,03 kg/kmol. Dividindo 337.900 kJ/kmol por 17,03 kg/kmol, obtem-se 19.841,46 kJ/kg.

Na Tabela 16 a seguir, apresentam-se os valores de exergia química das emissões de poluentes calculados através do inventário doecoinvent apresentadas no início deste capítulo (Tabelas 11, 12 e 13 – Dados do ICV para oecoinvent) com os respectivos valores padrões de exergia química das substâncias encontradas na literatura, conforme o Anexo B.

Analisando o valor exergético dos dois processos, para o caminhão de 16 t foi de 81,98 kJ/1tkm e para o caminhão de 32 t foi de 75 kJ./1tkm. O fato de a exergia quantificar as perdas de trabalho útil e as eficiências reais de processos faz com que esta possa ser utilizada e destinada a ajustar as variáveis de processo, a fim de reduzir as perdas, aumentar a eficiência e, com isso, otimizar o processo. Com isso há uma perda maior de energia no caminhão 16 t, ou seja, o caminhão 32 t é mais sustentável, possuindo menos perdas energéticas.

Examinando ainda a Tabela 16, as substâncias que tiveram maior perda exergética em ambos os transportes foram, em ordem decrescente: gás carbônico de origem fóssil, metano de origem fóssil, óleos, monóxido de carbono fóssil e óxidos de nitrogênio. As outras substâncias tiveram valores poucos insignificativos perto destes últimos citados. Uma das causas pode ser o fato que na análise emergética, o petróleo foi à entrada (matéria prima) mais utilizada em maior quantidade no processo de transporte, sendo utilizado e transformado durante o processo, resultando nos fluxos de saída, como os gases e os óleos.



TABELA 16 – VALOR EXERGÉTICO DOS TRANSPORTES (kJ/1 tkm)

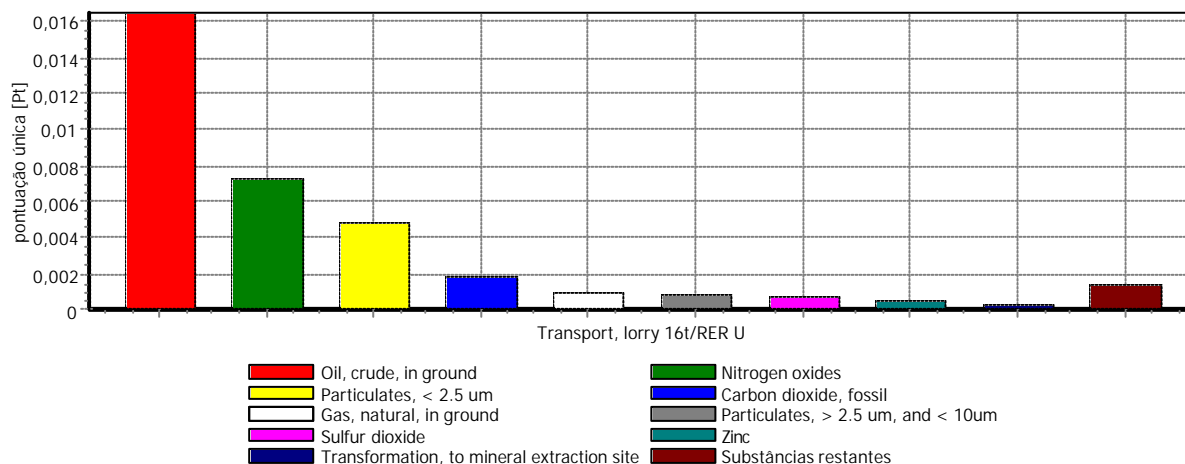
Substância	Destino	Caminhão 16t	Caminhão 32t
Gás carbônico, biogênico	Ar	0,141173699	0,1236902
Gás carbônico, fóssil	Ar	53,92597628	50,30818496
Gás carbônico, transformação terrestre	Ar	0,000632537	0,000544768
Óxidos de nitrogênio	Ar	3,086551686	2,464295373
Monóxido de carbono, biogênico	Ar	0,07347577	0,060324207
Monóxido de carbono, fóssil	Ar	3,300148434	2,761665051
Dióxido de enxofre	Ar	0,656070652	0,599821625
Hidrocarbonetos, alifáticos, alcanos, cíclico	Ar	1,10373E -05	9,46504E -06
Hidrocarbonetos, alifáticos, alcanos, não especificado	Ar	0,03158121	0,027478617
Hidrocarbonetos, alifáticos, não saturado	Ar	0,000833326	0,000723231
Hidrocarbonetos, aromático	Ar	0,008684403	0,007532579
Hidrocarbonetos, clorado	Ar	6,48431E -05	5,61404E -05
Hidrocarbonetos, alifáticos, alcanos, não especificado	Água	0,01133893	0,010653543
Hidrocarbonetos, alifáticos, não saturado	Água	0,001046656	0,000983399
Hidrocarbonetos, aromático	Água	0,046428844	0,043622978
Hidrocarbonetos, não especificado	Água	0,005249383	0,00482753
Monóxido de dinitrogênio	Ar	0,009630351	0,0079946
Tolueno	Ar	0,015386574	0,014323281
Tolueno	Água	0,01086542	0,010210234
Óxidos de nitrogênio	Ar	3,086551686	2,464295373
Metano, biogênico	Ar	0,013578269	0,011571126
Metano, fóssil	Ar	9,121166192	8,388353449
Nitrogênio	Água	6,40921E -06	5,77727E -06
Água	Ar	0,001208075	0,001043322
Hidrogênio	Ar	0,016684664	0,01464068
Enxofre	Água	0,00455934	0,002358548
Enxofre	Solo	0,00251902	0,004272604
Sulfeto de hidrogênio	Ar	0,003331417	0,002905039
Sulfeto de hidrogênio	Água	0,000344671	0,000308703
Etano	Ar	0,04634101	0,042525545
Amônia	Ar	0,036809731	0,03215308
Metanol	Ar	0,000932647	0,000807497
Metanol	Água	7,38635E -05	6,18592E -05
Etanol	Água	1,90384E -05	1,55374E -05
Etanol	Ar	0,000147955	0,000131684
Particulados, < 2.5 um	Ar	0,328549629	0,227017964
Particulados, > 10 um	Ar	0,29746942	0,259477371
Particulados, > 2.5 um, e < 10um	Ar	0,189753132	0,163769203
Benzeno	Ar	0,01330655	0,012239141
PAH, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos	Ar	0,00063097	0,00055288
PAH, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos	Água	0,00046758	0,000439159
VOC, Compostos Orgânicos Voláteis, origem não especificada	Água	0,030171318	0,028338145
Óleos, não especificados	Água	3,736214979	3,503884429
Óleos, não especificados	Solo	3,727740452	3,493068322
<b>Total</b>		<b>81,98372805</b>	<b>75,10117822</b>

Tanto no caminhão de 16 t e de 32 t, o gás carbônico de origem fóssil obteve um valor acima de 50 kJ/1tkm, ou seja mais da metade de toda exergia química perdida do processo.

Porém, não foram considerados todos os dados de saída do ICV do ecoinvent, pois esta lista é muito extensa e não foram encontrados na literatura todos os valores padrões de exergia, não contemplado toda as informações. Outra consideração, que o ICV do ecoinvent, não fornece dados de pressão e temperatura das substâncias em análise, assim, a exergia física foi descartada devido ser insignificante, e considerando apenas a exergia química das emissões, como o trabalho de OMETTO, (2005).

### 4.3 ANÁLISE PELO ECO-INDICATOR 99

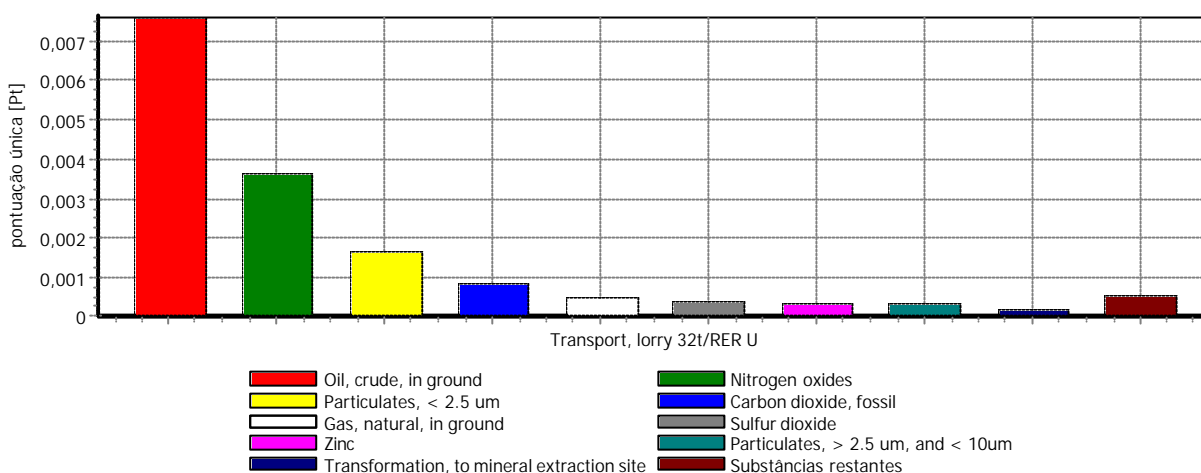
Os resultados dos fluxos analisados no método Eco-indicator 99, no software *Sima-Pro 7.0*. estão apresentados nas Figuras 17 e 18, em uma pontuação única, Pt. Foi utilizado um corte de 1%, ou seja, substâncias que tiveram valor abaixo de 1% na representação total, não entraram no gráfico por serem pouco representativos. Além disso, foram considerados todos os parâmetros do ecoinvent, desde os fluxos de entradas (matéria-prima) e fluxos de saídas (emissões para o ar, solo e água). Outro fator a destacar é que no Eco-indicator 99, consideram-se as saídas e entradas do processo em análise.



A analisar 1 tkm 'Transport, lorry 16t/RER U': Método: Eco-indicator 99 (H) V2.03 / Europe EI 99 H/A / pontuação única

FIGURA 17 – AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CAMINHÃO 16 t DA BASE DE DADOS ECOINVENT COM USO DO MÉTODO DE AICV ECOINDICATOR 99 H/A (SIMAPRO 7)

Conforme as Figuras 17 e 18, os fluxos de entrada e saída de maior contribuição para geração de impactos ambientais em ambos os tipos de transporte foram: o petróleo, os óxidos de nitrogênio, os particulados, o dióxido de carbono fóssil, o gás natural, o zinco, o dióxido de enxofre e outros. As substâncias restantes apresentaram um valor de pontuação única baixo, somando todas elas, atingiram um valor menor que 0,002 Pt em ambos caminhões, no de 16 t e no de 32 t.



A analisar 1 tkm "Transport, lorry 32t/RER U"; Método: Eco-indicator 99 (H) V2.03 / Europe EI 99 H/A / pontuação única

FIGURA 18 – AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO CAMINHÃO 32 t DA BASE DE DADOS ECOINVENT COM USO DO MÉTODO DE AICV ECOINDICATOR 99 H/A (SIMAPRO 7)

A Tabela 17 apresenta os valores de cada substância na pontuação única Pt no Eco-indicator 99. O maior valor foi do petróleo, como matéria-prima, com 0,016471 Pt no caminhão de 16 t, e 0,007627608 Pt no caminhão de 32 t. Comparando esses valores com a metodologia emergética, que utilizou basicamente as matérias-primas, pode-se constatar que o petróleo foi o recurso não-renovável que teve grande importância no impacto ambiental do processo de transporte pelos dois caminhões 16 t e 32 t. O gás natural também foi uma das substâncias que apresentou um índice elevado na análise emergética, ficando com o segundo maior valor.

Analisando as substâncias, como óxidos de nitrogênio, particulados e dióxidos de carbono observou-se que houve uma certa diferença no grau de importância quando comparados com a metodologia exergética, mas foram relevantes em ambos os processos.

Ao se comparar o valor total da pontuação única dos dois tipos de transporte, nota-se que o caminhão com menor capacidade, 16 t, implica maiores impactos (100% superior) em virtude da necessidade de maior quantidade de material e processos para obtenção do caminhão para a mesma quantidade de carga.

TABELA 17 – RESULTADOS DO TRANSPORTE 16 t E 32 t NO ECO-INDICATOR 99 (H)  
V2.03 / EUROPE EI 99 H/A (1 tkm)

Substância	Compartimento	Unidade	Caminhão 16 t	Caminhão 32 t
Óleo cru (petróleo), em solo	Matéria prima	Pt	0,016471	0,007627608
Óxidos de nitrogênio	Ar	Pt	0,00737	0,003656242
Particulados, < 2.5 um	Ar	Pt	0,00487	0,001664105
Dióxido de carbono, fóssil	Ar	Pt	0,001916	0,000867275
Gás, natural, em solo	Matéria prima	Pt	0,001024	0,000502086
Particulados, > 2.5 um, e < 10um	Ar	Pt	0,000875	0,000370824
Dióxido de enxofre	Ar	Pt	0,000798	0,000347778
Zinco	Solo	Pt	0,000496	0,000336802
Transformação, extração minéria	Matéria prima	Pt	0,000395	0,000204359
Substâncias restantes		Pt	0,001409	0,000543464
<b>Total</b>		<b>Pt</b>	<b>0,035624</b>	<b>0,016120543</b>

Comparando com os resultados obtidos na análise exergética, a ordem de grandeza dos índices obtidos nos dois processos não foi igual. A exergia tem o objetivo de avaliar sistemas produtivos, principalmente energéticos, com foco na redução de perdas e ganhos de eficiência e melhorias no processo com relação à segunda lei da Termodinâmica.

Enquanto isso, a pontuação única fornecida pelo *Eco-indicator 99*, baseia-se na metodologia de avaliação de impactos, descrita na revisão bibliográfica, que transforma os dados da planilha de inventário em pontuações de dano.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados tanto na análise emergética, na análise exergética quanto na ACV apontaram que o caminhão com capacidade de 16 t é mais impactante que o de 32 t. Contudo para a ACV a diferença existente é maior do que a apresentada nas outras duas metodologias.

Um dos fatores que pode ter contribuído com este resultado é o fato que na análise emergética apenas considera-se as entradas do processo, enquanto na ACV as emissões (saídas) também são avaliadas. Assim, neste trabalho, os valores emergéticos obtidos dependeram dos valores de transformidade e quantidade de cada fluxo de entrada. Além disso, a emergia avalia e valora o recurso a partir de sua cadeia produtiva, desde a formação dos recursos naturais primários. Portanto, alguns dados dos inventários do ecoinvent não foram utilizados em virtude de não ser conhecido o valor da transformidade, resultando de uma análise parcial dos dados do inventário.

Como se pode observar na AICV, o uso de combustíveis fósseis representa o grande vilão dos impactos ambientais, e na metodologia emergética, devido ao elevado uso de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural) em relação às outras substâncias, elevando o índice da carga ambiental (ELR) e quase zerando o índice de sustentabilidade (SI) e o percentual de energia renovável (%R). Deste modo, quanto mais utilizam recursos renováveis, melhor será para os processos, serviços ou produtos, que se tornarão mais competitivo e melhor para o ambiente, que não sofrerá um stress ambiental, mesmo investindo inicialmente, recursos provenientes da economia para uma melhor infra-estrutura, tornando-se sustentáveis.

Pode-se dizer que na medida em que o investimento emergético aumenta, a taxa de carga ambiental cresce. Isto comprova que, quanto maior uso de combustíveis, de minérios, matéria-prima, maior será o impacto ambiental que o sistema irá ocasionar.

Em relação à exergia, apesar de esta análise quantificar os impactos diretos físicos e químicos, por meio do trabalho absorvido pelo meio, os impactos indiretos, assim como os biológicos, sociais, econômicos e culturais que um poluente pode causar não são quantificados pela avaliação exergética. Assim só foi possível

quantificar a exergia emitida pelos poluentes de valores de exergia química padrão conhecidos.

A utilização da análise exérgica por si só, não traz consigo grandes contribuições quando o objetivo é a avaliação das externalidades, ou seja, o dano causado no ecossistema. Esta análise, em conjuntos com outras técnicas, como por exemplo, a avaliação de impactos no ciclo de vida (AICV) pode e deve complementar a avaliação e quantificação dos impactos. Mesmo assim, isto não significa que todos os custos externos inerentes a uma atividade produtiva sejam passíveis de serem analisados com a utilização restrita destas informações. Como um exemplo, convém mencionar que a análise com base na exergia e na AICV não carrega consigo a informação das dinâmicas socioeconômicas, por exemplo.

Além do mais, a avaliação exérgica, pouco acrescenta à análise em relação ao impacto neste estudo de caso. No entanto, a análise emergética, pode ser um importante método a ser utilizado em complemento com o Eco-indicator 99 na elaboração de um ACV objetivando sustentar uma análise de primeira ordem dos custos externos envolvidos na atividade produtiva.

Na questão do emprego do software *SimaPro 7.0*, este ajuda a desmistificar a ACV e fornece um apoio fundamental para o desenvolvimento dos trabalhos de tratamento dos dados e análise dos resultados e diferentes cenários. É importante destacar que sua base de dados retrata contextos internacionais (predominantemente o europeu), e nesta dissertação utilizou o ecoinvent como parâmetro.

Por fim, conclui-se que a gestão ambiental competente utilizada no produto, processo ou serviço, pode reduzir o consumo das fontes naturais, a geração de resíduos, de efluentes e de emissões, ampliando as atividades econômicas e a quantidade de empregos. Desse modo, as técnicas ambientais presentes atualmente, pode incentivar o desenvolvimento econômico com melhorias ambientais e ganhos sociais, auxiliando a sustentabilidade de uma sociedade.

## 5.1 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

É importante ressaltar que este trabalho envolveu a análise do setor de transporte de cargas, comparando dois tipos de caminhões com capacidade de cargas diferentes. Tem-se sugestão para trabalhos futuros:

- a) Realizar a análise do setor de transporte rodoviário, em comparação com outros setores existentes, como por exemplo, o setor ferroviário;
- b) Analisar as outras metodologias existentes da AICV, como o EPS 2000, TRACI, Ecopoints, entre outros, com a metodologia exergética e metodologia emergética;
- c) Utilizar outras metodologias para quantificar os impactos ambientais de um processo, produto ou serviço, a fim de verificar a subjetividade da AICV.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura: NBR ISO 14040**. Rio de Janeiro, 2001. 10 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida: NBR ISO 14042**. Rio de Janeiro, 2004. 17 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Informação e documentação- Trabalhos Acadêmicos – Apresentação: NBR ISO 14724**. Rio de Janeiro, 2002. 6 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Numeração progressiva das seções de um documento: NBR ISO 6024**. Rio de Janeiro, 2002. 2 p.

AMAZONAS, M.C. **Valor e Meio Ambiente. Elementos para uma Abordagem Evolucionista**. Tese (Doutorado). Campinas: Instituto de Economia – IE/UNICAMP, 2001.

ANNT - AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Transporte Terrestre – Números do Setor**, 5 de julho de 2007. Disponível em:< [www.antt.gov.br](http://www.antt.gov.br)>. Acesso em: 01 dez. 2007

BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**, New York. John Wiley & Sons, 1988. 850 p.

BENJAMIN, A. K. **Desenvolvimento de modelo para avaliação de softwares de apoio à análise do ciclo de vida**. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, USP, 2001.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, 2002.



BRANCO, S. M. **Eossistêmica - uma abordagem integrada dos problemas do meio ambiente**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

BROWN M. T.; BURANAKARN V. Emery indices e ratios for sustainable material cycles options, Resources Conservation & Recycling, **Journal Cleaner Production** v.38 1-22. 2003

BROWN M. T.; ULGIATI S., Emery Evaluations and Environmental Loading of Electricity Production Systems, **Journal Cleaner Production**, v.10 321-334, 2002.

CAMPBELL C.; LAHERRÉRE J., The end of cheap oil. **Scientific American**, March 1998, p. 78 – 83

CHEHEBE, J. R. B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos: Ferramenta Gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Editora Qualimark, 1998.

CIAMBRONE, D. F. **Environmental Life Cycle Analysis**. EUA: CRC Press LLC, Lewis Publishers, 1997.

COSTA, M. M. **Princípios de Ecologia Industrial Aplicados à Sustentabilidade Ambiental e aos Sistemas de Produção de Aço**. Tese (Doutorado). 257p. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ-COPPE, 2002.

CURRAN, M. A. **Environmental Life Cycle Assessment**. USA: McGraw-Hill, 1996.

DÜBENDORF, CH: **Swiss Centre for Life Cycle Inventories 2007**. Disponível em: <[www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)>. Acesso em: 05 mar. 2008.

EVANS, R. **A proof that exergy is the only consistent measure of potential work for chemical systems**. NH, PhD Thesis. Dartmouth College, Hanover. 1969

FLEURY, P. F. Terceirização logística no Brasil. In: FIGUEIREDO, K. F.; FLEURY, P. F.; WANKE, P. (Eds.). **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo de produtos e dos recursos**. São Paulo: Editora Atlas, p. 313-324, 2003.

FRISCHKNECHT R., JUNGBLUTH N., ALTHAUS H.-J., DOKA G., DONES R., HECK T., HELLWEG S., HISCHIER R., NEMECEK T., REBITZER G. AND SPIELMANN M. **Overview and Methodology. Ecoinvent report No. 1, v2.0.**

GOEDKOOOP, M. **LCIA: Indicators for Ecosystem damage. Product ecology consultants.** Pré Consultants BV. 2005. Disponível em: <www.pre.nl>. Acesso em: 20 mar. 2008.

GOEDKOOOP, M.; SPRIENSMA, R. **The Eco-indicator 99. A damage oriented method for life cycle impact assessment Methodology Report**, third edition. Pré Consultants BV. 2001. Disponível em: <www.pre.nl>. Acesso em: 20 fev. 2006.

GOLDEMBERG, J.. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento.** 2ª Edição **Revista.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo – USP, 2003.

GOLDENSTEIN M., ALVES M.F., AZEVEDO R.L.S.. A indústria de implementos rodoviários e sua importância para o aumento da eficiência do transporte de cargas no Brasil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 24, p. 241-260, set. 2006.

HOFSTETTER, P.; BRAUNSCHWEIG, A.; METTIER, TH.; MUELLER-WENK, R.; TIETJE, O.: Dominance Analysis in the Mixing Triangle: Graphical Decision Support for Comparisons with LCA. **Journal of Industrial Ecology**, 1999.

KATO, J. M. **Cenários Estratégicos para a Indústria de Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Disponível em: <http://teses.eps.ufsc.br>. Acesso em 21.jun.2007

KOTAS, T.J., **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis.** Florida, EUA: Ed. Krieger Publishing Co., 1995. 328 p.

LORA, E. E. S.. **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte.** 2ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.

LUO, Y.; WIROJANAGUD, P.; CAUDILL, R. J.. **Comparison of major environmental performance metrics and their application to typical electronic products**. P. 94-99. Multi-lifecycle Engineering Research Center (MERC), New Jersey Institute of Technology (NJIT), University Heights, Newark. New Jersey: USA, 2001.

MANZINI, E; VEZZOLI, C. **O Desenvolvimento de Produtos Sustentáveis: Os requisitos ambientais dos produtos industriais**. 1ª ed. reimpr. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo (USP), 2005.

MARTINEZ-ALIER, J. **Ecological economics: energy, environment and society**. Oxford, Reino Unido: Blackwell Publishers. 1994.

MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 4ªEd Rio de Janeiro: LTC, 2002.

MÜLLER-WENK, R.: **Depletion of Abiotic Resources Weighted on the Base of "Virtual" Impacts of Lower Grade Deposits in Future**. Universität St. Gallen, Switzerland. IWÖ Diskussionsbeitrag Nr. 57, , 1998.

NAZÁRIO, P. ...[et.al]. **O Papel do Transporte na Logística**. 2000. Disponível em: <<http://www.centrodelogistica.com.br>>. Acesso em: 3.jun.2006

ODUM H.T. et al. **Sistemas Ambientais e Políticas Públicas**. Programa de Economia Ecológica, Phelps Lab, Universidade da Florida, Gainesville, EUA. 1987

ODUM H.T., **Environmental Accounting** – Energy and Environmental Decision Making”, Ed. John Wiley & Sons Ltd., EUA:1996, 370p

ODUM, E. P. **Fundamentals of Ecology**. Philadelphia, EUA: Saunders. 1953.

ODUM, E.P. **Energy flow in ecosystems: a historical review**. **American Zoologist** 8: 11-18. EUA: 1968.

ODUM, H.T. **Ecological and general systems: an introduction to systems ecology**. EUA: University Press of Colorado, Colorado. 1994.

ODUM, H.T. Self-organization, transformity and information. **Science** 242: 1132-1139. Florida, EUA: 1988.

ODUM, H.T. **Systems Ecology: An Introduction**. New York: EUA, John Wiley & Sons, Inc. 1983.

ODUM, H.T.; ODUM, E.C. **Energy Basis for Man and Nature**. McGraw-Hill, New York, EUA: 1981. 337 pp.

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

ORTEGA, E. et al. **Check List para Análise Emergética de Agroecossistemas**. Campinas: UNICAMP, 2003a. Disponível em:<<http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/C12-checklist.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2007.

ORTEGA, E. et al. **Engenharia Ecológica e Agricultura Sustentável: Uma introdução à metodologia emergética usando estudos de casos brasileiros**. Campinas: UNICAMP, 2003b. Disponível em:<<http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/index.htm>>. Acesso em: 28 out. 2006.

PEGORARO, L.A., GOEDKOOP, M; UGAYA, C.M.L. TADANO, Y.S. Life Cycle Impact Assessment (LCIA) and some important considerations to Brazil. **Artigo, CILCA 2007** (Conferência Internacional do Ciclo de Vida). São Paulo, 2007.

PISA J. TSATSARONIS, G., **Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems – Application to the CGAM problem**. **Energy International Journal**, vol. 19, No 3, p. 287-321, 1994.

RIBEIRO, S. K. R.. El impacto ambiental del transporte rodoviario y ferroviario de cargas In: **Seminario Competencia y complementacion de los modos carretero y ferroviario en el transporte de carga** Santiago do Chile, 6 de noviembre de 2001

ROSEN, M. A.; DINCER, I. Exergy analysis of waste emissions. **International Journal of Energy Research**. n. 23. p. 1153 – 1163, 1999.

ROSEN, M.A.; DINCER, I. Exergy and Environmental Impact. **International Journal of Energy Research**, n. 21. p. 643-654. 1997

SCHROEDER E.M., CASTRO J.C. Transporte Rodoviário de Carga: Situação Atual e Perspectivas. **Revista do BNDES** 12/1996, Rio de Janeiro, 1996 . Disponível em:< <http://www.bndes.gov.br/conhecimento/revista/carga.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2007.

SILVA, J. G. **Análise do ciclo de vida de tijolos prensados de escória de alto forno**. Vitória. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, 2005.

SZARGUT J., MORRIS, D.R.; STEWARD, F.R., “**Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Process**”, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 332 p. 1988

SZARGUT, J. Exergy analysis of thermal processes; ecological cost. **In: Proceedings of the International Workshop “Advances in Energy Studies: energy flows in ecology and economy**. Porto Venere, Itália. 1999

UGAYA, C.M.L. Avaliação do Ciclo de Vida. **Apostila**. 2009.

UGAYA, C., RODRIGUES, D., SILVA, G.A., HISCHIER, R. Quality Guidelines’ proposal for a future Brazilian LCI database. **CILCA 2007**. Proceedings of CILCA 2007.

ULGIATI S.; BROWN M. T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions – The case of electricity production. **Journal Cleaner Production**, 10, p. 335- 348, Siena: Itália: 2002.

ULGIATI S.; ODUM H.T.; S. BASTIANONI; Exergy use, environmental loading and sustainability An exergy analysis of Italy, Ecological Modelling. **Journal Cleaner Production**, 10, 73p. 215-268, Siena: Itália: 1994

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Biblioteca Central. **Normas para apresentações de trabalhos: gráficos**. Curitiba: Editora da UFPR, 2000. v. 10.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Biblioteca Central. **Normas para apresentações de trabalhos: redação e editoração**. Curitiba: Editora da UFPR, 2000. v. 8.

VALENTE, A. M. **Gerenciamento de Transporte e Frotas**. São Paulo: Pioneira, 1997.

VALENTE, A. M. [et.al]. **Gerenciamento de Transporte e Frotas**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning. 2001. Anuário NTC e Logística. São Paulo. Nº2. p. 118-126. 2005.

VAN WYLEN, G.;SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. São Paulo. Editora Edgard Blucher, 1997.

VIEIRA, L. S. R. DONATELLI, J. L. M., CRUZ, M. E. C. Integration of a mathematical exergoeconomic optimization procedure with a process simulator: application to the CGAM system. **Engenharia Térmica**, vol 4, No 2, p163 -172, 2005.

WANKE, P. **Organização do fluxo de produtos como fase da estratégia logística de produtos acabados: uma síntese dos enfoques estático e dinâmico**. Tese de doutorado. Rio de Janeiro: Programa de Engenharia de Produção, COPPE/UFRJ, 2003.

WEIDEMA, B.. **Environmental Assessment of Products**. A Textbook on Life Cycle Assessment , Finland: The Finnish Association of Graduate Engineers TEK, Helsinki 1997.

WALL, G.; GONG, M. On: exergy and sustainable development – Part 1: Conditions and concepts. Exergy, an **International Journal**, v1 n.3, p 128-145, 2001

## ANEXO A – TRANSFORMIDADE DE ALGUNS ELEMENTOS

TABELA 18 – TRANSFORMIDADE DE ALGUNS ELEMENTOS

Substância	Transformidade	Unidade	Classificação	Referência
Energia solar	1	sej/J	R	ODUM, (1996)
Água (geral)	1,10E+05	sej/J	N	ODUM, (1996)
Vento	1.495	sej/J	R	ODUM, (1996)
Água dos rios – escoamento gravitacional	27.874	sej/J	R	ODUM, (1996)
Água dos rios	1,85E+05	sej/g	R	ODUM, (1996)
Diesel	5,50E+04	sej/J	F	ODUM, (1996)
Etanol	6,00E+06	sej/J	F	ODUM, (1996)
Areia	1,00E+12	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Madeira (plantação do Brasil)	1,64E+11	sej/kg	N	ORTEGA, (2003a)
Carvão	1,00E+12	sej/kg	N	ORTEGA, (2003a)
Zinco	6,80E+13	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Petróleo	2,76E+12	sej/kg	N	ORTEGA, (2003a)
Cobre	6,80E+13	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Prata	3,00E+17	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Alumínio	1,63E+13	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Argila	1,71E+12	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Produtos finais de ferro	9,2 – 18,0E+11	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Bauxita	8,5 – 10,0E+11	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Ouro	4,4E+17	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Prata	3,0E+17	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Operador de máquina no meio rural	1200 000	sej/J	F	ORTEGA, (2003a)
Fosfato - rocha extraída	35,0E+11	sej/kg	N	ORTEGA, (2003a)
Plásticos	43,0E+11	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Vidro	8,4E+11	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Aço refinado	18E+11 – 26E+11	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Cimento	330,0E+11	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Ligas de cobre e zinco	680,0E+11	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Ferro	1,80E+12	sej/kg	F	ORTEGA, (2003a)
Energia elétrica	1.65E+05	sej/J	F	BROWN; ULGIATI, (2002)
Borracha	4,30E+09	sej/g	F	BROWN; ULGIATI, (2002)
Pvc	5,87E+09	sej/g	F	BROWN; ULGIATI, (2002)
Produtos químicos	2,65E+09	sej/g	F	BROWN; ULGIATI, (2002)
Gás natural	4,80E+04	sej/J	N	BROWN; ULGIATI, (2002)
Pedra	1,50E+09	sej/g	F	BROWN; ULGIATI, (2002)

## ANEXO B – EXERGIA QUÍMICA ESPECÍFICA DE ALGUMAS SUBSTÂNCIAS

TABELA 19 – EXERGIA QUÍMICA ESPECÍFICA DE ALGUMAS SUBSTÂNCIAS

Substância	Fórmula	Massa Molar M (kg/kmol)	Estado	Exergia Química Padrão ( $b_{ch}$ )	Unidade	Referência
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44,01	gás	451,49	kJ/kg	SZARGUT et al., (1988)
Óxido de nitrogênio	NO	30,01	gás	2.962,73	kJ/kg	SZARGUT et al., (1988)
Monóxido de carbono	CO	28,01	gás	9.821,32	kJ/kg	SZARGUT et al., (1988)
Dióxido de enxofre	SO <sub>2</sub>	64,06	gás	4.892,07	kJ/kg	SZARGUT et al., (1988)
Hidrocarboneto	HC	13,018	gás	42.876,92	kJ/kg	SZARGUT et al., (1988)
Dióxido de nitrogênio	NO <sub>2</sub>	46,01	gás	1.208,55	kJ/kg	SZARGUT et al., (1988)
Trióxido de enxofre	SO <sub>3</sub>	80,06	gás	3.111,33	kJ/kg	SZARGUT et al., (1988)
Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92,134	gás	42.797,07	kJ/kg	SZARGUT et al., (1988)
Óxido Nitroso	N <sub>2</sub> O	44,01	gás	2.428,84	kJ/kg	SZARGUT et al., (1988)
Metano	CH <sub>4</sub>	16,04	gás	51.838,71	kJ/kg	SZARGUT et al., (1988)
Monóxido de nitrogênio	NO	30,01	gás	88.900	kJ/kmol	MORAN; SHAPIRO, (2002)
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	14,01	gás	720	kJ/kmol	MORAN; SHAPIRO, (2002)
Oxigênio	O <sub>2</sub>	32,00	gás	3.970	kJ/kmol	MORAN; SHAPIRO, (2002)
Água	H <sub>2</sub> O	18,02	gás	9.500	kJ/kmol	MORAN; SHAPIRO; (2002)
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	2,016	gás	263.100	kJ/kmol	MORAN; SHAPIRO, (2002)
Enxofre	S <sub>2</sub>	64,12	gás	609.600	kJ/kmol	MORAN; SHAPIRO, (2002)
Sulfeto de hidrogênio	H <sub>2</sub> S	34,076	gás	812.000	kJ/kmol	MORAN; SHAPIRO, (2002)
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,07	gás	1.495.840	kJ/kmol	MORAN; SHAPIRO, (2002)
Amônia	NH <sub>3</sub>	17,03	gás	337.900	kJ/kmol	MORAN; SHAPIRO, (2002)
Álcool metílico	CH <sub>3</sub> OH	32,04	líquido	718.000	kJ/kmol	MORAN; SHAPIRO, (2002)
Álcool etílico	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,07	líquido	1.357.700	kJ/kmol	MORAN; SHAPIRO, (2002)
Material particulado	x	x	sólido	7.878	kJ/kg	COSTA, (2002)
Óleos e graxas	x	x	sólido	37.450	kJ/kg	COSTA, (2002)
PAH	x	x	gás	41,000	kJ/kg	COSTA, (2002)
VOC	x	x	gás	42.239	kJ/kg	COSTA, (2002)