

JEAN CARLO CAMASMIE DE PAOLA

**ANÁLISE AMBIENTAL DE AÇOS
FORJADOS**

**Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Metalúrgica e de
Materiais**

**Orientador:
Professor Doutor
Jorge Alberto Soares Tenório**

**São Paulo
2004**

**CONSULTA
FT-1971**

OK

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Jorge Alberto Soares Tenório pela orientação e amizade ao longo desses anos.

Os meus mais sinceros agradecimentos a Christina e a Maria Aparecida pelo amor, pela paciência e pelo carinho nos momentos difíceis.

Aos meus tios Guido e Tita Barone.

A toda uma safra de doutores: Alexandre M. B., Manoel, Marcelo, Antonio, Julinho, Izabel, Jeff e Denise que fizeram da Escola um lugar melhor.

Aos engenheiros Carlos Henrique, Elio, Claudio e Marcelo pelo apoio e paciência na hora de transmitirem seus conhecimentos.

Agradeço a doutoranda Maria Nogueira Marques pela amizade e ajuda inestimável na finalização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelas facilidades e laboratórios gentilmente cedidos.

Aos meus amigos do Laboratório de Fenômenos de Superfície.

A Ana Paola Mercadante por todos esses anos, que nossos descaminhos não obscureçam tão linda obra.

Ao Amilton, pela sua amizade incondicional, por seu senso crítico apurado e por possibilitar novos horizontes.

A Paula, pela nossa amizade que atravessa o tempo.

A Maria Luiza e ao João pelos ensinamentos, pelos livros e pelos caminhos.

Ao Jeanzinho e a Fernanda, que fazem meu mundo girar.

Ao Domenico
Fortitudine vincimus

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é avaliar os impactos ambientais gerados pelas etapas integradas de fusão, aquecimento e conformação mecânica de aços forjados. Esses impactos serão avaliados e analisados utilizando-se a técnica da Análise do Ciclo de Vida. A partir dessas avaliações, soluções de melhoria do processo serão sugeridas. A Análise do Ciclo de Vida é uma ferramenta para avaliar impactos ambientais de produtos e processos. Esta análise é dividida em quatro etapas: objetivo e escopo, inventário, análise dos impactos e análise dos resultados. O aço apresenta uma tecnologia de fabricação já estabelecida; entretanto, o seu processamento gera emissões, efluentes, resíduos, consome energia e matérias-primas. A utilização da técnica da Análise de Ciclo de Vida para o aço visa avaliar e quantificar os principais geradores de tensão ambiental do processo. Os principais geradores de tensão das usinas não integradas são o CO₂ e o consumo de energia não renovável. Para as etapas estudadas o valor emitido de CO₂ é de 750 kg/taço e a energia total consumida é de 4,4 GJ/taço, sendo 1,4 GJ provenientes de fontes não renováveis. A melhor técnica para captura de CO₂, para a usina é o reflorestamento, a um custo aproximado de US\$ 47,00 /taço. A otimização do processo de aquecimento dos lingotes pode gerar um crédito de CO₂ de 80. tCO₂/mês que pode ser comercializado na forma de crédito de carbono. O efeito estufa é o principal impacto ambiental do processo de manufatura de aços forjados.

ABSTRACT

This study aims at assessing the environmental impacts of stemming process, from the melting, heating and forming of forged steel. The Life-Cycle Assessment technique was used to assess and analyze such impacts. Subsequently, suggestions based on such analyses, aimed at improving the above-mentioned processes world proposal will be made. Life-Cycle Assessment is a tool employed for assessing the environmental impacts of products and processes. Such assessment comprises four steps: objective and scope, inventory, impact assessment, and result assessment. Although the technology for steel making is already consolidated, it generates emissions, effluents, and waste, as well as consuming energy and raw materials. The Life-Cycle Assessment technique was used in order to assess and quantify the main elements generating environmental tension in that process. The main elements generating environmental tension in mini mills are CO₂ and the consumption of non-renewable energy. The amount of CO₂ emitted in the manufacturing phases examined in this study are 750 kg/ tsteel and the total energy consumed is 4.4 GJ/ tsteel, of which 1.4 GJ/ are from non-renewable sources. The lowest-cost technique for capturing CO₂ is reforestation, costing approximately US\$ 47/ tsteel. Optimizing the ingot heating process may generate a CO₂ credit of 80 tCO₂ monthly, which may in turn be traded as carbon credit. The major environmental impact stemming from the manufacturing process of forged steel is the greenhouse effect.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Abrangência das normas 140XX.....	13
Tabela 2 – Analogias entre as normas de gerenciamento ambiental	15
Tabela 3 – Formulários para coleta de dados do inventário.....	24
Tabela 4 – Lista de geradores de tensão.....	31
Tabela 5 – Fatores de conversão entre os diversos gases estufa e o dióxido de carbono.....	35
Tabela 6 – Correlação entre os dados do inventário e impactos ambientais.....	36
Tabela 7 – Valores médios globais de alguns impactos ambientais, segundo Curran.....	36
Tabela 8 – Fração relativa (FR) dos impacto dos valores do inventário.....	37
Tabela 9 – Dois modelos de atribuição de valores para impactos ambientais.....	37
Tabela 10 – Dois modelos de atribuição de valores para o cálculo do Índice Ambiental.....	38
Tabela 11 – Valores de albedo para superfícies.....	43
Tabela 12 – Contribuições relativas dos gases e custos da mitigação para o aquecimento global.....	48
Tabela 13 – Contribuições relativas dos gases estufa ao aquecimento global.....	48
Tabela 14 – Emissões per capita de CO ₂ em 1998.....	49
Tabela 15 – Impacto anual devido ao aquecimento de 2,5 °C.....	54
Tabela 16 – Avaliação do custo anual do prejuízo pelo aquecimento de 2,5 °C.....	54
Tabela 17 – Metas para a emissão de gases estufa para diversos países.....	57
Tabela 18 – Efeito da rota de processamento e da composição da carga na emissão de CO ₂	65

Tabela 19 – Práticas e tecnologias visando diminuir o gasto energético.....	68
Tabela 20 – Importância relativa dos impactos segundo o grau de desenvolvimento dos países.....	86
Tabela 21 – Necessidades Industriais.....	88
Tabela 22 – Necessidades Regionais.....	89
Tabela 23 – Comparação entre os métodos de análise.....	91
Tabela 24 – Listagem de bancos de dados para ACV.....	96
Tabela 25 – Divisão da sucata segundo a sua proveniência.....	101
Tabela 26 – Rendimento da recuperação de sucata de aço na Europa.....	102
Tabela 27 – Produção de aço estimada no mundo em 2002.....	102
Tabela 28 – Composição química média do GN.....	115
Tabela 29 – Volumes gerados de CO ₂ para 100 NL de GN.....	116
Tabela 30 – Média das temperaturas dos lingotes.....	117
Tabela 31 – Valores do inventário: resíduos.....	118
Tabela 32 – Valores do Inventário: Insumos, emissões e energia elétrica.....	118
Tabela 33 – Correlação entre os dados do inventário e impactos ambientais.....	125
Tabela 34 – Valores médios globais para os impactos considerados neste trabalho.....	125
Tabela 35 – Fração relativa (FR) dos impactos dos valores do inventário.....	125
Tabela 36 – Três modelos de atribuição de valores para impactos ambientais.....	126
Tabela 37 – Três modelos de atribuição de valores para o cálculo do Índice Ambiental.....	126
Tabela 38 – Lista da relação entre os geradores de tensão e os impactos associados.....	128
Tabela 39 – Índices de mérito para os impactos.....	130

Tabela 40 – Impactos ambientais e geradores de tensão selecionados do processo.....	131
Tabela 41 – Valores dos impactos para os dois modelos.....	132
Tabela 42 – Tributos sobre a emissão do carbono, modificado a partir de Newell.....	144
Tabela 43 – Valores estimados para alguns geradores de tensão considerados, normalizados para 1 t aço.....	146

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – As dimensões de um estudo completo de ACV.....	8
Figura 2 – Modelo Conceitual da ACV.....	18
Figura 3 – Representação do inventário em uma unidade funcional..	26
Figura 4 – A evolução de um <i>gerador de tensão</i> em vários graus de impacto.....	33
Figura 5 – Balanço de energia da Terra.....	44
Figura 6 – Intensidade de energia incidente e refletida associada a comprimentos de onda de gases do efeito estufa.....	46
Figura 7 – Resultados de estimativas das variações da temperatura média da Terra.....	52
Figura 8 – Variação da temperatura da Terra e das concentrações de CO ₂ e de metano, a partir de ar atmosférico aprisionado no gelo na Antártica em função do tempo já transcorrido (em milhares de anos).....	55
Figura 9 – Emissão de CO ₂ versus massa de ferro na carga.....	64
Figura 10 – Variação da emissão de CO ₂ pela adição de sucata na carga em conversores.....	66
Figura 11 – Selo verde de diferentes países.....	76
Figura 12 – Fluxograma da Análise para o Meio Ambiente.....	79
Figura 13 – Inter-relação da ACV e o do PMA.....	81
Figura 14 – Paradigma da Análise de Risco.....	93
Figura 15 – Interação entre os três sistemas funcionais da ACV ¹²	95
Figura 16 – Ciclo de Vida baseado no processo (ACVP).....	98
Figura 17 – A ACV dividida em etapas relativamente a processos e matérias-primas.....	99
Figura 18 – Fluxograma do forjamento.....	104
Figura 19 – Imagens ilustrativas das partes do processo estudado.....	106

Figura 20 – Organograma esquemático de algumas etapas da produção de uma peça forjada.....	107
Figura 21 – Inventário da ACV, apresenta os dados de entrada de massa obtidos neste estudo.....	120
Figura 22 – Inventário da ACV, apresenta os dados de entrada de energia obtidos neste estudo.....	121
Figura 23 – Inventário da ACV, apresenta os dados de saída (emissões, efluentes e resíduos) obtidos neste estudo.	122
Figura 24 – Inventário da ACV, apresenta todos os dados (de entrada e de saída) obtidos neste estudo.....	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	- Análise do Ciclo de Vida
BS	- British Standards
DBO	- Demanda Química de Oxigênio
DQO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
EMAS	- Eco-Management and Audit Scheme
EPA	- Environmental Protection Agency
FEA	- Forno Elétrico a Arco
IISI	- International Iron and Steel Institute
IPCC	- Intergovernmental Panel of Climate Change
ISO	- International Standards Organisation
LCA	- Life-cycle Assessment
MRI	- Midwest Research Institute
ONG	- Organização não-Governamental
PMA	- Projeto para Meio Ambiente
REPA	- Research and Environmental Profile Analysis
SETAC	- Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SGA	- Sistema de Gestão Ambiental
UNEP	- United Nations Environment Programme

OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é avaliar os impactos ambientais gerados pelas etapas integradas de fusão, aquecimento e conformação mecânica de aços forjados. Esses impactos serão avaliados e analisados utilizando-se a técnica da Análise do Ciclo de Vida. A partir dessas avaliações, soluções de melhoria do processo serão sugeridas.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTADE FIGURAS.....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	viii
OBJETIVOS.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 INTRODUÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1 Histórico.....	3
2.2 Definições de ACV.....	8
2.3 As Normas ISSO 140XX.....	11
2.3.1 Sistemas de Gestão Ambiental e a ACV.....	13
2.4 ACV.....	16
2.4.1 As Fases da Análise do Ciclo de Vida.....	17
2.4.1.1 Objetivo e Escopo.....	18
2.4.1.2 Inventário.....	21
2.4.1.3 Análise do Impacto.....	28
2.4.1.4 Aperfeiçoamento da Análise.....	38
2.5 Gases de efeito estufa.....	41
2.5.1 Dióxido de Carbono.....	50
2.5.2 Aquecimento Global.....	50
2.5.3 A comunidade internacional.....	56
2.6 Propostas desenvolvidas para a redução das emissões de gases estufa.....	58
2.6.1 Programa de minimização na geração de resíduos fora das siderúrgicas.....	58

2.6.2 Programas de minimização na geração de resíduos em siderúrgicas.....	61
2.6.2.1 Soluções propostas.....	62
2.7 Aplicações da ACV.....	72
2.7.1 Selo Verde.....	73
2.7.2 ACV aplicada a projetos.....	76
2.8 Casos e limitações da ACV.....	82
2.8.1 Casos de aplicações de ACV.....	82
2.8.2 Limitações da ACV.....	85
2.9 Comparação da ACV com outros métodos de análise.....	90
2.9.1 A ACV e as áreas tecnológica, ambiental e social.....	93
2.10 Banco de dados.....	95
2.11 ACV Conduzida de forma Seqüencial e Cumulativa para materiais e Produtos.....	97
2.12 O Aço e a Análise do Ciclo de Vida.....	99
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	105
3.1 A ACV cumulativa.....	107
3.2 Valores apresentados.....	107
4. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE AÇOS FORJADOS.....	109
4.1. Definição dos objetivos, do escopo e classificação dos dados..	110
4.1.1 Objetivo.....	110
4.1.2 Escopo.....	110
4.1.3 Classificação dos dados.....	112
4.2 Inventário.....	118
4.3 Análise do impacto.....	124
4.3.1 Quantificação do impacto ambiental devido ao CO ₂	124
4.4. Aperfeiçoamento da análise.....	133
4.4.1 FEA.....	133
4.4.2. Energia elétrica.....	134

4.4.3 Temperatura do lingote.....	135
4.4.4 Hidrocarbonetos Líquidos (graxas e óleos).....	135
4.4.5 GN.....	136
4.4.6 Escória.....	136
4.4.7 Carepa.....	137
4.4.8 CO ₂	138
4.4.9 Taxas e impostos como ferramenta para a redução das emissões de CO ₂	144
4.4.10 Custos relativos a emissões e resíduos.....	145
5 CONCLUSÕES.....	147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	149

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos e serviços exigiu que houvesse um aumento na produção e por conseqüência uma extração rápida e desordenada dos recursos naturais, o que acarretou um aumento na liberação de resíduos, de efluentes e nas emissões¹.

Como conseqüência dos problemas decorrentes da falta de cuidado com o meio ambiente, os governos de diversos países do mundo, como os Estados Unidos² e o Brasil^{3,4}, passaram a elaborar legislações que restringissem cada vez mais o descarte dos poluentes, bem como formas de responsabilização da indústria não só pelos resíduos produzidos em seu processo produtivo, mas também quanto ao descarte de seus produtos pós-consumo⁵.

Nos últimos 25 anos, além das políticas governamentais, destaca-se o fato de que cresceu a conscientização da população quanto aos problemas do meio ambiente⁶, culminando com o surgimento de várias organizações não-governamentais (ONGs), que acabaram assumindo uma estrutura organizacional similar à das corporações, tendo em vista o elevado número de participantes e colaboradores.

A necessidade premente de uma norma orientadora da produção, de tal forma a minimizar os impactos ambientais, foi uma das conclusões da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, Rio 92, e é considerada como um dos marcos iniciais da formação das normas *ISO*, denominadas *ISO 140XX*, que tratam das questões ambientais⁷.

Como exemplo do interesse das empresas em diminuir os impactos ambientais gerados pelos seus produtos, e atender a aspiração da população na preservação do meio ambiente cita-se o caso de empresas alimentícias⁵ que substituíram as embalagens dos sanduíches, que eram de isopor por papelão reciclado.

Outra forma buscada pelas empresas para a solução desta nova demanda de mercado, foi o desenvolvimento de projetos de selo verde, que abriu a oportunidade para externar à sua política relativa ao meio ambiente⁸.

Segundo Graedel e Allembly⁹, os Estados Unidos representam hoje aproximadamente 8% da população mundial e consomem 40% da energia do planeta, para que toda a população da terra apresentasse o mesmo padrão de vida dos americanos, o consumo mundial de recursos naturais teria que aumentar entre 4 e 6 vezes. No entanto, um aumento dessa ordem de maneira desordenada e/ou rápida causaria conseqüências desastrosas para o meio ambiente, tanto no que diz respeito à extração e produção, como no que diz respeito aos impactos decorrente da geração de resíduos e efluentes⁹.

É neste contexto que se insere a Análise do Ciclo de Vida (ACV) dos produtos, que pode ser utilizada como ferramenta para auxiliar a tomada de decisões no que se refere a performance ambiental de produtos e processos¹⁰.

2 INTRODUÇÃO TEÓRICA

2.1 Histórico

Durante a década de sessenta, quando se iniciaram os primeiros estudos de ACV, alguns dos símbolos da sociedade moderna e consumista eram as embalagens de bebidas, as fraldas descartáveis, os plásticos e uma nova geração de produtos descartáveis¹¹.

Isso fez com que houvesse um aumento do resíduo sólido nas cidades criando a necessidade do desenvolvimento de uma ferramenta que pudesse avaliar as fontes de matéria-prima e os impactos ao meio ambiente⁹.

O resultado mais importante desta época foi entender quão complexas e interligadas são as relações entre os produtos e as embalagens com o meio ambiente, seja na extração ou no descarte¹².

Em 1965, a Coca-Cola patrocinou um estudo realizado pelo Instituto de Pesquisa Midwest (Kansas City, MO – MRI *Midwest Research Institute*) cujo objetivo era a comparação entre diferentes tipos de embalagens para refrigerantes. O objetivo deste estudo era determinar qual das embalagens apresentava índices melhores de emissão e de desempenho com relação à preservação dos recursos naturais¹³.

A técnica de quantificação da utilização dos recursos naturais e dos índices de emissão utilizada pela Coca-Cola nesse estudo tornou-se conhecida como Análise do Perfil dos Recursos do Meio Ambiente (REPA - *Resources and Environmental Profile Analysis*)^{14,15}.

Em 1973, com a primeira grande crise do petróleo, que ocorreu em razão do boicote dos países produtores (OPEP), o preço o barril aumentou mais de 15 vezes¹³, obrigando os países consumidores a iniciarem projetos no sentido de substituir ou diminuir a sua dependência.

Assim, não apenas a nova tendência em preservar o meio ambiente mas também a crise do petróleo aumentaram a pressão por equipamentos mais eficientes e por uma economia dos recursos naturais.

O conhecimento sobre a escassez da matéria-prima e dos recursos energéticos despertou interesses em encontrar maneiras de gerenciar o uso da energia e o abastecimento de recursos para o futuro¹².

A análise do ciclo de vida se apresentou como a ferramenta ideal para estudar e correlacionar os efeitos causados ao meio ambiente devido à extração de matérias-primas, pelo uso de energia e pelo descarte do produto, de resíduos e de efluentes¹³. O inventário desse processo é, portanto, a lista que apresenta os valores relativos ao balanço de massa e de energia de cada etapa da manufatura¹⁶.

Estudos foram realizados buscando avaliar os processos produtivos e formas de racionalizar o consumo de fontes energéticas não renováveis¹³.

Os primeiros estudos sobre a avaliação do ciclo de vida (ACV), de forma mais completa, foram realizados na Europa e nos EUA nos anos setenta, nos quais se estudaram os efeitos ambientais de todas as fases da vida de um produto, avaliando-se desde o processo de extração da matéria-prima até o seu descarte final^{17,18}.

Em 1974, este modelo de análise foi melhorado, especificando algumas formas de impacto e utilizando a técnica de análise conhecida como do **berço ao túmulo**, por estudos conduzidos no MRI. A agência de proteção ambiental americana EPA (*Environmental Protection Agency*) encomendou um estudo que é reconhecido como o início do que hoje é denominado Análise de Ciclo de Vida^{2,17}.

A utilização de princípios da ACV foi aplicada na elaboração de regulamentações, e em 1976, o congresso americano aprovou uma emenda, a *Resource Conservation and Recovery Act* (RCRA), a lei original *Solid Waste Disposal Act*². A marca de qualidade RCRA foi um conjunto de regulamentações que estabeleceu o sistema de gerenciamento do berço ao túmulo para resíduos perigosos¹⁴.

De 1975 até o início dos anos 80, o interesse por estes estudos diminuiu, segundo Callan e Thomas¹⁴, devido provavelmente a um final aparente na crise do petróleo, e voltou-se para questões da gestão de resíduos de risco. Mesmo assim, neste período, as análises a partir do inventário do ciclo de vida continuaram a ser conduzidas, melhorando sua metodologia. Quando o resíduo sólido tornou-se um problema ambiental, principalmente nas grandes cidades e nas regiões onde o espaço começava a rarear, como na Europa, houve um renascimento da ACV entre 1988 e 1991¹⁷.

Em 1985, quando a comunidade europeia estava então finalizando sua formação, foi criada uma legislação específica para embalagens na área de alimentos (*Liquid Food Container Directive*)¹⁹. A preocupação ainda era com a

produção e destino final somente das embalagens. Esta diretiva obrigava as empresas a monitorar o consumo de matérias-primas e de energia e a posterior geração de resíduos sólidos. Atualmente essa legislação, ou a evolução dela, engloba também as embalagens de quaisquer produtos importados por países da Comunidade Européia¹².

No meio da década de 80, utilizando como referência a metodologia já desenvolvida, o Ministério do Meio Ambiente da Suíça contratou um estudo sobre materiais para embalagens. Este estudo despertou a atenção mundial por introduzir um sistema de ponderação, chamado de critério de volume crítico. A criação deste critério foi um marco, pois utilizou padrões de referência relativos a saúde pública para agregar dados sobre o impacto ambiental². Pode-se citar como forma de correlação levantada a emissão de ácido sulfúrico que causa como impacto ambiental a chuva ácida e origina, no ser humano, problemas no sistema respiratório²⁰. Tanto esse critério como a utilização de bancos de dados, foram posteriormente adicionados e utilizados em estudos, até serem definitivamente escritos na forma da norma ISO 14040²¹.

Em 1991, foram desenvolvidos¹³ os primeiros programas para computadores, *Ökobase I e II*, que relacionavam os dados do inventário a impactos.

Chehebe¹³ chama a atenção para o uso indiscriminado da ACV, no que ele descreve como “Guerra das ACVs”, que ocorreu no início da década de 90. Empresas e instituições, na ânsia de se utilizarem desta ferramenta como estratégia de propaganda, realizavam estudos divulgando ao público

apenas os resultados que lhe interessavam. Até 1996, ocorreram notícias de companhias que fabricavam copos de plástico que protestavam contra o uso desleal da ACV na publicidade²².

A utilização tendenciosa desta técnica levou o comitê que produz as normas ISO a protegerem esta norma¹⁴. Foi determinado que qualquer estudo que envolva a ISO 14040 tem, obrigatoriamente, que apresentar no objetivo ou no escopo do projeto, de maneira detalhada, a utilização futura dos resultados¹⁴. Todas as informações pertinentes aos dados, tais como: aqueles que não puderem ser obtidos por qualquer dificuldade, aqueles que não estejam completos ou que forem descartados ao longo do estudo, devem ser descritos no relatório final²³.

Isto permite que esta norma possa ser utilizada com a profundidade de coleta de dados, com a extensão dentro da cadeia produtiva, ou do berço ao túmulo do produto e com o nível de detalhamento que fosse desejado, mas estas escolhas devem ser relatadas de maneira que não haja ambigüidade na eventualidade de uma comparação futura.

Uma abordagem¹² da ACV no que se refere à possibilidade de escolher a extensão da coleta de dados e da profundidade de análise pode ser observada na Figura 1. O primeiro eixo é do ciclo de vida, que é essencialmente temporal, e representa os estágios da vida do produto. O segundo eixo é o da categoria do inventário, que representa a dimensão física, e descreve os dados de entrada e saída. Estes dois eixos possibilitam formar a base quantitativa da ACV e descrevem o contorno do inventário. O terceiro eixo é o da análise, que representa uma dimensão qualitativa.

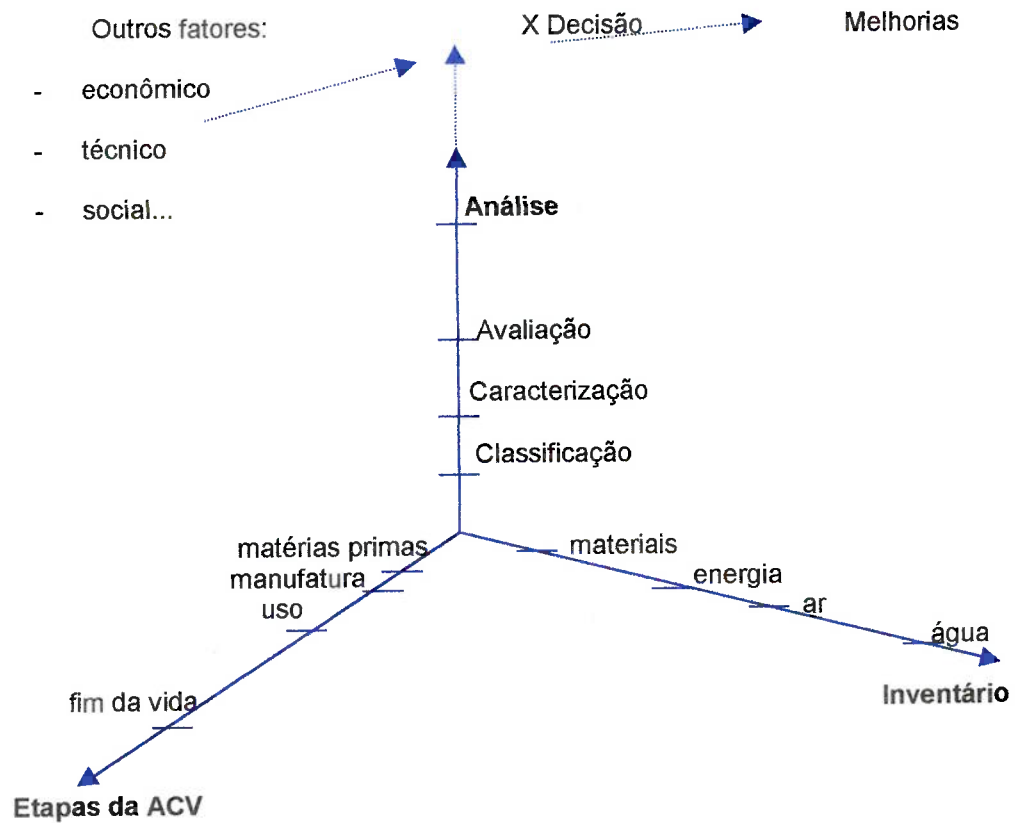


Figura 1 - As dimensões de um estudo completo de ACV¹².

A ACV como ciência tornou-se mais sofisticada no resultado, mas os conceitos adotados são os mesmos daqueles desenvolvidos 25 anos atrás²⁴.

2.2 Definições de ACV

Várias definições para ACV foram feitas²⁵ e estão disponíveis na literatura (Villas Boas²⁶, Medina²⁷, Ugaya²⁸, Newell¹⁸, Chehebe¹³, Reis²⁹, Soares³⁰, 3M^{31,32}) cada uma visando mais especificamente uma área do

conhecimento, de acordo com o campo de atuação do autor, as mais abrangentes são:

- ✓ a Sociedade Ambiental (Americana) de Toxicologia e Química (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry* - SETAC): define a ACV como uma visão holística das conseqüências ambientais associadas a extração, ao processamento da matéria-prima, a manufatura, ao transporte e a distribuição; ao uso e reuso; a manutenção; a reciclagem e ao gerenciamento de resíduos, e definir todas essas etapas como do berço ao túmulo²³. Também analisa os fatores que influem na sua produção e o efeito de seu uso²⁴.
- ✓ a EPA² :envolve o controle da descarga no meio ambiente e os impactos de um produto específico pelo processamento de uma matéria-prima, passando por sua produção até o descarte final. Outros dados para a ACV incluem o balanço de massa e o de energia, e a análise do perfil dos recursos utilizados e do meio ambiente.
- ✓ o *European Committee for Standardisation*: relatado por Lee e Allen³³, a análise de ciclo de vida é um método para quantificar a responsabilidade ambiental com base no inventário de um produto, processo ou atividade, considerados desde a extração da matéria-prima até a disposição final.

A necessidade de se utilizar a mesma terminologia, para melhorar a compreensão entre os trabalhos fez com que Curran¹² realizasse um

levantamento dos termos que aparecem na língua inglesa e que podem ser utilizados como sinônimos de (ACV) *life-cycle assessment* são eles: *Product life-cycle assessment*, *Life-cycle analysis*, *Ecobalance*, *Resource and environmental profile analysis (REPE)* – se referindo ao inventário: *Product line analysis (Produktlinienanalyse)* e *Integrated chain management*.

Keoleian³⁴ também relacionou alguns termos que são normalmente utilizados, mas que podem apresentar sentidos diversos se não estiverem inseridos no contexto da análise do ciclo de vida, são eles: *Life-Cycle Costing*, *Life-Cycle Design*, *Design for Environmental*. *Life-Cycle Costing* são todos os custos associados com o produto ao longo da vida, desde a extração das matérias-primas até a disposição final, o cálculo desse valor é limitado apenas pela disposição em se marcar um limite de obtenção prática dos dados.

Segundo White e colaboradores³⁵, *Life-Cycle Costing* é uma ferramenta para tomada de decisões, porém alguns custos ambientais podem ser difíceis de serem avaliados, como passivos ambientais futuros, e/ou fixados como as externalidades. *Life-Cycle Design* é uma proposta de se orientar os projetos de produtos de maneira mais ambientalmente e economicamente sustentável. Isto é, fazer a interligação entre o ciclo de desenvolvimento de um produto, comumente utilizado na área econômica, com o ciclo de vida físico de um produto. O *projeto para o ciclo de vida* relaciona as necessidades ambientais nos estágios iniciais do projeto de maneira a reduzir o total de impactos produzidos pelo produto. No *projeto para o ciclo de vida* são ponderados e analisados o desempenho, o custo, o

meio ambiente, a cultura e a legislação³⁶. *Design for Environmental (DFE)* é um termo largamente utilizado quando se deseja incorporar e reduzir as emissões ao meio ambiente ao projeto do produto. Segundo Keoleian³⁷, esta expressão pode ser definida como a prática na qual as considerações ambientais são integradas aos projetos de engenharia dos produtos e dos processos.

2.3 As Normas ISO 140XX

Após a aceitação das normas ISO 9000 referentes à qualidade, a *International Standards Organization* com sede em Genebra, considerou preemente a necessidade da criação de normas de gerenciamento ambiental³⁸.

Como conseqüência deste fato, em 1991, foi criado o *Strategic Advisory Group on the Environment (SAGE)* com a função de promover uma aproximação dos objetivos comuns das empresas para o gerenciamento ambiental similar aos conceitos utilizados pela norma ISO 9000. A norma visava criar padrões e critérios de maneira a medir o desempenho ambiental e facilitar o comércio internacional³⁹.

Em 1993, foi organizado o Comitê Técnico de Normas Ambientais – TC 207, que era integrado por representantes de mais de 40 países³⁸. Este comitê elaborou um projeto (ISO14000) que se baseou na norma BS7750 (*British Standards*), em vigor no Reino Unido, segundo a qual os

procedimentos que conduzem à qualidade de qualquer produto e seus respectivos processos não devem ser danosos ao meio ambiente³⁹.

A BS7750 é uma norma para sistemas de gerenciamento ambiental, utilizada para avaliar o desempenho ambiental e definir a política, as práticas, os objetivos e as metas além de preparar e fornecer subsídios para melhorias contínuas³⁹. A BS7750 foi desenvolvida devido ao interesse de analisar riscos e danos ambientais, tanto potenciais como reais.

O conjunto de normas denominado ISO 14000 aborda uma nova visão do meio ambiente, na medida em que orienta as empresas a desenvolverem processos e produtos que gerem menos danos ao mesmo⁴⁰. A existência dessas normas possibilitou ainda às corporações a centralização de esforços na área ambiental, com critérios unificados.

Até o presente momento, muitos países, grupos empresariais e, conseqüentemente suas filiais, apresentam seus próprias diretrizes, preocupações e necessidades, no que diz respeito aos cuidados com o meio ambiente, a presença de uma norma ajuda a unificar, melhorar e comparar essas condutas⁴¹.

As normas da série 14000 abrangem vários tópicos do gerenciamento ambiental. Na Tabela 1, pode-se observar a lista do que essas normas se propõem a cobrir.

Tabela 1- Abrangência das normas 140XX^{40,42-45}

Norma	Título/Descrição
14000	Guia de Princípios, sistemas e técnicas de assistência ao Gerenciamento Ambiental
14001	Sistemas de Gerenciamento Ambiental – Especificações e guia de uso
14010	Diretrizes para auditoria ambiental – princípios gerais de auditoria ambiental
14011	Diretrizes para auditoria ambiental – procedimentos para auditoria – parte 1: Auditoria de Sistemas de Gerenciamento Ambiental
14012	Diretrizes para auditoria ambiental – Critérios de Qualificação para auditores ambientais
14013/15	Diretrizes para auditoria ambiental – Programas de auditoria, revisões e análises
14020/23	Rotulagem ambiental
14024	Rotulagem ambiental – princípios diretivos, procedimentos práticos e certificação de programas de multicritério
14031/32	Diretrizes para avaliação da performance ambiental
14040/43	Princípios e práticas da ACV
14050	Glossário
14060	Guia para a inclusão de aspectos ambientais em produtos

2.3.1 Sistemas de Gestão Ambiental e a ACV

Um Sistema de Gestão Ambiental necessita de uma política clara da empresa em relação ao meio ambiente assim, para que seja implantado com sucesso em uma empresa é necessário o apoio da direção⁴⁶.

Na Europa, há o sistema de gerenciamento desenvolvido e utilizado pela Comunidade Européia, o EMAS (*Eco-Management and Audit Scheme*)⁴¹. Provavelmente, como as empresas necessitam de uma norma de validade e de conhecimento internacional para alavancar o comércio entre os países, esse gerenciamento deverá ser feito pela norma ISO⁴¹.

O uso das normas ISO 14000, BS7750 e EMAS, pelas empresas é voluntário^{39,40,41}, e estas apresentam semelhanças entre si conforme pode ser

visto na Tabela 2. A Tabela 2 mostra de maneira resumida, os objetivos principais das normas 14000 e o equivalente na BS7750 e na EMAS.

A importância do Sistema de Gestão Ambiental (SGA) levou a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a desenvolver a norma 14004 de maneira a fornecer assistência a organizações que desejam implementar ou aprimorar um SGA⁴³.

Os princípios essenciais desta norma, são⁴³:

- ✓ Reconhecer a necessidade de um Sistema de Gestão Ambiental e que esta forma de gestão se encontra entre as mais altas prioridades da organização.
- ✓ Criar e manter um canal de comunicação com as partes envolvidas no processo, que engloba tanto o pessoal interno quanto externo à empresa.
- ✓ Cria a possibilidade de satisfazer aos critérios dos investidores e facilitar, dessa forma, o acesso da empresa ao capital.
- ✓ Por apresentar controle sobre as emissões possibilita obter seguro a um menor custo, bem como, facilitar a obtenção de licenças e autorizações.
- ✓ Associado à propaganda, pode fortalecer a imagem e assim consolidar a participação no mercado.
- ✓ Facilita o aprimoramento do controle dos custos e a redução os acidentes que impliquem em responsabilidade civil.
- ✓ Possibilita conservar as matérias-primas e a energia.

Tabela 2 - Analogias entre as normas de gerenciamento ambiental^{41,47}.

Objeto da norma	ISO 14000	EMAS	BS7750
Sistema de Gerenciamento Ambiental	4.0	Anexo I, parte B	4.1
Revisão introdutória ambiental	Anexo A.4.2.1 guia	Artigo 3 parágrafo b, Anexo I, parte C	Anexo A.1.2 guia
Política Ambiental	4.1.	Anexo I, parte A e D	4.2
Organização e Pessoal	4.3.1, 4.3.2	Anexo I, parte B2 e D11	4.3
Aspectos e efeitos ambientais	4.2.1, 4.2.2	Anexo I, parte B3 e D2/3	4.4
Objetivos e Metas	4.2.3	Anexo I, parte A4	4.5
Programa de Gerenciamento Ambiental	4.2.4	Anexo I, parte A5	4.6
Manual e documentação	4.3.4, 4.3.5	Anexo I, parte B5	4.7
Controles Operacionais	4.3.6, 4.3.7, 4.4.1 e 4.4.2	Anexo I, parte B4 e D6/7	4.8
Registro	4.4.3	Anexo I, parte B5	4.9
Auditoria	4.4.4	Anexo I, parte B6 e anexo II	4.10
Revisão do gerenciamento	4.5	Anexo I, parte B1	4.11
Declaração Ambiental	Não há	Artigo 5 e anexo V	Não há

O sistema de gestão ambiental também leva ao desenvolvimento do comprometimento da administração e dos empregados no sentido da proteção ao meio ambiente, com uma clara definição de responsabilidades e responsáveis, de maneira a estimular o planejamento ambiental ao longo do ciclo de vida do produto ou do processo⁴⁰.

É no contexto de um sistema de gestão ambiental que está inserida a ACV.

2.4 ACV

A análise do balanço de massa e de energia é de grande importância na proteção ambiental, pois possibilita prever os impactos associados a produtos manufaturados e consumidos e ainda promove o desenvolvimento de métodos para compreender e reduzir estes impactos. Um desses desenvolvimentos propostos é a ACV. A ACV é regulamentada pela ISO 1404X⁴³, que descreve os princípios e as condições de contorno para a condução e posterior relato dos estudos envolvendo a ACV.

Uma das maiores limitações da ACV está na dificuldade de se encontrar trabalhos com os mesmos objetivos e com as mesmas condições iniciais, mesmo desprezando outros fatores como a matriz energética e o sistema de transporte local, por isso, considerável esforço se faz necessário para aumentar o banco de dados e dessa forma permitir a comparação com os estudos já realizados^{48,49}.

As propostas presentes^{31,50,51} na literatura para a utilização mundial da ACV baseiam-se na construção da capacidade intelectual por intermédio de cursos de certificações em larga escala de maneira semelhante aos desenvolvidos para a norma ISO 9000.

Segundo a norma ISO 14040⁴³, a ACV assim como as técnicas de análise de risco, as de auditoria ambiental e da análise de impacto ambiental não são indicadas para todas as situações, como exemplo das exceções citam-se os casos de ordem econômica ou social.

A norma ISO 14040⁴³ descreve os princípios e algumas técnicas metodológicas para a condução dos estudos da ACV. Métodos complementares estão disponíveis nas normas ISO 14041, 14042 e 14043.

2.4.1 As Fases da Análise do Ciclo de Vida

A norma ISO 14040 estabelece que a ACV de produtos deva ser dividida nas seguintes etapas²³:

- a) Objetivos e escopo do trabalho.
- b) Análise do inventário.
- c) Avaliação do impacto.
- d) Interpretação dos resultados/ aperfeiçoamento da análise.

Na Figura 2, pode-se observar uma representação esquemática da relação entre as fases da ACV. A partir da definição dos objetivos de uma ACV estarão fixados quais os dados a serem coletados, os impactos ambientais gerados pelo processo e as formas de melhoria esperadas. Porém, durante o inventário alguns dados podem não ser obtidos, outros impactos podem aparecer como relevantes e outros caminhos para a melhoria podem ser propostos, as setas de duplo sentido na Figura 2, entre cada uma das fases com a fase inicial (objetivo), indicam que há a possibilidade da troca dos objetivos.



Figura 2 - Modelo Conceitual da ACV¹⁸.

2.4.1.1 Objetivo e Escopo

O escopo refere-se à aplicabilidade geográfica, técnica e histórica do estudo, de onde os dados serão coletados, como atualizar o estudo, como a informação será manipulada e onde os resultados serão aplicados¹³.

A definição do objetivo deve incluir os propósitos pretendidos e conter todos os aspectos considerados relevantes para direcionar as ações futuras¹³.

Nesta fase são especificadas as condições de contorno gerais, princípios requeridos para a condução da tarefa e quais as formas estabelecidas para relatar os estudos²¹.

Por exemplo, uma ACV realizada por um grupo de trabalho dentro de uma empresa visando auxiliar na escolha de uma matéria-prima difere em escopo e objetivo de uma ACV realizada para fornecer informações ambientais, como emissões e formas de tratamento de resíduos, para fora da empresa, mas podem ser coletados os mesmos dados para as duas situações¹³.

Esta etapa define como os resultados serão utilizados, para qual tipo de auditoria se destinam e prepara uma revisão crítica relativa às emissões produzidas¹⁶. Estas definições e escolhas apresentam um caráter não definitivo, pois a ACV é interativa. Pode-se abandonar um tópico, durante o processo de coleta, se os dados mostrarem-se difíceis de serem obtidos, ou de serem comprovados ou apresentarem erro experimental acima do estipulado inicialmente ou ainda quando se verificar que estes dados não são tão importantes para a conclusão final do trabalho.

É nesta fase do estudo que deve haver o planejamento da conduta da publicação dos resultados¹⁶. Esta etapa do trabalho é particularmente importante quando envolve os valores relativos ao processo de fabricação.

Segundo Chehebe¹³, na definição do objetivo e do escopo devem ser considerados também:

- ✓ Se o produto mudou muito durante os últimos anos.
- ✓ Se o método de produção mudou substancialmente.
- ✓ Se o método de produção varia de país para país.
- ✓ Quais os limites do sistema escolhido.
- ✓ Quais as unidades do processo.

- ✓ Quais as hipóteses e as limitações.
- ✓ Se será realizada Avaliação do Impacto.

O eventual risco de se transmitir dados sigilosos para outras empresas durante a divulgação do processo da análise do ciclo de vida é, provavelmente, o maior problema que as empresas enfrentam⁴⁸. Esses dados podem ser tanto relativos ao consumo de matérias-primas e de energia como ao volume de resíduos gerados, já que os processos são relativamente conhecidos.

Um exemplo dos cuidados que devem ser levados em conta durante o processo pode ser visto na ACV de embalagens, conduzido pelo Centro de Tecnologia de Embalagem – CETEA do ITAL em conjunto com associações e empresas (ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, ABEPET - Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens PET, ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro, ABNPO - Associação Brasileira de Papelão Ondulado, CSN – Companhia Siderúrgica Nacional e Tetra Pak Ltda) e com o apoio da FAPESP⁵².

Para garantir o sigilo das informações obtidas no inventário das empresas, criou-se a seguinte sistemática⁵²:

- ✓ O questionário foi impresso em papel com marca d'água do CETEA.
- ✓ As empresas foram identificadas apenas por um código.
- ✓ Cada questionário foi identificado individualmente.
- ✓ Ficou proibida qualquer reprodução do questionário.

- ✓ Após o preenchimento, o responsável pelos dados deveria rubricar todas as páginas e assinar e datar a última folhado questionário.
- ✓ A diretoria de cada empresa avaliou o questionário, rubricou todas as páginas, assinou e datou na última folha. Coube à diretoria da empresa encaminhar o questionário, de maneira a garantir a segurança e o sigilo dos dados.
- ✓ O CETEA assumiu a responsabilidade sobre o questionário a partir de seu recebimento, quando o documento foi rubricado e assinado pelo técnico responsável.
- ✓ Pelo contrato entre as partes, houve sigilo absoluto por cinco anos, dos dados individuais fornecidos pelas empresas; e
- ✓ O acesso aos dados foi vetado a quaisquer das partes.

Para auxiliar na tomada de decisões a partir do relatório final da ACV, Azapagic e Clift⁴⁸ propuseram o uso do processo otimizado multiobjetivo. Neste caso, orienta-se o estudo simultaneamente em função do número de objetivos estipulados. Entretanto, os projetos que se utilizam deste procedimento não devem ser baseados unicamente no impacto ambiental; outros fatores, como o sócio-econômico, devem ser levados em consideração.

2.4.1.2 Inventário

O Inventário de uma ACV, ou simplesmente Inventário, é a contabilidade do processo ou o balanço de massa e de energia que se faz das partes, ou das células ou das unidades funcionais do sistema produtivo.

Defini-se unidade funcional de uma ACV como o menor sistema do processo para a coleta de dados. A unidade funcional pode ser uma máquina, um processo produtivo ou uma usina. Se a unidade funcional for uma máquina, por exemplo, o inventário irá coletar os dados de insumos como o consumo de gás natural e quais as suas emissões. Se a unidade funcional for, por exemplo, o processo de forjamento o inventário irá coletar os dados referentes a todo o consumo de energia elétrica consumida, de todas as máquinas.

As principais fontes de para a coleta de informações para o inventário são ¹³.

- ✓ Normas técnicas.
- ✓ Estatísticas ambientais.
- ✓ Licenças ambientais.
- ✓ Literatura técnica.
- ✓ Informação técnica nas empresas.
- ✓ Associações de classe.
- ✓ Fornecedores reais ou potenciais.
- ✓ Banco de dados.

A condução de um Inventário deve levar em conta os aspectos como a facilidade de análise posterior dos dados, bem como a eficiência da coleta e a confiabilidade^{23,53}. Por esta razão, faz-se necessário que os dados sejam coletados de maneira padronizada com relação às unidades de medida e com os critérios de classificação. Esses dados devem permitir a possibilidade de

correlação entre os dados coletados e com os valores descritos na literatura²⁰.

Três modelos de formulários, o proposto pela norma ISO⁴⁴, o desenvolvido por Zoe *apud* Lupis⁵⁴ e o utilizado no relatório do *International Iron and Steel Institute* (IISI)⁴⁸ estão disponíveis na literatura para a apresentação dos dados do inventário.

O formulário proposto pela IISI, tem como marca a proteção aos valores apresentados. Os dados são normalizados em função da massa produzida e com valores médios mundiais, por exemplo gera-se 0,0058 kg de pó no forno elétrico a arco (FEA) por quilograma de aço⁴⁸.

O utilizado por Lupis⁵⁴, é composto por 4 matrizes. Uma matriz para as matérias-primas, uma para os insumos, uma para as emissões e resíduos gerados e a última se refere aos custos de cada matéria-prima e da mão de obra utilizada.

O modelo apresentado pela ISO⁴⁸ apresenta como característica a clareza na exposição dos valores. Na Tabela 3 pode-se observar este modelo¹².

Na Tabela 3, nos itens (a), (b) e (c), são dispostos os valores de entrada, como a massa da matéria-prima, os insumos e o tipo da energia utilizada. A massa pode ser descrita por quilogramas ou toneladas. Esta medida também pode ser dada em unidades de volume, para os casos de gases e combustíveis líquidos. A este conjunto de valores pode ser associada a temperatura se o objetivo do estudo for analisar a energia durante o processo.

O item (d) representa a possibilidade de haver mudança no local de produção de matéria-prima, produto ou pode se referir a entrega do produto.

O item (e) se refere a recuperação por reutilização ou reciclagem do produto ou aproveitamento de resíduos ou da energia durante o processo produtivo.

Na Tabela 3, os itens (f) , (g) e (h) são destinados aos valores das emissões e dos resíduos gerados. Também associado aos valores de saída, pode ser descrito o grau de toxicidade, e o quanto isso afeta a saúde e se este material é encaminhado para aterro, se é reciclado, ou se retorna ao processo produtivo como uma nova matéria-prima^{23,28}.

Tabela 3 - Formulários para coleta de dados do inventário, modificado a partir de Curran¹².

a) Matéria Prima			
Material	Peso (t)	Quantidade	Comentários (data, obtenção por dados por relatório ou medido)
Aço			
Alumínio			
Outros			
b) Outras entradas			
Material	Quantidade e	Unidade	Comentários (data, obtenção por dados por relatório ou medido, ou rateado)
Água industrial		ℓ	
Ar comprimido		m ³	
Outros			
c) Energia			
Material	Quantia	Unidade	Comentários (data, obtenção por dados por relatório, medido, ou rateado)
Eletricidade		kWh	
Gás natural		m ³	
GLP		m ³	
Diesel		NL	
Madeira		kg	
Outros			

Tabela 3 - Formulários para coleta de dados do inventário, modificado a partir de Curran¹² (continuação).

d) Transporte

Tipo de Transporte	Distância	Unidade	Comentários(consumo médio)
Caminhão trucado		km	
Trem		km	
Navio		km	

e) Coprodutos, material reciclado

Material	Peso	Unidade	Comentários
Calor recuperado		cal	
Sucata		t	
Outros			

f) Resíduos sólidos

Material	Peso	Unidade	Comentários
Carepa		t	
Material de embalagem		t	
Luvas		t	
Outros			

g) emissões atmosféricas

Material	Peso	Unidade
Particulado		kg
Sox		kg
NOx		kg
CO		kg
CO ₂ (fóssil)		kg
CO ₂ (não fóssil)		kg
Benzeno		kg
Outros		

h) Efluentes líquidos

Material	Peso	Unidade
Sólidos dissolvidos		kg
Sólidos em suspensão		kg
Fenol		kg
Óleo ou graxa		kg
Ácido sulfúrico		kg
Outros		

Pode-se citar como exemplo, o processo de conformação mecânica como o forjamento do aço. As unidades funcionais seriam o forno de aquecimento e a prensa para a conformação mecânica. Para cada unidade funcional escolhida, constroi-se uma Tabela 3 para o armazenamento dos

dados. A Figura 3 mostra uma representação esquemática de uma unidade funcional com os valores de entrada e de saída.

No exemplo citado, os valores de entrada seriam a massa do lingote, a energia elétrica, o combustível para o aquecimento dos fornos e água industrial. Os dados de saída seriam a geração de CO₂ devido a combustão no forno, a massa de carepa gerada, a perda de óleo na prensa por etapa, a geração de material particulado e o ruído produzido pela operação.

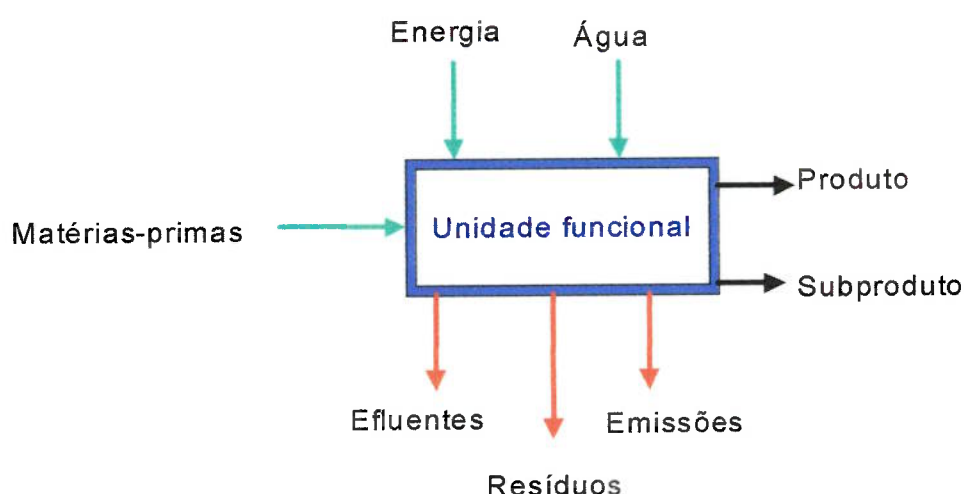


Figura 3 – Representação do inventário em uma unidade funcional.

O processo de ACV de um produto é considerado contínuo, progressivo e integrado e o plano de gerenciamento deve apresentar uma revisão bibliográfica dos dados ou uma atualização periódica⁴³. Associado a isso estes dados devem apresentar uma identificação do método de armazenamento/apresentação do inventário utilizado⁴⁰.

Complementarmente ao levantamento do Inventário, devem ser analisados os dados oriundos dos projetos desenvolvidos em outras partes do mundo, de maneira a confirmar a consistência, dar credibilidade e validade ao mesmo⁴³.

Todavia, a busca de dados não é uma tarefa fácil, na medida em que estes cuidam, muitas vezes, de segredos industriais dos quais seus possuidores não autorizam o acesso ou a divulgação⁴⁸. Além disso, os dados variam muito de empresa para empresa, dependendo do tipo de matéria-prima, dos custos e da disponibilidade energética local, e também das etapas de processamento⁴⁸. Para que essa tarefa, de se levantar dados, possa ser conduzida a cabo, existem projetos de bancos de dados em países como a Suíça, a Itália, o Japão, a Austrália e os Estados Unidos¹³.

Segundo Burgess e Brennan⁵⁵, há uma evolução dos métodos de coleta e de armazenamento dos dados do Inventário, com a utilização de programas de computador e farta informação na internet, em detrimento da qualidade dos dados. Caso exista maior esforço na busca pelos dados do que pela sua qualidade, certamente o processo da ACV acabará distorcido e pouco funcional⁵⁵.

Como todos os inventários apresentam variações, incertezas e lacunas, é imprescindível que esses eventos sejam sempre relatados⁵⁶ em alguma parte do relatório final, seja no escopo ou na análise. Curran¹² ressalta que, em muitos trabalhos, é impossível descobrir a origem dos dados e ainda há casos em que as análises provêm de inventários baseados em informações confidenciais onde não existem formas de confrontar e validar os

resultados. A SETAC²¹ sugere que a ACV deva ser tratada como todo trabalho científico, e apresentar como os dados foram obtidos, incluindo o método de aquisição e como estes podem ser reproduzidos.

A deficiência na quantidade de dados publicados parece ser uma das razões da ACV ser um procedimento demorado⁵⁷. O desenvolvimento de banco de dados aparece como solução para este problema, além de serem particularmente úteis na formação de uma documentação global sobre as emissões^{55,57}.

Além do relatório final, o Inventário é, também, umas das etapas da ACV para a tomada de decisões. Em uma pesquisa conduzida pelo UNEP⁵⁰, mostrou-se que 9% dos entrevistados que utilizam a ACV, sempre ou usualmente fazem a tomada de decisões baseado unicamente nos dados do Inventário.

2.4.1.3 Análise do Impacto

O Inventário de uma ACV apresenta dados relativos à retirada de materiais de fontes naturais e de envio de substâncias para o meio ambiente.

Estes dados são de difícil interpretação, na medida em que 1 kg de uma substância emitida para a atmosfera, ou na forma de efluente líquido, afeta de determinada e de maneira específica a saúde pública e o meio ambiente, não havendo grau ou referência para comparações⁵⁸.

A análise do impacto converte os resultados do Inventário para um grupo selecionado de impactos tais como efeito estufa, mortalidade, a

destruição da camada de ozônio. E dessa forma, permite a interpretação dos efeitos no meio ambiente do sistema avaliado a partir de um grupo restrito de impactos²⁹.

Como não há estudos suficientes para a comprovação da relação entre os impactos, nenhuma das metodologias desenvolvidas que correlaciona os impactos em subgrupos (ou em um único impacto) é aceita até hoje sem reservas^{12,56}.

A análise do impacto é geralmente dividida em^{12,13,14}:

- ✓ *Seleção e definição de categorias* - onde são identificadas as preocupações ambientais relativas ao processo ou produto que será estudado. Nesta etapa, os possíveis impactos que possam ser gerados são eleitos.
- ✓ *Classificação* – onde os dados do inventário são classificados e agrupados nas categorias selecionadas (como aquecimento global, destruição da camada de ozônio, acidificação).
- ✓ *Caracterização* - consiste na atribuição de valores ou pesos relativos a cada impacto e na correlação entre eles. Quando a caracterização estiver completa, há a possibilidade de se comparar diretamente o potencial dos impactos de cada produto ou processo.

Classificação

Esta é a etapa do processo em que os resultados do inventário recebem uma atribuição e são agrupados em categorias de impactos. As categorias são selecionadas a partir das emissões e da geração de resíduos.

As categorias de impacto normalmente selecionadas, quando se trata de um trabalho para empresas privadas são a qualidade do ecossistema e a saúde pública^{53,59}.

Alguns dos impactos são de difícil classificação. Tomando-se o exemplo da emissão de efluentes líquidos têm-se: os sólidos em suspensão, o material sólido dissolvido, a demanda química de oxigênio (DQO), a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e a alcalinidade. Todos estes fatores afetam a qualidade da água que, por sua vez, criam um impacto na qualidade do ecossistema⁶⁰.

Os valores da saída do inventário são classificados como *geradores de tensão ecológica* e considerados a causa real dos impactos. Na Tabela 4 pode ser vista uma coletânea desses geradores de tensão ecológica¹².

Tabela 4 – Lista de geradores de tensão¹².

Geradores de tensão		
Ácido, no ar	Sólidos dissolvidos	NO _x
Ácido, na água	Óxido de etileno	Enxofre
Aldeídos	Fluoretos	Óleo
Amônia	Hidrocarbonetos	Material particulado
Arsênio	Ácido fluorídrico	Pesticidas
DBO	Ferro	Fenol
CO ₂	Querosene	Fosfatos
Alumínio	Herbicidas	Outros orgânicos
CO	Chumbo	Fósforo
DQO	Merúrio	Sulfetos
Íon metal, na água	Ácido sulfúrico	Cloro
Metano	Óxidos de enxofre	Cromo
Níquel	Suspensão sólida	Cianetos
Nitrogênio, na água	Zinco	

Cada um desses *geradores de tensão* pode ser classificado em um grupo relativamente homogêneo de impactos ao ambiente. Os impactos comumente analisados são ^{61,62}:

- ✓ Mudanças climáticas.
- ✓ Destruição da camada de ozônio.
- ✓ Perda de habitat por ações deliberadas.
- ✓ Toxicidade humana.
- ✓ Toxicidade (marinho e terrestre).
- ✓ Acidificação e eutrofização.
- ✓ Extração de minerais.
- ✓ Energia a partir de combustíveis fósseis.
- ✓ Radiação nuclear.
- ✓ Salinização.
- ✓ Erosão.
- ✓ Perda de habitat como resultado de ações indiretas.

- ✓ Ruído.
- ✓ Saúde dos trabalhadores.
- ✓ Segurança dos trabalhadores.
- ✓ Extração da biota.
- ✓ Água, escassez ou não potabilidade.
- ✓ Geração de lixo ou resíduo.
- ✓ Chuva ácida.
- ✓ Efeito estufa, aquecimento global.
- ✓ Alteração da paisagem.
- ✓ Alterações no pH.

Para uma classificação mais detalhada referente à saúde humana, categorias de potenciais impactos foram definidas^{56,62}.

- ✓ Substâncias carcinogênicas.
- ✓ Irritação/corrosão (olhos, pele, trato gastrointestinal).
- ✓ Ação no sistema respiratório.
- ✓ Efeitos no sistema nervoso central.
- ✓ Alergia, sensibilidade.
- ✓ Infecção no sangue e metemoglobina.
- ✓ Odores.
- ✓ Efeitos no sistema cardiovascular.
- ✓ Efeitos no sistema reprodutivo.
- ✓ Distúrbios de comportamento.
- ✓ Distúrbios renais e em ossos.

Na Figura 4, pode-se observar a evolução de um *gerador de tensão* em vários níveis de impacto.

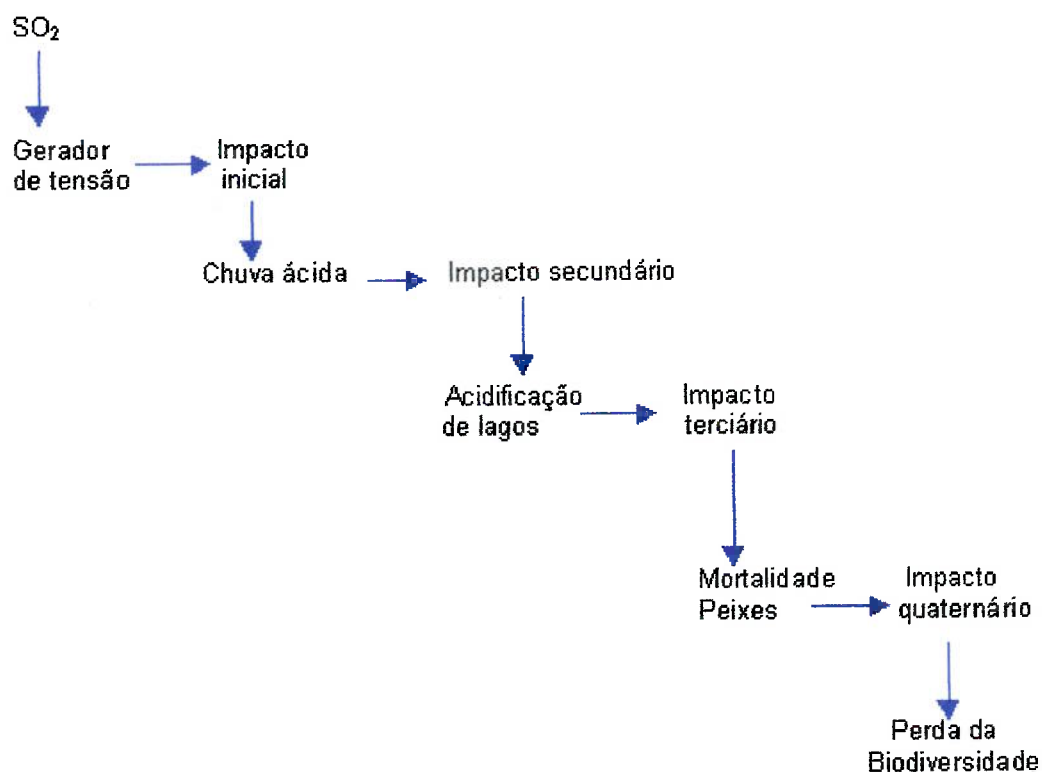


Figura 4 - A evolução de um *gerador de tensão* em vários graus de impacto⁵⁰.

Por outro lado, ainda não há consenso no que tange à correlação direta entre os *geradores de tensão* e o seu efeito real ao meio⁶³. Dessa forma, o uso do *gerador de tensão* é apenas um dos indicadores do impacto potencial ao ambiente⁵⁰.

Há também diferentes problemas sociais que podem ser considerados na análise dos impactos⁵⁰, tais como:

- ✓ Pobreza.
- ✓ Educação.

- ✓ Condições de trabalho.
- ✚ ✓ Balança comercial em desequilíbrio.

Caracterização

Na caracterização, as contribuições para cada problema ambiental são quantificadas^{12,13,59}. Para cada impacto ambiental é escolhido um *gerador de tensão* como referência. Todos os outros *geradores de tensão* produzidos durante o processo são convertidos em termos de quantidade equivalente. Os impactos são associados, segundo Chehebe¹³, em:

- ✓ Potencial de aquecimento global (PAG) – medida em relação ao efeito de 1 kg de CO₂.
- ✓ Formação de oxidantes fotoquímicos (FOF) – medida em relação ao efeito de 1 kg de etileno.
- ✓ Potencial de acidificação (PA) - medida em relação ao efeito de 1 kg de SO₂.
- ✓ Potencial de nutrificação (PN) - medida em relação ao efeito de 1 kg de fosfato.
- ✓ Potencial de redução da camada de ozônio (PRCO) - medida em relação ao efeito de 1 kg de CFC-11.

Para o caso do efeito estufa existe uma correlação entre o gás de referência (CO₂) e os outros gases que promovem o mesmo efeito. A Tabela 5 mostra a correlação para os gases estufa. Como exemplo, o valor para o

metano é 21, o que significa que 1 kg de metano tem o mesmo efeito no aquecimento global do que 21 kg de CO₂.

Tabela 5 – Fatores de conversão entre os diversos gases estufa e o dióxido de carbono⁴⁸.

Gas	Potencial de aquecimento global
CO ₂	1
CH ₄	21
N ₂ O	310
CFC-11	3400
CFC-12	7100
HCFC-22	1600
NOx ¹²	254

Como exemplo da Análise dos Impactos, se uma empresa consome energia elétrica de uma fonte não renovável e apresenta as emissões de CO₂ e N₂O, esta empresa gerará os impactos de efeito estufa e de consumo de energia de fonte não renovável. O cálculo do impacto total gerado por essa empresa será feito utilizando-se do modelo de Análise de Impactos mostrado por Curran¹², que é o Índice Ambiental. Por esse método, os dois impactos, do exemplo proposto, serão analisados:

O Índice Ambiental é a soma dos valores dos impactos gerados em uma ACV.

Para se obter o Índice Ambiental faz-se a normalização dos valores do inventário a partir das médias mundiais e seleciona-se um critério que apresenta uma quantificação para cada impacto. Cada impacto produzido terá um valor e a soma dos valores dos impactos será o Índice Ambiental.

Supondo que no exemplo a emissão de CO₂ seja de 701 kg e a emissão de N₂O seja 2,09 kg e que se consuma 1160 MJ de energia não renovável. A Tabela 6 é construída a partir desses valores do inventário.

Tabela 6 – Correlação entre os dados do inventário e impactos ambientais.

	Energia	CO₂	N₂O
Impacto	1160	701	2,09
Consumo de energia não renovável	1	-	
Potencial de aquecimento global	-	1	310
Potencial de acidificação	-	-	
Toxicidade Humana	-	-	
Potencial para destruição da camada de ozônio	-	-	
Ecotoxicidade Terrestre	-	-	
Ecotoxicidade aquática	-	-	
Resultados			
Consumo de energia não renovável(GJ)			1,16
Potencial de aquecimento global		701	648 1349
Potencial de acidificação			
Toxicidade Humana			
Potencial para destruição da camada de ozônio			
Ecotoxicidade Terrestre			
Ecotoxicidade aquática			

Os valores obtidos para cada impacto ambiental são divididos pelo valor da emissão anual global correspondente. A Tabela 7 apresenta os valores da fração relativa para alguns impactos.

Tabela 7 – Valores médios globais para alguns impactos ambientais, segundo Curran¹².

Impacto ambiental	Unidade	Média mundial
Consumo de energia não renovável	GJ.ano.10 ⁹	235
Aquecimento global	Kg.ano.10 ¹²	37,7
Acidificação	Kg.ano.10 ⁹	286
Toxicidade humana	Kg.ano.10 ⁹	576
Toxicidade aquática	M ³ .ano.10 ¹²	908

A fração de cada impacto em relação ao total mundial (fração relativa FR) é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Fração relativa (FR) dos impactos dos valores do inventário.

Impacto ambiental	Valor Inventário	Unidade	Valor normalizado (ano.10⁻¹²)
Consumo de energia não renovável	1,160	GJ	4,94
Aquecimento global	1349	Kg	35,78
Acidificação		Kg	-
Toxicidade humana		Kg	-
Toxicidade aquática		m ³	-

A atribuição dos valores aos impactos apresenta um caráter subjetivo¹². De maneira a avaliar a sensibilidade do método, dois modelos com índices de méritos diferentes são apresentados na Tabela 9. Cada modelo atribui importância diferente a um mesmo impacto.

Tabela 9 – Dois modelos de atribuição de valores para impactos ambientais(modificado a partir de Curran¹²).

Impacto ambiental	Modelo 1	Modelo 2
Energia não renovável	1/7	0,361
Pot. Aquecimento global	1/7	0,240
Acidificação	1/7	0,039
Toxicidade humana	2/7	0,152
Tox. Aquática	1/7	0,106
Eutrofização	1/7	0,102

A soma dos valores atribuídos a todos os impactos vale 1. Nota-se que o modelo 1 apresenta todos os impactos com a mesma importância relativa (1/7) e o modelo 2 define o gasto de energia não renovável como o dano ambiental de maior importância.

O cálculo do Índice Ambiental será diferente para cada modelo conforme pode ser acompanhado pela Tabela 10.

Tabela 10 – Dois modelos de atribuição de valores para o cálculo do Índice Ambiental.

	Mod1x(invent.)=Res1	Mod2x(invent.)=Res2
Energia não renovável	0,71	1,78
Efeito estufa	5,11	8,59
Acidificação	-	-
Toxicidade humana	-	-
Toxicidade aquática	-	-
Eutrofização	-	-
Índice Ambiental (10 ⁻¹² ano)	6,82	10,37

Conforme pode ser observado na Tabela 10 a escolha dos modelos para os impactos modifica o impacto total associado ao processo estudado (Índice Ambiental). O modelo 1 apresenta o Índice Ambiental $6,82 \cdot 10^{-12}$ menor portanto, do que o modelo 2, que apresenta o valor de $10,37 \cdot 10^{-12}$.

Como ambos os valores se referem a um mesmo exemplo, qualquer descrição dos impactos que se utilizar dessa metodologia deve informar quais modelos foram adotados para o cálculo desse Índice.

2.4.1.4 Aperfeiçoamento da Análise

Após escolhidos os objetivos do trabalho, os dados serem coletados e todos os impactos gerados pelo processo estudado terem sido convertidos para um pequeno grupo de impactos ou para apenas um, a última etapa da ACV é o aperfeiçoamento da análise⁶⁴/análise dos resultados.

O objetivo desta fase é analisar os resultados, explicar as limitações, caracterizar se o impacto escolhido como central do processo procede, fornecer recomendações para um novo estudo de ACV completa ou parcial⁵⁰.

Nesta fase pode-se perceber que a técnica utilizada, a ACV, não seja ampla o suficiente para uma conclusão definitiva e, desta forma, sugerir outras técnicas de avaliação ambiental, como a Avaliação de riscos⁶⁴.

Segundo Chehebe¹³, esta fase da ACV compreende três etapas:

- ✓ Identificação das questões ambientais mais significativas baseadas nos resultados da análise do inventário e/ou da ACV.
- ✓ Avaliação que pode incluir elementos tais como a checagem da integridade, da sensibilidade e da consistência.
- ✓ Conclusões, recomendações e relatórios sobre as questões ambientais significativas.
- ✓ O relatório final deve ser elaborado de forma a possibilitar a utilização dos resultados e sua interpretação de acordo com os objetivos do estudo, e deve obedecer os critérios das normas ISO 14040 e 14041²⁹.

A ACV não deve ser recomendada como instrumento para a escolha da melhor tecnologia ou processo, porém em muitos casos, poderá indicar caminhos ou soluções alternativas⁴⁴.

A ACV é uma proposta para prover informações sobre as emissões e os impactos ao ambiente, para um determinado sistema. Entretanto, é importante que relatório final seja interpretado à luz das considerações

sociais, econômicas e políticas para que sejam elaboradas decisões mais harmoniosas⁶⁰.

Para que a ACV possa ser utilizada como uma ferramenta em decisões ligadas ao meio ambiente e tenha seu uso perene faz-se necessário que se encontre uma relação forte entre a análise do impacto ambiental e os custos associados as mudanças que se fizerem necessárias⁶⁴.

A realização da ACV num processo produtivo, e a elaboração do relatório, antes do início do funcionamento da empresa auxilia na mudança de rotas e na escolha de outros equipamentos de maneira a diminuir as emissões e assim evitar futuras ações de mitigação⁵⁶. A importância do estudo anterior ao funcionamento está no fato de que há controvérsia a respeito da capacidade da mitigação de áreas degradadas afetar o crescimento econômico posterior.

Baker e colaboradores⁶¹ e Solow⁶⁵ argumentam que o fenômeno microeconômico de substituição, ou seja, que o capital ou o trabalho pode compensar e substituir os bens da natureza e as matérias-primas extraídas, e que isto pode ser extrapolado para o aspecto macroeconômico.

Kaufmann⁶⁶ contesta esta linha de pensamento, pois se esta substituição for possível, isto implica que a degradação do meio ambiente possui baixo ou nenhum efeito no crescimento econômico afirmando que existe uma interdependência física entre os fatores de produção. Se essa substituição não é possível ao nível macroeconômico, a degradação ambiental é então crucial para o desenvolvimento da economia a longo prazo⁶⁶.

Segundo Kaufmann⁶⁷, os economistas neoclássicos, apontam como único fator para o crescimento econômico os saltos tecnológicos, colocando a preservação do meio como um termo secundário. Este autor argumenta que os economistas ligados ao movimento de preservação do meio ambiente têm procurado relacionar como o desenvolvimento que não seja sustentado afeta o capital e o trabalho.

Segundo Curran¹², desenvolvimento sustentado é encontro das necessidades do presente sem comprometer a habilidade de gerações futuras de encontrar suas próprias necessidades.

2.5 Gases de efeito estufa

Em trabalhos de ACV que envolvam o consumo de energia fóssil ou o processo de combustão, o efeito estufa deve ser um dos impactos a serem analisados¹².

O uso de energia é a maior fonte dos impactos ambientais⁶⁸, e muitas emissões atmosféricas estão diretamente ligadas ao uso do combustível fóssil. A combustão gera, comumente, dióxido de carbono, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio o que, pode influenciar nas mudanças climáticas.

Ressalta-se a importância do efeito estufa para o desenvolvimento da vida na Terra como é conhecida hoje, pois sem a presença dos gases que geram este fenômeno, a temperatura média do planeta diminuiria em aproximadamente 36 °C⁶⁹.

Segundo Baird⁷⁰, o efeito estufa foi identificado, ainda no século XIX, por Frenchman Jean Fournier e por Suedes Arrhenius que alertavam para os possíveis impactos ambientais devido ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera.

O clima é resultado da interação entre a biota, a atmosfera, os oceanos, as regiões dos pólos, a crosta terrestre e a radiação solar incidente. O balanço da energia proveniente do sol é a relação entre o que é absorvido por cada uma dessas superfícies e o que é refletido (albedo)⁷¹.

A radiação proveniente do sol apresenta comprimentos de onda entre 0,4 e 4 µm, apresentando o máximo de intensidade a 0,48 µm, com valor médio de 340 W/m² ⁷⁰.

Como qualquer corpo, a Terra troca calor, assim, para que a temperatura mantenha-se constante, a quantidade de energia absorvida deve ser igual à emitida.

Em 1988, o Programa Ambiental das Nações Unidas em conjunto com a Organização Meteorológica Mundial criaram o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). A função do IPCC é avaliar as novas tecnologias e as informações científicas relativas as mudanças ambientais⁷².

Especialistas de todas as áreas do conhecimento de 60 países auxiliam o IPCC a preparar avaliações periódicas relacionadas aos gases estufa, as mudanças climáticas e às conseqüentes mudanças sócio-políticas associadas⁵⁴. Agindo dessa maneira⁷⁵, o IPCC é visto como um órgão consultivo para os governos que necessitam de informações sobre o estado-da-arte relativo ao aquecimento global.

A Figura 5 mostra a situação de equilíbrio entre a energia proveniente do sol e a refletida pela Terra. Cerca de 31 % da energia é refletida para o espaço pelas nuvens, pelos gases da atmosfera e pela superfície da Terra. Albedo, segundo a definição do IPCC⁷¹, é a fração da radiação solar que é refletida por uma superfície ou objeto, freqüentemente expressa em porcentagem. Comparativamente, a neve apresenta um albedo maior do que as áreas verdes e do que os oceanos. A Tabela 11 lista algumas superfícies e os seus respectivos índices de reflexão.

Tabela 11 - Valores de albedo para superfícies⁷².

Tipo de superfície	albedo
Superfície do planeta	0,14-0,16
Nuvens, para todo o planeta	0,23
Neve fresca	0,8-0,9
Areia	0,4-0,6
Gramado, plantações	0,18-0,25
Floresta tropical	0,07-0,15
Superfícies de água	0,06-0,10

Cerca de 25% da energia proveniente do sol é absorvida pela atmosfera e os 44% restantes são absorvidos pela Terra. A energia absorvida pela Terra é utilizada para o crescimento da biomassa contribuindo também para o aquecimento da crosta terrestre e para as transformações da água.

A energia absorvida apresenta alta energia e baixos comprimentos de onda enquanto que a energia refletida possui baixa energia e altos comprimentos de onda na faixa do infra-vermelho entre 4 e 50 μm .

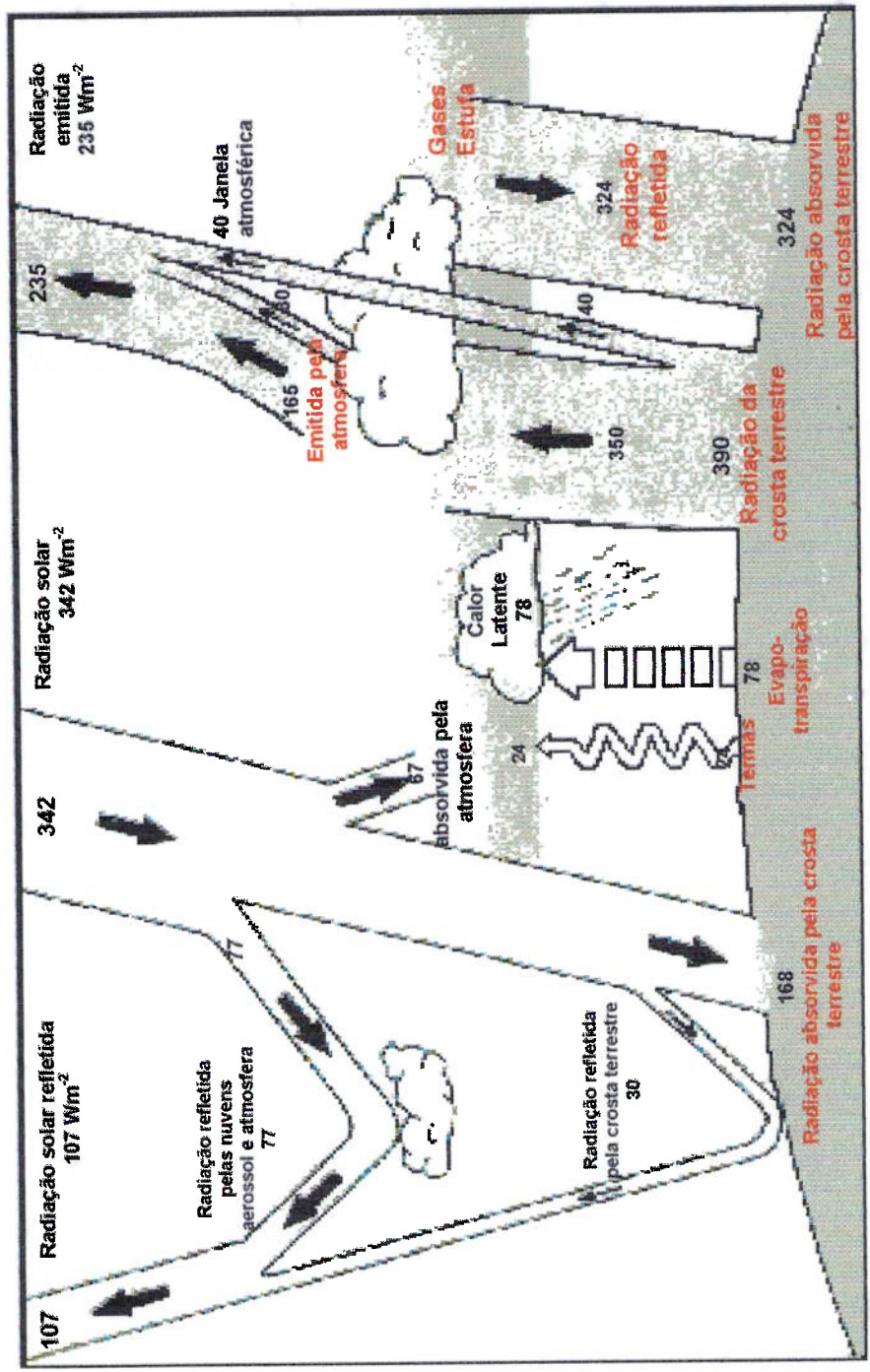


Figura 5 - Balanço de energia da Terra⁷².

Alguns gases presentes na atmosfera podem, temporariamente, absorver essa energia refletida pela Terra. Assim, nem todo infra-vermelho refletido escapa para o espaço. Algum tempo após essa absorção, as moléculas dos gases como o CO₂, reemitem essa energia em todas as direções, numa ação randômica. Então, parte desta energia acaba sendo direcionada para a Terra, e reabsorvida tanto pela crosta como pela atmosfera. Este fenômeno, o redirecionamento das ondas com comprimento próximo ao infra-vermelho que provocam o aquecimento é chamado efeito estufa⁶⁹.

Na Figura 6(a) pode ser observada, a representação gráfica das intensidades de energia incidentes do sol e da refletida a partir da Terra em função do comprimento de onda. A energia incidente possui maior intensidade e a refletida menor. A energia refletida apresenta diferentes comprimentos de onda, relativamente à energia incidente.

Na Figura 6(b) os gases que interagem com energias de determinados comprimentos de onda eletromagnética. A partir do comprimento de onda próximo a 5 μm e para valores maiores, a energia refletida interage, na estratosfera, com determinados gases. Esses gases foram denominados gases que geram o efeito estufa ou gases estufa.

As vibrações relativas entre os átomos são as responsáveis pela absorção da energia. A energia é completamente absorvida quando a sua frequência é próxima da frequência da movimentação interna dos átomos das moléculas dos gases⁷².

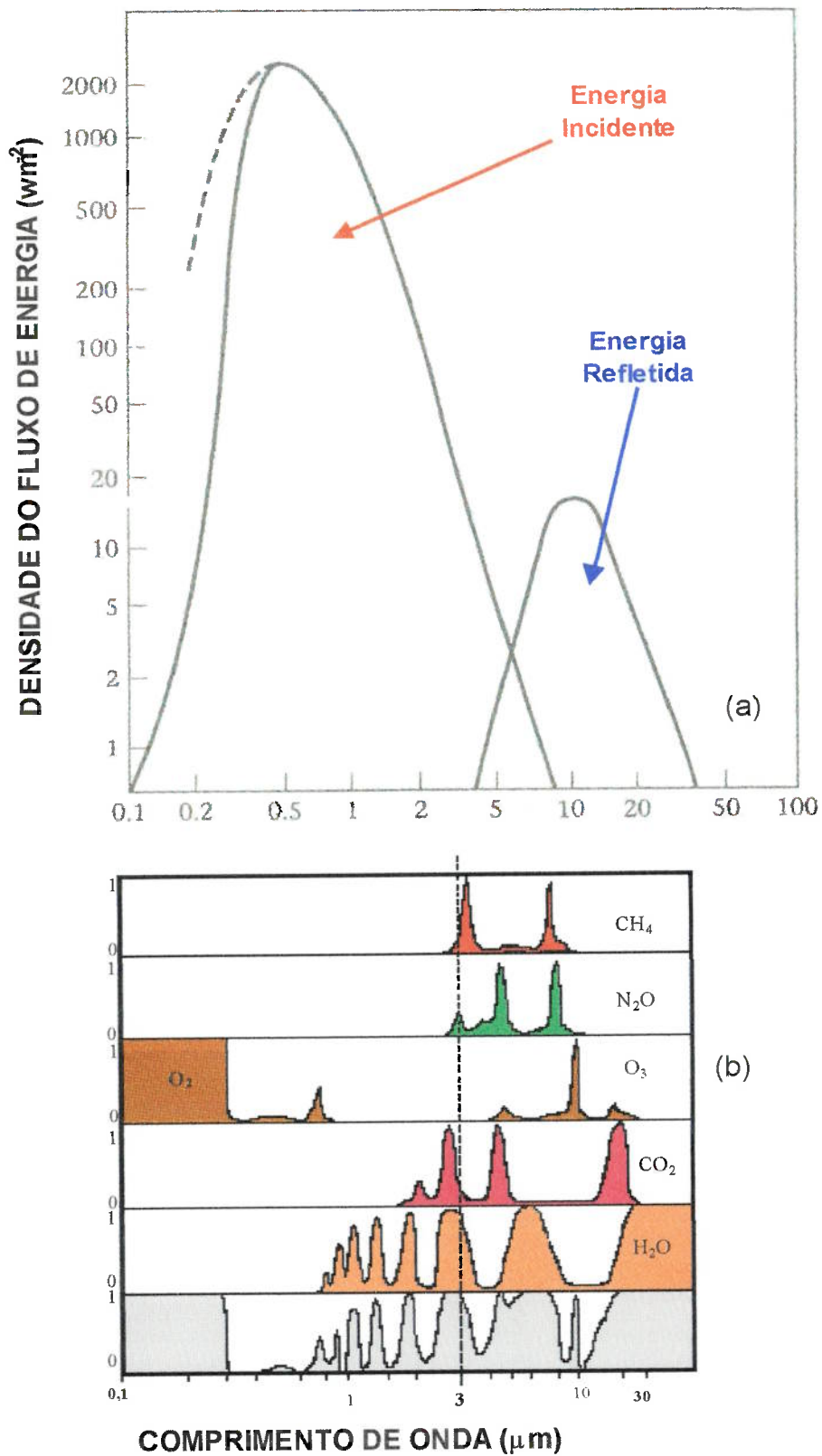


Figura 6 – (a) Intensidade de energia incidente e refletida associada a comprimentos de onda, (b) gases do efeito estufa (Modificado a partir da referência 73).

O movimento mais simples de vibração em uma molécula é o movimento oscilatório entre dois átomos que se afastam e se aproximam em uma mesma linha de direção. Esta oscilação ocorre em todos os tipos de ligações de todas as moléculas⁷². Se esta frequência de oscilação entre os átomos é próxima da frequência do infra-vermelho (energia refletida pela Terra), então ocorre a interação entre a radiação e a molécula do gás. E a energia da onda eletromagnética é absorvida⁷².

Os gases de efeito estufa incluem qualquer um que possa absorver a radiação infra-vermelho na atmosfera, a importância dos gases que provocam o efeito estufa varia consideravelmente com a natureza, concentração e a vida-média⁵⁴.

Foram criadas correlações entre os gases estufa para facilitar as comparações. A Tabela 12 mostra como o CO₂ por meio de uma indexação, baseado no *equivalente de CO₂*, utilizada pelo IPCC, se corresponde com outros gases. A mesma correlação é a utilizada para os estudos ACV¹².

Na Tabela 12, pode-se observar as características de alguns gases que contribuem para o efeito estufa. O tempo de residência mostra tempo, em anos, para a decomposição ou absorção⁴⁸. O potencial de aquecimento global refere-se a quanto o gás pode contribuir para o efeito estufa⁶. A terceira coluna apresenta a concentração média dos gases na atmosfera. A quarta coluna mostra os valores apresentados por Newell¹⁸ relativos ao custo para se evitar o dano ambiental.

Tabela 12 - Contribuições relativas dos gases e custos da mitigação para o aquecimento global^{18,48,69,70}.

Gás	Tempo de residência (anos)⁶⁸	Potencial de aquecimento global (PAG)⁴⁸	Concentração aproximada (ppb)⁶⁹	US\$/kg do gás PAG¹⁸
CO ₂	50-200	1	360.000	0,014
CH ₄	12	21	1.700	0,29
N ₂ O	120	310	310	4,20
CFC-11	60	3400		
CFC-12	195	7100	3	-
HCFC-22	12	1600		

Devido a falta de dados, as técnicas que visam criar parâmetros entre os geradores de tensão, neste caso os gases, não são plenamente aceitas, na medida em que não traduzem situações exatas e definitivas^{63,64}.

Para a Terra, o vapor d'água é atualmente, o mais importante gás do efeito estufa, porém apresenta baixa vida média e a sua concentração global não é afetada pela atividade humana, apesar do aumento da concentração de outros gases poderem, indiretamente, afetar o ciclo da água⁶⁹. O dióxido de carbono é o segundo mais importante⁶⁹.

Cada gás apresenta uma contribuição ao aquecimento global, por apresentar uma vida média, um potencial de aquecimento global, e um volume de emissão para a atmosfera particular. A Tabela 13, apresenta os valores da participação no aquecimento global dos gases antropogênicos.

Tabela 13 - Contribuições relativas dos gases estufa ao aquecimento global⁷⁰.

Gas	Contribuição (%)
CO ₂	48,0
CH ₄	13,0
CFCs	20,0
N ₂ O	6,0
Outros	13,0

Os gases que estão sujeitos a acordos internacionais no que se refere ao efeito estufa, são o hexafluoreto de enxofre (SF₆), os hidrofluorcarbonos (HFCs) e os perfluorinatos carbonos (PFCs)⁵⁴, além dos listados na Tabela 13.

As emissões de CO₂ estão desigualmente distribuídas entre os países mais desenvolvidos e os menos desenvolvidos, um dos fatores que contribui para esse fato é a diferença da matriz energética. Na Tabela 14, pode-se observar esta distribuição.

Os valores das emissões *per capita* da Tabela 14 indicam os Estados Unidos como o maior emissor de CO₂ entre todos os países. Utilizando-se valores conservadores para a população americana, 250 milhões, e de 1,1 bilhão para a população chinesa, mesmo assim os americanos emitiram, em 1998, mais do que o dobro de CO₂ do que os chineses.

Tabela 14 - Emissões per capita de CO₂¹ em 1998.

País ou Região do Planeta	Emissão de CO₂ (t)
Estados Unidos	19
Canadá	15
Federação Russa	14
Alemanha	11
Reino Unido	9
China	2,1
Brasil	1,3

Nos Estados Unidos, 85% da energia é proveniente da queima de combustível de origem fóssil. Os 15% restantes da energia vêm de fontes que geram pouco ou nenhum CO₂, ou seja usinas hidrelétricas e nucleares⁵⁴.

¹ Anhuf, D. Global Change. IAG-USP, maio 2003. Anotação de aula

A geração dos gases estufa nos Estados Unidos, é assim distribuída⁷⁴. 82 % são devido ao CO₂ (mais de 97% proveniente da queima de combustíveis fósseis), 10 % devido ao CH₄ (40% destes originados em aterros), 6 % devido a N₂O (68 % gerados na agricultura), o restante é devido a todos os outros gases.

2.5.1 Dióxido de Carbono

Há muitas fontes naturais de CO₂, das quais são citadas a respiração de plantas e de animais, queimadas de florestas e de pastos e atividade vulcânica⁷².

A atividade humana contribui significativamente no ciclo do carbono⁶⁵. As fontes antropogênicas de dióxido de carbono incluem a emissão de carbono via combustão de combustível fóssil para a geração de energia, o que representa mais de 80 % de todas as emissões de gases de efeito estufa⁶⁹.

2.5.2 Aquecimento Global

Segundo o relatório do IPCC⁷⁴, até mil anos antes da Revolução Industrial a concentração dos gases que provocam o efeito estufa, na atmosfera, manteve-se relativamente constante. A partir desta época houve um aumento na concentração desses gases na atmosfera. A concentração de CO₂ aumentou em mais de 30 % desde o período pré-Revolução Industrial até os dias de hoje e continua crescendo a uma taxa de 0,45 % ao ano⁷⁴.

A emissão de CO₂ por unidade de energia consumida média mundial (t CO₂/kWano) atualmente é decrescente a uma taxa de 0,3 % ao ano, como consequência da substituição dos combustíveis por exemplo carvão mineral por gás natural e pela energia nuclear e pelo desenvolvimento de motores e de geradores mais eficientes⁷⁰. Como o crescimento econômico mundial é da ordem de 3 % ao ano, esta diminuição não é suficiente para estabilizar as emissões de carbono⁷⁰.

O aquecimento global, que é a mudança da temperatura média, é um fenômeno extremamente difícil de se avaliar e de se prever devido à interação entre os fenômenos que ocorrem na atmosfera, nos oceanos e na terra. Além dos fatores externos como o comportamento do sol e das variações no movimento do planeta^{72, 74}.

Há diferentes modelos que prevêem como o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera poderá acarretar um aumento da temperatura, estes valores estão reunidos no relatório do IPCC⁷².

Um grupo de cientistas e economistas do Massachusetts Institute of Technology⁵⁴ (MIT) desenvolveu um modelo que inclui os cálculos dos fenômenos atmosféricos, além do comportamento dos ecossistemas e do desenvolvimento mundial. O resultado deste trabalho⁵⁴ mostra um aumento da temperatura média da Terra nos próximos cem anos e este resultado é similar ao encontrado nos trabalhos reunidos no relatório do IPCC^{72, 74}. Na Figura 7 pode-se observar o resultado dos cálculos da evolução da temperatura média da Terra indicando um aumento da temperatura global durante o transcorrer deste século.

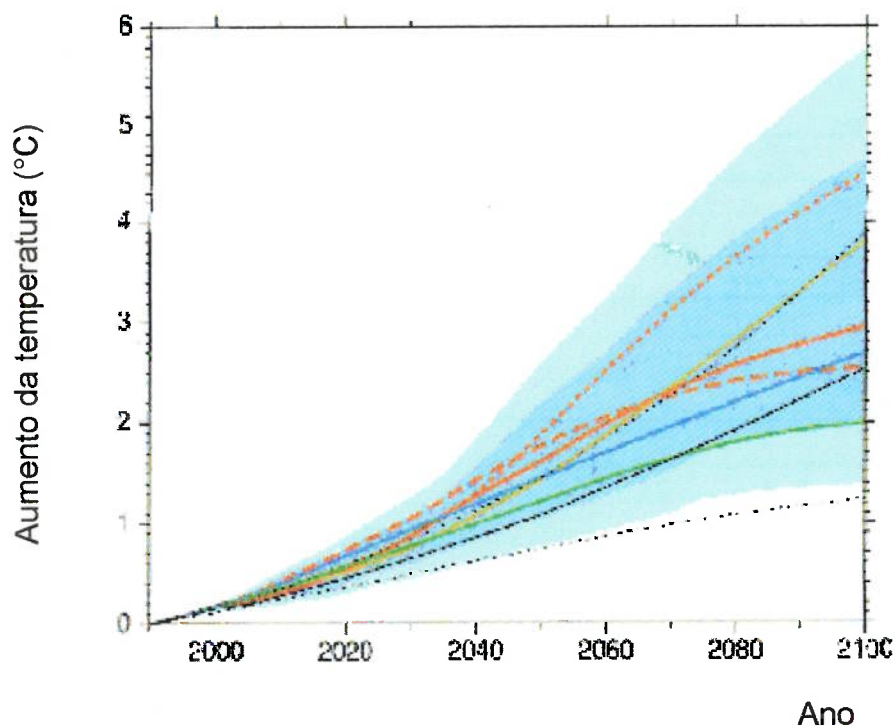


Figura 7 - Resultados de estimativas das variações temperatura média da Terra⁷⁴.

O resultado mais otimista desta compilação prevê o aumento de um grau até o ano de 2100, enquanto o mais pessimista indica um aumento da temperatura média da Terra em mais de 5 °C.

A diferença entre os valores é devido as incertezas das condições esperadas relativas aos fenômenos atmosféricos e aos valores das emissões⁵⁴.

Os impactos ambientais, gerados pela produção de produtos ou pela prestação de serviços, atingem e afetam o homem. Baseado neste fato, valores estatísticos do custo de uma vida foram atribuídos¹⁸. Esses valores

foram estimados para os países mais desenvolvidos, uma vida vale US\$ 1.500.000,00¹⁸. Como não há estudos para países menos desenvolvidos e pobres estimou-se o valor da vida nesses países em US\$ 300.000,00 e 150.000,00 respectivamente¹⁸.

O aumento da temperatura pode ser convertido na forma de impactos, a mitigação desses impactos pode ser convertida em valores monetários. Newell¹⁸, utilizando como referência um aumento da temperatura em 2,5 °C, reuniu valores que correlacionam os efeitos devido ao aquecimento de 2,5 °C e o custo desse impacto em dólares. Na Tabela 15 pode-se observar a avaliação do impacto em várias áreas. Na Tabela 16 observa-se o custo relativo a esses impactos.

Prever as conseqüências do aumento das concentrações dos gases que provocam o efeito estufa na atmosfera é uma tarefa difícil e gera conclusões controversas^{54,69,70}. Porém, algumas mudanças nas características ambientais da Terra parecem ser consensuais, tais como^{54,66}: variação na precipitação, na formação das nuvens, nos níveis dos oceanos e na formação dos furacões.

Tabela 15 - Impacto anual devido ao aquecimento de 2,5 °C¹⁸.

Impacto	Base para o Cálculo	Perda Mundial
Agricultura	Perda do bem estar	0,23% Produção
Florestas	Perda da área	1.235 km ²
Pesca	Redução	6.829 .100 t
Energia	Aumento da demanda	354 TWh
Água	Redução na disponibilidade	230 km ³
Desertificação	Ganho de área	140.1000 km ²
Mangues e Pântanos	Perda de área	253.1000 km ²
Ecosistema	Perda de habitat e espécies	Difícil quantificação
Saúde/ mortalidade	Morte	138.000
Poluição do ar	Aumento equivalente em emissões	
	NOx	4.545.1000 t
	SO ₂	2.737.1000 t
Migração	imigração	2.734.000
Furacões		
Acidentes	Mortes	8000
Prejuízos	Milhares de dólares	630

Tabela 16 - Avaliação do prejuízo anual pelo aquecimento de 2,5 °C¹⁸.

Categoria de Impacto	Valor(US\$) em bilhões	Considerações
Mortalidade	49,2	US\$ 1,5 M/vida em países mais desenvolvidos
Poluição do ar	15,4	US\$ 0,1 –15 /kg NOx, \$ 0,25-3,5/kg SO ₂
Energia	23,1	1,25 % aumento em corrente alternada / °C
Agricultura	39,1	Perda do bem estar social
Semi-árido	14	US\$ 1 10 ⁶ /km ²
Pântanos	31,6	US\$ 1,25 10 ⁶ /km ²
Perda de floresta	2	Perda do bem estar
Perda de água doce	46,7	Perda do bem estar
Desastres naturais	2,7	Perda do bem estar/danos a propriedade
Biodiversidade/ecosistemas	40,5	\$ 30/pessoa/ano

Por outro lado, o aquecimento previsto devido ao efeito estufa precisa ser analisado também do ponto de vista do ciclo natural de aquecimento e resfriamento da Terra, o que torna essa análise ainda mais complexa. Na Figura 8⁷⁴ pode-se observar as variações da temperatura ao longo dos últimos milhares de anos. Há um ciclo bem definido de resfriamento (era glacial) e aquecimento (degelo) da Terra que se repete aproximadamente a cada 100.000 anos. Além disso, essa variação da temperatura é acompanhada por ciclos semelhantes nas concentrações de dióxido de carbono e de metano na atmosfera, num fenômeno de desprendimento e captura, que ocorreu de modo natural.

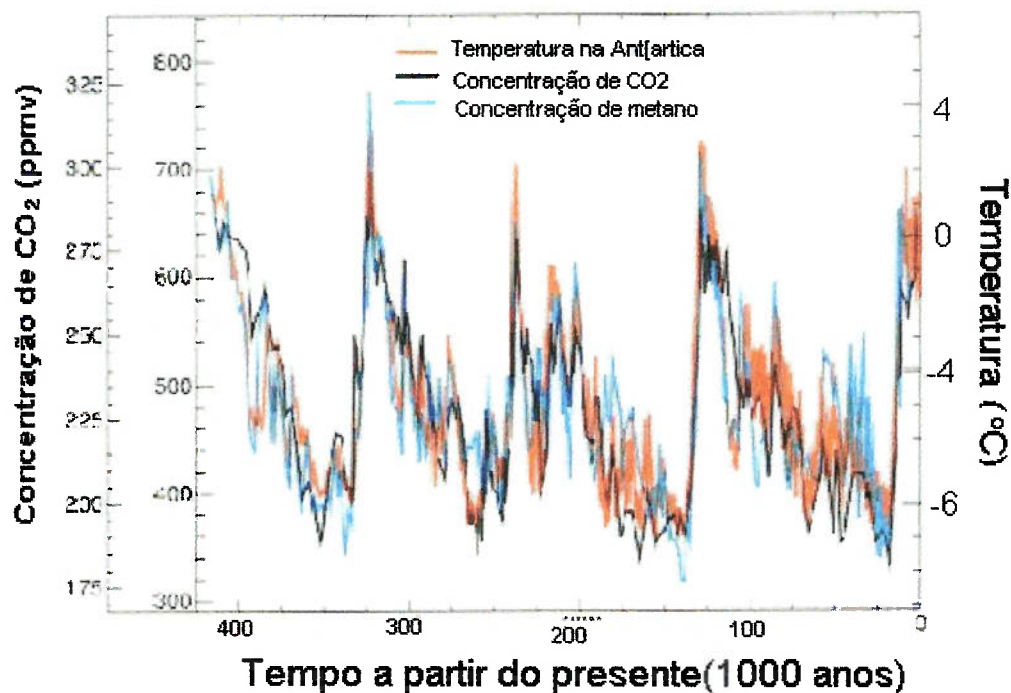


Figura 8 - Variação da temperatura da Terra e das concentrações de CO₂ e de metano, a partir de ar atmosférico aprisionado no gelo na Antártica em função do tempo já transcorrido (em milhares de anos) ⁷⁴.

2.5.3 A comunidade internacional

Em junho de 1992, no Rio de Janeiro, aconteceu a Conferência sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento patrocinada pelas Nações Unidas. Este encontro estabeleceu o Tratado de Mudanças Climáticas, que foi ratificado por 165 países⁵⁴. Os signatários deveriam manter os níveis das emissões dos gases estufa em níveis que evitassem criar qualquer alteração perigosa ao clima, porém não era especificada nenhuma meta quanto aos níveis das emissões. Este acordo solicitava aos participantes que periodicamente fizessem um inventário das suas emissões antropogênicas⁶⁹.

Em 1997, na Segunda Conferência entre as Partes (COP 2) em Quioto, os governos concordaram que apesar das incertezas, havia um perigo real do aquecimento da Terra devido as emissões dos gases de efeito estufa, havendo risco se uma nova orientação não fosse desenvolvida⁵⁴. De acordo com o protocolo de Quioto, o limite das emissões dos gases estufa dos países desenvolvidos deverá ser 5,2% inferior do que o ano base. Esta meta deverá ser atingida no período de 5 anos entre 2008 e 2012, de maneira a eliminar flutuações devido a fatores econômicos ou atmosféricos. O ano de referência adotado para os mais importantes gases estufa, tais como CO₂, CH₄ e NO₂ foi 1990, sendo o ano de 1995 utilizado como base para os gases sintéticos, como o SF₆, os HFCs e os PFCs. O protocolo estipula metas específicas para cada país, na Tabela 17, pode-se observar os valores para alguns casos.

No caso dos Estados Unidos, a meta é abaixar em 7% a geração dos gases estufa enquanto a Islândia pode aumentar a geração em até 10% em

relação ao ano base de 1990⁵⁴. A Tabela 17 apresenta os valores estipulados como metas para diversos países. Os países mais desenvolvidos devem de uma forma geral reduzir a geração de gases estufa, enquanto os países menos desenvolvidos podem aumentar a geração. O Japão necessita diminuir em 6% a geração ou encontrar meios de continuar emitindo e mesmo assim atingir a meta, a Austrália pode aumentar a produção desses gases em até 8%.

Tabela 17 - Metas para a emissão de gases estufa para diversos países⁵⁴.

País	Metas de emissão em (%) entre 2008 e 2012
Estados Unidos	- 7
Comunidade Européia	- 8
Japão	- 6
Canadá	- 6
Federação Russa	Estabilizada – zero
Austrália	+ 8
Islândia	+ 10

Segundo Lupis⁵⁴, a característica chave do Protocolo de Quioto é a liberdade de mercado, países e companhias podem buscar a forma mais barata para a redução nas emissões, e desta forma reduzir os custos. Assim, os países ou empresas não precisam necessariamente reduzir as emissões no local de origem, mas podem negociar entre os países na forma de papéis, que são os Certificados de Redução das Emissões, que começaram a serem feitos em 2000 e podem ser utilizados no período entre 2008 e 2012. Esses certificados podem ser relativos a áreas plantadas ou reflorestadas ou devido a projetos que visem a substituição de combustíveis ou de processos que diminuam a produção de gases estufa⁷⁵.

2.6 Propostas desenvolvidas para a redução das emissões de gases estufa.

Pode-se separar as medidas relativas a diminuição na geração dos gases de efeito estufa em dois grupos: aquelas medidas realizadas fora das siderúrgicas e aquelas que ocorrem dentro das usinas.

2.6.1 Programas de minimização na geração de resíduos fora das siderúrgicas.

As principais medidas que podem ser tomadas para a redução das emissões de CO₂ são⁷⁰:

- ✓ Melhoria na eficiência e na conservação da energia.
- ✓ Substituição dos combustíveis.
- ✓ Utilização de fontes renováveis de energia.
- ✓ Descarbonetização do ciclo do combustível fóssil, pela captura e deposição de CO₂.

A melhoria na eficiência energética apresenta 4 níveis⁶⁹:

- 1- eficiência na produção da energia primária;
- 2- eficiência na conversão da energia primária em secundária;
- 3- eficiência na distribuição de energia aos usuários;
- 4- eficiência da conversão.

Como a matriz energética brasileira é baseada em hidrelétricas, a relação entre produção de energia e a geração CO₂ não ocorre diretamente como no caso americano, que utiliza termelétricas. Assim, o interesse na

melhoria da eficiência na geração, no transporte e no uso da energia no Brasil relaciona-se apenas com o custo, e não as emissões.

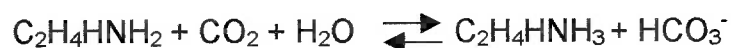
A substituição de combustíveis com alto teor de carbono, tais como o carvão mineral e o petróleo, por combustíveis com baixo ou nenhum teor de carbono, como o gás natural e as usinas nucleares apresentam potencial de redução na geração de CO_2 ^{70,77}. Porém, cada uma dessas opções apresenta suas restrições, enquanto a primeira tem reservas limitadas a segunda apresenta problemas relativos a segurança e disposição final.

Há perspectivas referentes a utilização de fontes renováveis de energia, uma vez que o custo da energia elétrica produzida a partir da energia eólica, da conversão térmica da biomassa e da energia geotérmica está se aproximando de valores comerciais próximos aos da energia proveniente do combustível fóssil⁷⁰.

No Brasil, há projetos de geração de energia elétrica a partir de energia eólica com moinhos de vento já instalados em Fortaleza e em Fernando de Noronha. A geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana já se apresenta como opção e a combustão do álcool tende a se tornar mais atraente a partir do momento em que mais países assinarem o protocolo de Quioto o que promoverá um comércio mais intenso entre países que geram CO_2 e aqueles que apresentam soluções alternativas a geração de energia ou formas de captura de CO_2 ⁷⁵.

Os métodos de captura e deposição de CO_2 classificam-se como⁶⁹:

- ✓ método de absorção química. São processos que utilizam a monoetanolamina (MEA), segundo a seguinte equação:



- ✓ Criogenia: liquefação do CO_2 por compressão e posterior separação do CO_2 em estado líquido ou sólido.
- ✓ Membranas.
- ✓ Adsorção física.
- ✓ Deposição do CO_2 em jazidas de gás e de petróleo inativas ou no fundo do mar.

O uso destas tecnologias ainda apresenta alto custo relativo, aproximadamente 30 % do valor da energia gerada⁷⁰.

O uso da biomassa como combustível não incrementa o teor de CO_2 na atmosfera, já que este é produzido durante a combustão equilibrando-se com o CO_2 consumido durante a fotossíntese⁷⁰. Van Lonn⁶⁹, por outro lado, argumenta que o carbono colocado na atmosfera de uma vez durante a queima altera localmente a concentração já que este demorou anos para ser fixado.

As emissões de CO_2 devido ao funcionamento de uma termelétrica a carvão de 500 MW de potência requerem 0,2 Mha de floresta tropical para a fixação do carbono⁷⁰. Lora², cita o valor de US\$ 10,00 por tonelada de carbono emitido

Cada uma dessas opções cria a possibilidade de reduzir significativamente a emissão dos gases estufa. Entretanto, segundo Audus⁷⁸, ainda não há consenso no que se refere a avaliação entre o custo efetivo

² LORA, E.S. **Poluição Industrial**. São Paulo, Universidade de São Paulo. Apostila do curso ESUSP.

para promover estas mudanças e a efetividade dela e o custo final para a sociedade.

Destas medidas, uma ou mais estão sendo adotadas pelas siderúrgicas para melhorar o desempenho e a competitividade e diminuir a emissão dos gases estufa.

2.6.2 Programas de minimização na geração de resíduos em siderúrgicas.

Segundo Birat⁷⁹, as usinas siderúrgicas têm seguido a tendência mundial em diminuir as emissões de CO₂, a principal emissão gerada durante a fabricação de aço. A ênfase tem sido dada na tentativa de estimar o nível das emissões das novas rotas de processamento, e dessa forma identificar estratégias para reduzir as emissões e avaliar os possíveis impactos dessas novas técnicas empregadas⁷⁹.

No Brasil, esta tendência é acompanhada pela facilidade atual das empresas de poderem utilizar o gás natural em substituição a outros combustíveis como o óleo, na geração de calor⁷⁶.

Na Alemanha, segundo Philipp⁸⁰, a geração de CO₂ para produzir uma tonelada de aço caiu 53 % desde 1960 até 1996 devido aos avanços tecnológicos nas rotas de produção.

Porém, segundo Bandyopabhyay⁸¹, o crescente interesse da população sobre a poluição ambiental e as severas regulamentações ambientais têm levado todas as indústrias, incluindo as do setor de aço e de

ferro, a também tentarem resolver o problema relativo a disposição final dos resíduos. Como exemplo do custo financeiro crescente das empresas de se manterem dentro da regulamentação vigente, as siderúrgicas dos Estados Unidos gastavam, em 1988, US\$ 8,16 nas operações de controle de poluição do ar, água e dos resíduos por tonelada de aço produzido; esse gasto subiu para US\$ 12,00 em 1994.

As medidas visando a diminuição da geração de resíduos são, muitas vezes, acompanhadas por reduções no consumo de energia, na diminuição da geração dos gases do efeito estufa e de ganhos econômicos⁸². Os ganhos econômicos podem incluir aumento da produtividade, redução do uso de matérias-primas e dos custos de operação, como a economia do eletrodo do forno elétrico a arco (FEA)⁸².

Assim, a atenção das siderúrgicas no que tange ao meio ambiente não se restringe apenas aos gases estufa, mas também a todo o resíduo gerado durante o processo produtivo. A seguir serão apresentadas algumas das técnicas disponíveis na literatura^{54,79,83,85,86} relativas a diminuição do resíduo gerado, em alguns casos há uma diminuição conjunta da geração dos gases estufa.

2.6.2.1 Soluções propostas

Segundo Szekely⁸³, em 1993, os Estados Unidos produziram 87 milhões de toneladas de aço a um valor aproximado de US\$ 27 bilhões. Deste volume, aproximadamente 40 % foram originados em siderúrgicas não

integradas. Para produzir esse aço foram gerados 28 milhões de toneladas de resíduos, tais como escória, borra e pó de aciaria.

O custo anual da disposição final destes resíduos varia entre US\$ 250 milhões e US\$ 500 milhões, soma-se a esse valor a possível recuperação do ferro presente, que foi estimado entre US\$ 500 milhões e US\$ 1 bilhão⁸³. Assim, segundo Szekely⁸³, o tratamento de resíduos em siderúrgicas é um negócio que pode ser estimado em US\$ 1 bilhão anuais.

Dentre as práticas apresentadas na literatura (Lupis⁵⁴, van Veen⁸⁴, Birat⁷⁹, Szekely⁸³, Michaelis e Jackson^{85,86}, Worrell e colaboradores⁸², Marukawa e Edwards⁸⁷), que objetivam a redução das emissões, de resíduos e de efluentes durante a produção do aço e do ferro a mais ambiciosa é a do *Conceito de geração Zero de Resíduos* (Wrona⁸⁸ e Bandyopadhyay⁸¹).

Como já mencionado, a geração de gases que promovem o efeito estufa é um dos maiores impactos ambientais causados pelas usinas siderúrgicas⁷⁹ no que se refere a emissões. De forma a tentar resolver este problema, estudos^{54,79,84} têm sido conduzidos para medir e estimar o nível das emissões em função das diversas rotas de produção do aço e da substituição de ferro gusa por sucata de ferro.

As emissões de CO₂ associadas ao forno elétrico a arco (FEA) com matéria-prima baseada em sucata é menor do que aquela associada à matéria-prima baseada em minério de ferro, isto se deve basicamente à menor necessidade de carvão para fazer aço proveniente da sucata⁸⁹.

Segundo o relatório da IISI⁹⁰, para se produzir um quilo de aço utiliza-se 1,07 kg de sucata e gasta-se 10 MJ de energia, este valor é

aproximadamente a metade da energia necessária para produzir a mesma quantidade de aço primário.

Birat⁷⁹ reuniu valores relativos a emissão de CO₂ em função da variação da composição de ferro gusa na carga, para diversas rotas de produção. Na Figura 9, pode-se observar o resultado deste trabalho, de forma resumida, para três cenários diferentes: eletricidade gerada sem consumo de carbono, dados da França e média mundial.

Na Figura 9, observa-se que ocorre um aumento da emissão de CO₂ quando a composição da carga vai se enriquecendo em ferro gusa, com conseqüente diminuição da quantidade de sucata.

A taxa de redução da emissão de CO₂ pela adição de sucata na carga é de 2 kg CO₂/kg de sucata na substituição do ferro gusa.

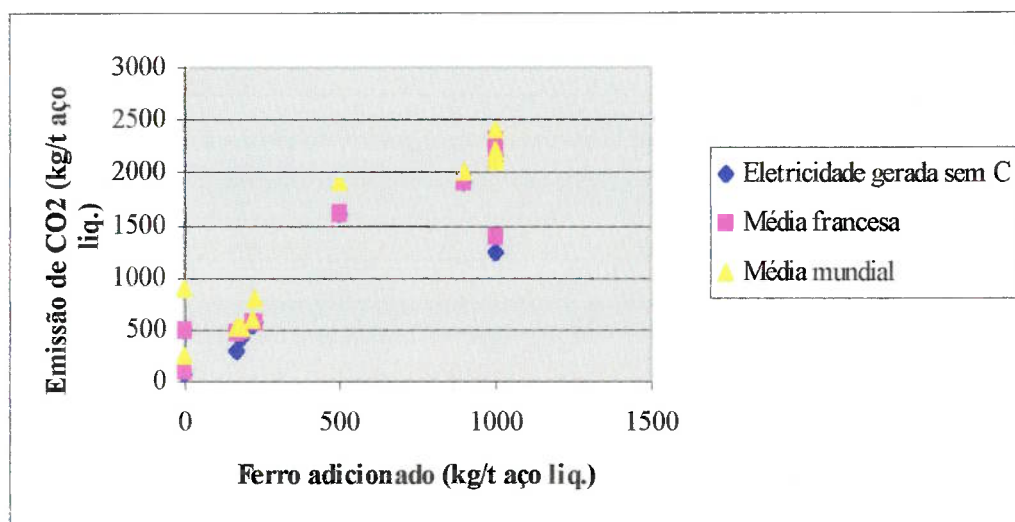


Figura 9 - Emissão de CO₂ versus massa de ferro na carga ⁷⁹.

A rota de produção do aço também influencia na geração de CO₂⁵⁴. A Tabela 18 apresenta o valores de emissão de CO₂ para duas rotas e diversas composições de carga.

Tabela 18 - Efeito da rota de processamento e da composição da carga na emissão de CO₂, modificada a partir de Lupis⁵⁴.

Rota	kgCO ₂ /kg aço líquido
Usina integrada (25 % de sucata em conversor)	1,46
FEA (100 % sucata)	0,442
FEA (60 % sucata, 40 % carboneto de ferro)	0,702
FEA (50 % sucata, 50 % gusa líquido)	1,352

Pode-se notar, a partir dos valores da Tabela 18, que o processo por FEA gera menos CO₂ do que o processo por conversor.

Birat⁷⁹ realizou uma simulação referente a redução da emissão de CO₂ pela substituição da carga por sucata em conversores, utilizando dados de seis siderúrgicas européias.

Na Figura 10, observa-se o resultado desta simulação. Neste caso a substituição de matéria-prima virgem por sucata apresenta uma taxa de redução do CO₂ de 1,55 kg CO₂/ kg sucata adicionada.

Segundo Birat⁷⁹, a reciclagem, ou seja, a utilização da sucata de ferro na carga é a solução mais eficaz no que diz respeito a redução da emissão de CO₂ nas siderúrgicas.

Segundo Ruth⁹¹, que utilizou modelação matemática para estimar a produção de aço em FEA pelos próximos 40 anos, a conclusão tirada a partir do seu trabalho foi a de que a produção de aço carbono será feita basicamente a partir de sucata de aço.

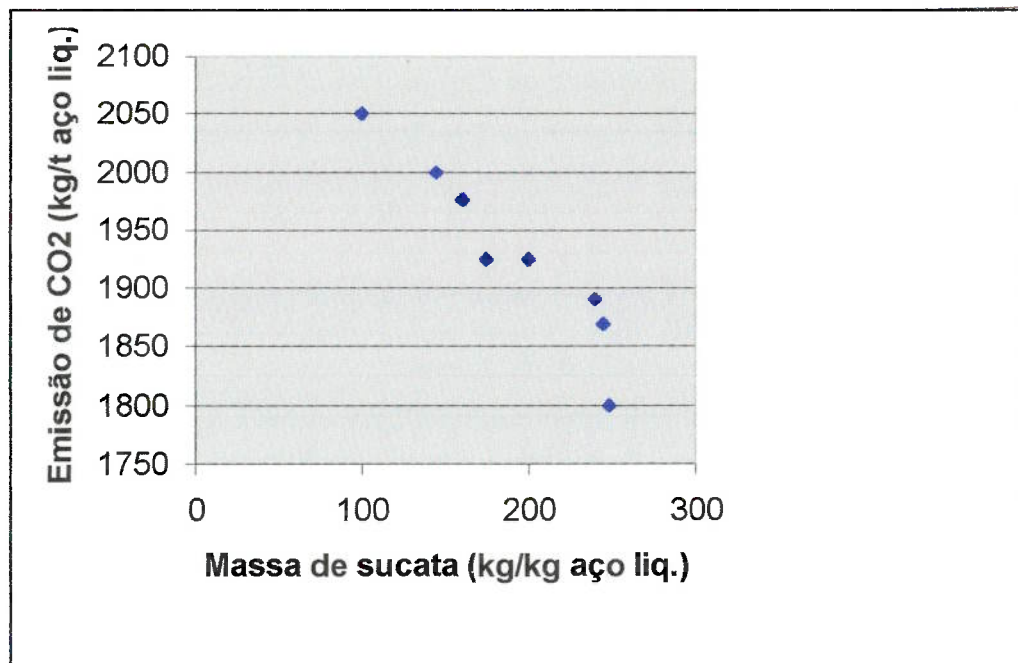


Figura 10 - Variação da emissão de CO₂ pela adição de sucata na carga em conversores⁷⁹.

Dessa forma, o uso de sucata como matéria-prima parece estar bem estabelecido como ferramenta na diminuição na formação dos gases estufa^{54,79,91}. Entretanto, alguns tipos de sucata de aço estão associadas com materiais voláteis (incluindo o zinco, o cádmio e o mercúrio) e com impurezas orgânicas (como óleos e plásticos) e que podem ser fontes de hidrocarbonetos⁸⁹. Há poucas informações no sentido de entender como os diferentes tipos de sucata influenciam nessas emissões durante o processo de fusão⁸⁹. Dentre as ações promovidas pelas siderúrgicas visando reduzir essas emissões durante o processo de fusão da sucata podem-se ressaltar⁸⁹: o pré-tratamento da sucata para remover as impurezas, novas técnicas para

limitar a formação de compostos orgânicos e, como todas as emissões não podem ser suprimidas, há a implantação de sistemas de coleta e fixação dessas emissões. Desses sistemas um dos mais eficientes⁸⁹ é o de coleta de pó de aciaria gerados pelo FEA que apresenta uma média de captura de 97% podendo atingir 99,9 %.

Segundo Szekely⁸³, os principais problemas ambientais relacionados a resíduos encontrados na produção de aço secundário são: a escória do FEA, o pó do FEA, a carepa e a borra geradas na laminação e o óxido de ferro.

Os fornos elétricos a arco geram, em média, 116 kg de escória para cada tonelada de aço produzida, sendo que a média mundial de reuso e/ou reciclagem é 77%, e o restante encaminhado para aterros⁸³. No Brasil, as formas de reaproveitamento da escória são basicamente duas: o uso como lastro em estradas na substituição da brita e como matéria-prima para a fabricação de cimento. Szekely⁸³ sugere além desta última solução o uso como aditivo em indústrias de vidro.

O pó de aciaria é a emissão mais crítica do FEA e é classificado como resíduo perigoso nos Estados Unidos, na Europa e no Japão⁸⁸ e a sua disposição final representa o maior custo relativamente aos outros resíduos⁸³. São produzidos entre 4 e 32 kg de pó de aciaria por tonelada de aço, com uma média de 18 kg/t⁸³ e este apresenta na sua composição⁸⁹ zinco, chumbo, cádmio, cromo e níquel. Muito embora hajam métodos para o processamento deste pó⁸³, o custo por tonelada varia entre US\$ 150,00 e US\$ 250,00 o que acarreta um aumento no preço da tonelada do aço entre US\$ 3,00 e US\$ 6,00. Segundo Szekely⁸³, as soluções que devem ser melhor exploradas são:

- ✓ Modificar a carga, o sopro e a forma do sistema de exaustão visando minimizar a formação do pó. Isso já ocorre, pois a variação na geração do pó entre 4 e 32 kg indica que as diversas práticas da aciaria nas empresas promove alteração da quantidade de resíduo.
- ✓ Examinar a composição do pó produzido durante as etapas da operação do forno e tentar uma segregação.

Worrel et al⁸² compilaram medidas a serem tomadas de forma a aumentar a eficiência energética nas siderúrgicas. Na Tabela 14, pode-se observar essas práticas e essas tecnologias.

Tabela 19 - Práticas e tecnologias visando diminuir o gasto energético⁸².

Medidas que podem ser aplicadas em usinas integradas e secundárias
Adoção de fundição contínua
Pré-aquecimento da panela eficiente
Fundição de placas finas
Laminação
Aquecimento da carga
Maçarico recuperador no forno de reaquecimento
Controle dos níveis de oxigênio e do fluxo nos ventiladores de ar para combustão
Controle do processo do laminador de tiras a quente
Isolamento térmico dos fornos
Recuperação do calor dos resíduos utilizando trocadores de calor a água
Monitoramento automático e sistema de metas
Reduzir o vapor d'água na decapagem

Se forem adotadas essas práticas, Worrel et al⁸² estimam uma redução no consumo de energia de 6 % e uma queda de 4 % na emissão de CO₂.

Segundo Marukawa e Edwards⁸⁷, como o ferro e o aço são dois dos materiais mais utilizados no planeta, faz-se necessário desenvolvê-los como eco-materiais. Assim, a relevância dos impactos produzidos por esses

materiais não deve se restringir apenas as emissões e aos resíduos gerados ao longo do processo produtivo, mas também no que se refere a recuperação, reciclagem e a um exame mais crítico das análises do ciclo de vida dos produtos que contenham esses materiais. As diretrizes são propostas⁸⁷ relativas a composição química visando facilitar a reciclagem dos produtos.

As ligas de aço foram divididas em três categorias:

- ✓ Composição química desfavorável: são aquelas nas quais os elementos químicos são de difícil separação do ferro, ou que podem causar refugo: cobre, níquel, cromo, estanho, cobalto e molibdênio e o ferro inoxidável ferrítico (18 % Cr).
- ✓ Composição relativamente favorável: carbono, alumínio e silício.
- ✓ Recuperável como liga: aço inoxidável austenítico (18 %Cr - 8 %Ni).

É proposta⁸⁷ uma avaliação mais crítica dos trabalhos de ACV para os produtos a base de aço de maneira a promover economia. É citada, como exemplo, uma ACV sobre veículos relativa ao consumo de energia durante toda a vida. A conclusão deste trabalho é que entre 75 e 80 % da energia total é consumida pelo motorista guiando o automóvel. Utilizando-se os dados referentes aos carros japoneses, que apresentam para uma diminuição de peso do automóvel de 10 % uma redução no consumo entre 10 e 12 %, Marukawa e Edwards⁸⁷, apresentam como sugestão utilizar aços de maior resistência em substituição aos atuais e que, desta forma, deixariam os automóveis mais leves e mais econômicos.

Nas usinas não integradas, a geração de óxidos a base de ferro (como borra e carepa) é operada basicamente em dois lugares durante a laminação para a produção de produtos planos e na forjaria devido a oxidação das camadas externas dos produtos.

A laminação a quente gera carepa e borra com elevada concentração de ferro, contaminada com hidrocarbonetos. Uma linha de produção de laminados pode gerar 45,35 t/dia de óxido contaminado com óleo entre 1 e 30 %⁸⁸. Historicamente, este material era encaminhado para a sinterização, porém com as novas regulamentações este material tem disposição final em aterros a um custo entre US\$ 27,56 e US\$ 55,13 por tonelada. Bandyopadhyay et al⁸¹ apresentam uma série de técnicas para a separação do óleo presente e do uso do óxido e do óleo recuperado. Concluiu-se⁸¹ que esses resíduos na forma de óxidos apresentam potencial tanto para reciclagem quanto para servirem como matéria-prima para recuperar os elementos de liga valiosos presentes.

O conceito de geração Zero de Resíduos⁸⁸ é uma tentativa para diminuir a emissão de efluentes, as emissões, minimizar o consumo de energia e diminuir a geração de resíduos tóxicos e não tóxicos produzidos direta ou indiretamente durante o processo. Três são os métodos propostos para atingir o objetivo:

- ✓ Reduzir o volume de resíduos gerados na origem, através de melhorias no processo e na operação e por manutenção constante. Por exemplo, o da tecnologia de carregamento contínuo em FEA reduz em até 40 % o volume de pó gerado.

- ✓ Converter os resíduos gerados em um processo em matéria-prima de outro processo. Por exemplo, o uso da escória de FEA em fornos de cimenteiras.
- ✓ Redesenhar ou desenvolver processos que não gerem resíduos sem utilidade futura. Por exemplo, o processo COREX elimina a necessidade da recuperação de parte das emissões durante a produção de ferro gusa.

Segundo Wrona⁸⁸ não é razoável nem economicamente viável tentar aplicar o método de zero de resíduo em todos os processos de uma usina. Além de ser termodinamicamente e cineticamente impossível não produzir resíduo em todas as reações presentes. A solução proposta por Wrona⁸⁸ é selecionar alguns processos que apresentam maior potencial na geração de impacto e aplicar este método. Isto é feito a partir de uma busca para identificar e justificar economicamente as oportunidades para reduzir gerações ou produzir novas matérias-primas a partir de resíduos. São identificadas então, cinco características imprescindíveis ao sucesso deste método:

- ✓ Total comprometimento da direção da empresa.
- ✓ Multi-disciplinaridade dos componentes no grupo de trabalho.
- ✓ Identificação clara dos setores da empresa onde há oportunidades na área ambiental e econômica.
- ✓ Avaliação objetiva do processo.
- ✓ Melhoria continuada.

2.7 Aplicações da ACV

A ACV pode ser utilizada no aprimoramento do desempenho dos produtos e serviços, no que se refere ao meio ambiente, dando sustentação às reivindicações de rótulos de qualidade ambiental⁶¹.

Muito embora a ACV tenha sido desenvolvida para ser aplicada tanto em produtos como em processos, o que se verifica é um número limitado de casos de estudo de processos presentes na literatura, pelo menos de domínio público¹⁹.

Um exemplo da aplicação da ACV pode ser na solução dos problemas ambientais causados pelos produtos eletro-eletrônicos no pós-uso. O descarte destes equipamentos na Europa, por exemplo, é particularmente preocupante, representando 1% do resíduo sólido da Comunidade Européia e, aproximadamente, 4% do resíduo sólido municipal⁵⁹.

Dentre os objetivos perseguidos por aqueles que utilizam a ACV, destacam-se se a sustentação de tomada da decisão na indústria e na seleção de indicadores ambientais relevantes para a avaliação do desempenho, que influenciarão na elaboração do planejamento estratégico, projetos dos produtos, na medida em que traduzem o custo financeiro e ambiental dos produtos e dos processos estudados, aumentando a visão dos planejadores e dos estrategistas².

Da mesma forma, a ACV pode ser utilizada pelos governos como base para regulamentação ou para o financiamento de pesquisas e desenvolvimento, por apresentarem dados de extração dos recursos naturais, pelo uso de energia na produção de resíduos⁵⁷.

A ACV pode ser utilizada como ferramenta para a obtenção de certificados e na melhoria de projetos¹². O Selo Verde se utiliza dos princípios da ACV.

Pode-se utilizar a ACV durante a fase de desenvolvimento de um projeto. Se esta análise abranger todo o processo receberá a designação de Projeto para o Ciclo de Vida, se a ACV estudar apenas as matérias-primas envolvidas na produção será denominado Projeto para o Meio Ambiente (PMA).

2.7.1 Selo Verde

A rotulagem ambiental é a parte mais visível do uso dos conceitos da ACV¹². O selo verde é emitido em vários países e as noções relativas ao ciclo de vida são aplicadas para a concessão do selo⁴⁶. Isto representa um avanço no que diz respeito aos modelos que vinham sendo utilizados, pois o selo verde avalia o processo todo e não apenas uma única etapa do processo de manufatura, ou de uma única etapa do ciclo de vida, como nos casos dos rótulos por reciclagem.

Por razões comerciais, o selo verde começou a interessar a comunidade internacional no começo dos anos 80, quando os Estados Unidos decidiram iniciar um programa de rotulagem ambiental similar ao alemão e ao canadense⁵³. Foi criada uma organização independente sem fins lucrativos o Greenseal⁶, que tentava associar um meio ambiente mais limpo e saudável, pela identificação e promoção de produtos e serviços que

gerassem menos poluição e resíduos, e que ainda conservasse as fontes naturais, minimizasse o aquecimento global e evitasse a destruição da camada de ozônio.

O selo verde pode ser obtido por produtores, setores industriais de bens de consumo e por instituições governamentais. Os instrumentos que o selo verde gera são: certificação de produto, guia de compra, incluindo produtos recomendados, projetos especiais e avaliação de produtos e política de recomendação⁸.

O selo verde inclui^{8,46} programas voltados a governos, nos quais promove assistência técnica para todos os níveis do funcionalismo público no que diz respeito ao serviço de compras e no gerenciamento de recursos.

O selo verde também apresenta um programa voltado para o produto que visa desenvolver normas ambientais e conceder certificações para aqueles que alcançarem as metas⁴⁶.

Especificamente, esta certificação (selo verde) se utiliza dos critérios das normas ISO 14020 e 14024, que se referem à rotulagem ambiental⁷.

O selo é concedido após o produto ser avaliado, porém o consumidor nem sempre tem acesso aos dados e as informações que validaram o produto. Para minimizar esse problema e aumentar a quantidade e a qualidade de informações, a Holanda aprimorou este sistema, de maneira a dar mais informações ao consumidor e ao mercado, segundo Curran¹² há uma expectativa de que a próxima geração de produtos que receberem o selo verde trará em suas etiquetas cinco indicadores ambientais. Estes

indicadores são: energia, resíduo, emissão, recursos e impacto, que devem aparecer com uma descrição simplificada.

Na Figura 11 pode-se observar os logotipos de alguns dos países que emitem o selo verde.

A ABNT, com o apoio do Ministério da Ciência e Tecnologia, elaborou o *selo ABNT- Qualidade ambiental*⁴⁶, que identifica os produtos menos agressivos ao meio ambiente. A partir deste programa foram desenvolvido três tipos de rotulagem ambiental⁴⁵:

- **tipo I** – é a classificação para o selo verde, indica que este produto é ambientalmente preferível, utiliza técnica de análise baseada na ACV para obtenção do certificado.
- **tipo II** – é uma autodeclaração, feita pelo fabricante, como indicar que a embalagem do produto é reciclável.
- **tipo III** – neste caso são apresentadas informações ambientais sobre o processo de fabricação e, o estudo é conduzido por uma terceira parte, a técnica para a avaliação dos impactos ambientais é totalmente baseada na ACV, o certificado obtido é o Rótulo.



Figura 11 – Selo verde de diferentes países^{7,47}.

2.7.2 ACV aplicada a Projetos

Segundo Keoleian¹¹⁸, a utilização conjunta da ACV como ferramenta em projetos iniciará um novo campo de estudo.

A ACV aplicada a um projeto oferece uma oportunidade para reduzir a responsabilidade ambiental associada a produtos e processos, uma vez que visa o desenvolvimento sustentável. As decisões que envolvam a seleção de materiais, o tempo de vida útil do produto, os sistemas de empacotamento, os

processos produtivos e as estratégias para assistência técnica servem como dados para levantar o perfil de um produto²⁴.

Dois modelos propostos que se utilizam da ACV durante a elaboração do projeto são: o Projeto para o Ciclo de Vida e o Projeto para o Meio Ambiente

Uma das ramificações mais complexas, de amplas conseqüências e de efeitos a longo prazo da ACV é a implementação de um Projeto para o Ciclo de Vida^{119,120}, na medida em que envolve a análise de todas as etapas do processo produtivo.

As considerações tradicionalmente feitas para os produtos, tais como, desempenho, custos de manufatura, confiabilidade, precisam ser balanceadas com os objetivos ambientais como a minimização do uso de recursos naturais, aumento na eficiência energética e potencial de reciclagem, e os gerenciamentos de riscos associados aos danos ao meio ambiente. Uma falha pode resultar em perda dos recursos, com conseqüente diminuição da biodiversidade, piorando a qualidade do ar e da água, além da perda de materiais recicláveis¹¹⁹.

A Figura 12 apresenta um fluxograma representativo da Análise para o Meio Ambiente. O processo se inicia na ACV que envolve a aquisição de dados referentes a matérias-primas, a manufatura, a recuperação, ao reuso e reciclagem e ao transporte entre cada etapa. São avaliadas as emissões e a geração de resíduos. Faz-se a análise dos impactos promovidos pelo processo. São analisados o consumo de matéria-prima e quais as ações relativas ao controle da poluição. Neste ponto são analisadas a legislação

vigente e a conduta em relação ao meio ambiente da empresa. Essas informações são confrontadas com o conceito do produto e as estratégias são propostas.

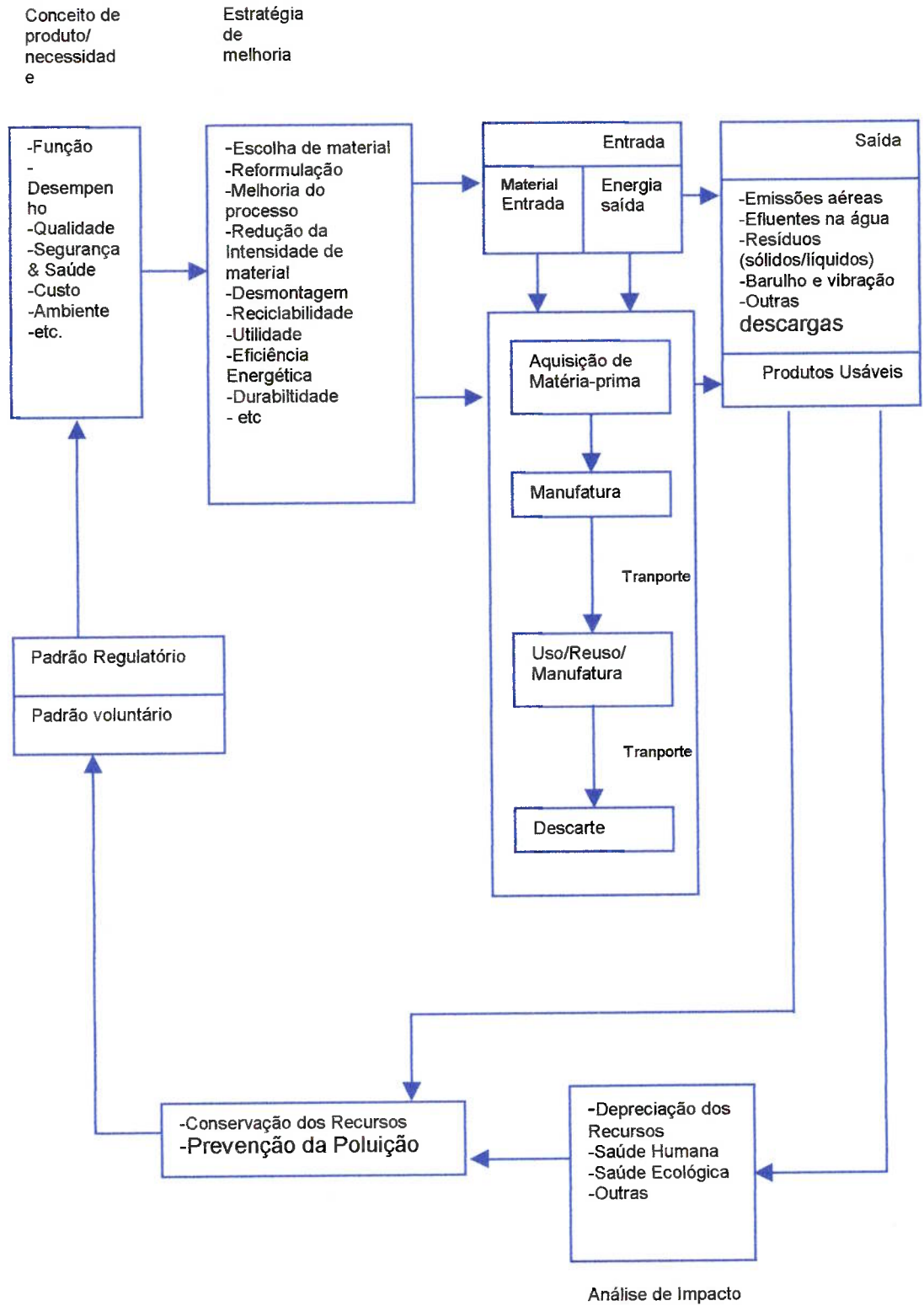


Figura 12 – Fluxograma da Análise para o Meio Ambiente

Uma das variações possíveis do Projeto para o Ciclo de Vida é o de restringir o campo de estudo especificamente para a seleção de materiais. Esta técnica denomina-se PMA¹².

Embora menos abrangente, o PMA também tem como objetivo fornecer aos projetistas as informações necessárias ao refinamento do processo produtivo, visando um produto final condizente com as exigências das normas ambientais¹²⁰.

A relevância do PMA fica evidenciada quando comparada com outros projetos que se especializam em determinados fatores ambientais, tais como a redução das emissões ou a reciclagem. Isto decorre do fato de que os projetos que estão orientados para a diminuição de um único impacto ambiental podem gerar outros impactos ao longo da cadeia produtiva¹²⁰. Keoleian¹¹⁸ cita como exemplo, um projeto cujo objetivo no campo ambiental seja a reciclagem, e que, devido a alterações na sua produção para atender a essa meta, acaba gerando outras emissões.

O PMA utiliza além do critério ambiental, as diretrizes usuais de desempenho, custo, cultura, legal e técnicos, incluindo considerações ambientais para definir a função e a especificação para os produtos¹². Ao se levar em conta as preocupações ambientais na elaboração dos projetos, segundo a óptica da seleção dos materiais constata-se que estes serão fundamentalmente diferentes dos processos convencionais¹¹⁸. Isso porque, enquanto as propriedades de um material, como densidade, resistência, condutividades elétrica e térmica são intrínsecas, as características

ambientais são extrínsecas e são definidas pelo histórico do processamento, da geografia e pelas práticas de gerenciamento¹¹⁹.

Na Figura 13 podem ser vistas, esquematicamente, as características do PMA. A partir da ACV das matérias-primas são analisados os impactos ambientais. Os impactos são analisados e confrontados com a legislação vigente. Os custos associados a essas mudanças e modificações são propostas ao processo. O conceito do produto é refeito e as melhorias associadas a essas mudanças são feitas.

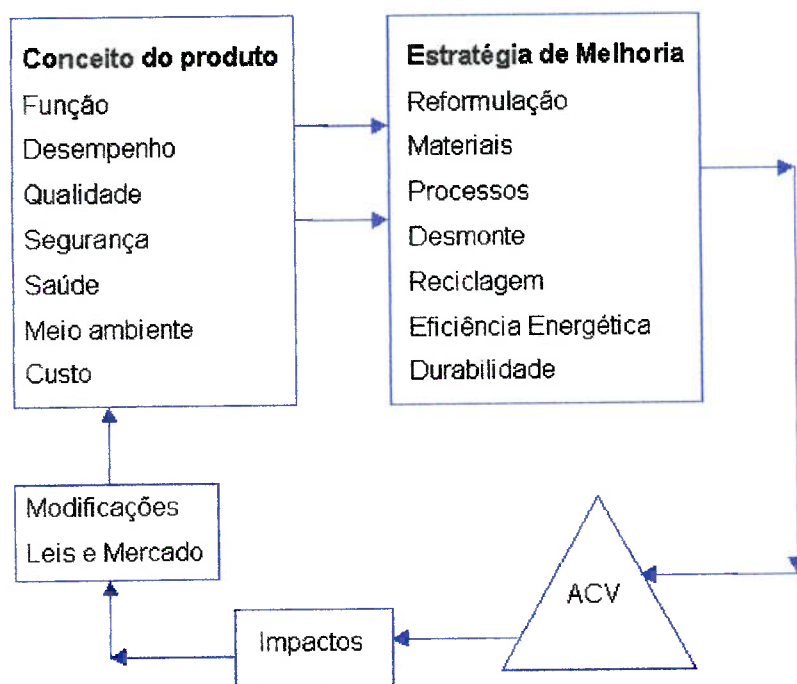


Figura 13 – Inter-relação da ACV e o do PMA⁹.

Um exemplo da necessidade da implementação do PMA pode ser verificado, segundo Mildemberger e Khare¹⁰⁴, para o caso dos automóveis. No estudo realizado, destacou-se o fato de que o produto da empresa possui um ciclo de vida excessivamente longo, de cerca de vinte e cinco anos, considerado desde a elaboração do projeto até seu descarte final. Por este

motivo, o projeto de um automóvel que se inicia hoje necessita, segundo os autores, analisar os futuros impactos ambientais criados, e a ferramenta sugerida é o PMA.

Por ser uma técnica que pode ser aplicada a todos os processos produtivos, acredita-se que a utilização da ACV nos casos dos “projetos verdes” deva se tornar o modelo dominante¹⁰⁷.

2.8 Casos e Limitações da ACV

A ACV é um instrumento para o estudo dos impactos ambientais que pode ser aplicada a todos os processos produtivos. A escolha do tipo do processo, a seleção das matérias-primas e dos insumos, a técnica escolhida para a coleta dos dados e a definição dos impactos é feita caso a caso¹².

Esta abrangência promove uma facilidade para utilização da ACV. Por outro lado, dificulta a comparação entre os estudos efetuados. O UNEP e o SETAC na tentativa de melhorar a comparação e unificar os trabalhos da ACV encomendaram um estudo⁵⁰ que visava, entre outros objetivos, classificar os impactos ambientais pela ordem de importância.

2.8.1 Casos de aplicações de ACV

Alguns dos exemplos recentes da aplicação da ACV em decisões de corporações incluem os ciclos de vida dos produtos químicos^{55,92-96}, de energia^{61,97-102}, do transporte¹⁰³⁻¹⁰⁸, nuclear¹⁰⁷, dos metais¹⁰⁸⁻¹¹² e da água^{113,114}.

Estes estudos têm destinado as suas conclusões como base para o desenvolvimento do planejamento estratégico na área ambiental, otimização do processo, do produto e inovações; a identificação de oportunidades para melhorias na área ambiental; e a criação de uma estrutura, ainda que incipiente, para auditoria ambiental.

Quatro casos serão apresentados como exemplos da aplicação da ACV.

Furuhold¹¹⁵ realizou uma ACV de maneira a comparar a produção de três tipos de combustíveis: a gasolina comum, a gasolina aditivada e o diesel. Este estudo quantificou as emissões e o consumo da energia ao longo da cadeia produtiva e analisou os impactos ambientais em potencial. As conclusões foram que os combustíveis estudados utilizam entre 5 e 15% da sua própria energia para serem produzidos. A produção do diesel promove menor impacto ambiental do que as gasolinas estudadas.

Dennison e colaboradores¹¹⁶ conduziram uma ACV, a respeito da manutenção de tubos para água potável no Reino Unido. A razão que motivou esse estudo foi a decisão das companhias de água em aprimorar o antigo critério, que se baseava na avaliação logística (trocava primeiro aquele que estivesse mais perto) e no critério de custo, pela ACV, de forma a abranger os aspectos econômicos e ambientais para a tomada de decisão na hora da escolha do material para reparos e substituições. As conclusões deste estudo foram: a recuperação e a reciclagem de tubos, válvulas e conexões descartadas durante os reparos e a reutilização dos sistemas que foram abandonados é possível e diminuirá as emissões.

Rafaschieri e colaboradores¹¹⁷ conduziram uma ACV de maneira a comparar a geração de energia por queima de combustível fóssil e por queima de biomassa. A principal conclusão deste estudo foi que os maiores impactos ambientais relacionados a biomassa são a utilização de defensivos agrícolas e de fertilizantes.

Schweimer & Schuckert¹⁰³ realizaram o inventário de um automóvel com o objetivo de avaliar a energia total gasta durante a produção e ao longo da vida útil.

O inventário foi calculado a partir da soma dos valores de grandes lotes produzidos, sem a especificação desses números, e levando-se em consideração que alguns dos dados utilizados eram obsoletos.

O que se destaca neste trabalho, é a utilização dos valores para o inventário provenientes de lotes de produtos e não de um produto individualmente. Esta técnica, embora mascare certas conclusões acerca dos dados específicos, permite uma análise ampla do processo produtivo, sem divulgar especificidades sigilosas e, portanto, protegendo o segredo industrial. Tratam-se de dados que não refletem a individualidade de um automóvel somente, mas que dão ao aplicador uma clara noção dos aspectos ambientais¹⁰³.

Um dos resultados apontados pelos autores¹⁰³ destacou que do total da energia gasta ao longo da vida de um carro, esta considerada desde a extração, a produção do veículo, a produção de combustível e o consumo durante 150.000 km de vida, está, aproximadamente, assim distribuído: 10%

é gasto para produzi-lo, 10% para a extração, beneficiamento e transporte do combustível, e 80% durante a vida útil do automóvel.

Os casos apresentados mostram as inúmeras possibilidades de uso e aplicação da ACV, mas que partem de condições iniciais, como objetivo e impactos escolhidos, particulares. Esse fato viabiliza, por um lado, a ampla utilização para qualquer processo ou produto, mas, por outro, dificulta a sistematização das informações, diante da ausência de padronização da ACV.

2.8.2 Limitações da ACV

Devido à necessidade de tornar a ACV uma ferramenta de uso mundial, foram conduzidas três pesquisas entre diversos setores^{50,64} a fim de verificar quais são os impactos considerados mais relevantes em um eventual estudo e, assim, buscar uniformizá-los.

A uniformização dos impactos ambientais apresenta importância, pois se diferentes impactos são selecionados, diferentes relatórios finais de ACV serão elaborados, o que dificultará futuras comparações⁵⁰.

Os representantes acadêmicos de países menos desenvolvidos que participaram da pesquisa, provenientes da América Latina, da África, da Ásia e do Caribe, apresentaram preocupações semelhantes no que se refere a impactos.

Na Tabela 20 pode-se observar o resumo das conclusões desse estudo⁵⁰. Há certa uniformidade nas escolhas dos impactos entre os países

menos desenvolvidos, apresentados na segunda coluna. Este comportamento não se repete em relação aos países mais desenvolvidos, dispostos na terceira coluna. Há variação em relação aos impactos escolhidos. Na Tabela 20, pode-se observar que para os países menos desenvolvidos a salinização é o impacto mais importante.

A escolha do impacto a ser estudado em uma ACV direciona o trabalho. Se uma mesma empresa tivesse duas filiais, uma em um país menos desenvolvido e outra em um mais desenvolvido, a empresa situada no país menos desenvolvidos buscaria analisar a salinização, impacto de maior relevância. Aquela presente no país mais desenvolvido iria selecionar como impacto a foto-oxidação. Os inventários de cada uma dessas ACVs iriam buscar coletar valores que avaliassem esses impactos. E cada uma das ACVs apresentaria resultados e conclusões diferentes.

Tabela 20 - Importância relativa dos impactos segundo o grau de desenvolvimento dos países⁵⁰.

Impactos	Países menos desenvolvido (%)	Países mais desenvolvidos (%)
Salinização	82	40
Erosão	65	34
Segurança	41	18
Destruição do solo	59	38
Extração de recursos da biota	53	37
Perda de habitat a partir de ações deliberadas	71	54
Foto-oxidação	56	74
Saúde do trabalhador	65	32

A segunda pesquisa foi realizada com os representantes das empresas, agrupados por área de atuação.

Houve maior homogeneidade de respostas com maior interesse pela extração mineral. Na Tabela 21 pode-se observar, de maneira resumida, o resultado desta pesquisa⁵⁰. Isso pode indicar que as empresas apresentam conhecimento sobre os impactos produzidos.

Uma terceira pesquisa foi conduzida e os participantes foram questionados sobre as suas necessidades regionais.

O resultado deste trabalho apresentou diferenças no que diz respeito à prioridade dos impactos. Os resultados dessa pesquisa podem ser vistos na Tabela 22.

Os autores destas pesquisas concluíram que cada indicador que foi relacionado regionalmente deve ser adaptado para que possa ser utilizado em outras áreas do globo, de tal forma que um grupo geral de maior importância de indicadores deva ser estabelecido, o que sugere a utilização de tabelas de conversão⁵⁰.

Observa-se pelos resultados das pesquisas, Tabelas 20, 21 e 22, que a unificação na escolha dos impactos ambientais será uma tarefa difícil de ser concretizada, uma vez que a necessidade regional ou da companhia prevalece sobre o interesse global.

Tabela 21 - Necessidades Industriais⁵⁰.

Setor Industrial	Indicadores adicionais	Comentários
Mineração, processamento de minerais e refino de metais	Uso da água (indicado enfaticamente), uso da terra, salinização, geração de resíduo sólido e perda da biodiversidade.	A definição de uma categoria só para resíduo sólido é uma mudança; o esgotamento dos recursos não foi articulado de maneira correta; ecotoxicidade seria relacionada com a biodiversidade e não a duração do evento.
Produtores de pesticidas	Nenhum em especial	Só foram relacionadas categorias de impacto que são relacionadas com os efeitos da produção. Houve pouco interesse na busca de novas avaliações aos impactos do produto.
Indústrias de tecnologia avançada	Nenhum em especial	Os modelos existentes são facilmente adaptados às necessidades.
Energia	Nenhum em especial	A avaliação/análise de impactos disponível para o setor de energia não cobertos pela ACV agora são principalmente quantificados em termos de econômicos.
Eletrônicos	Reciclagem de sucata eletrônica	Nenhum em especial
Gerenciamento de Resíduo	Volume de resíduo sólido, discriminado em tóxico, não tóxico, radioativo, etc	Nenhum em especial

Tabela 22 - Necessidades Regionais⁵⁰.

Região do mundo	Indicador Exigido	Comentários adicionais
África	Contaminação do lençol freático, mudança no uso do solo, desertificação, uso de pesticidas e de fertilizantes, água como recurso renovável, intensificação das safras, assentamento ilegal; a água é a chave e frequentemente é o fator limitante. O uso da água necessita ser ponderado utilizando indicadores como: diminuição dos aquíferos, diminuição da capacidade de represamento, redução das fontes possíveis de água, salinização e perda da biodiversidade.	Os indicadores sociais são críticos para o desenvolvimento dos países, embora possam ser analisados a partir do inventário.
Ásia e Pacífico	Fontes e reuso da água, eutrofização, acidificação, uso da terra, ecotoxicidade, na realidade todas as categorias de impacto devem ser avaliadas local e regionalmente.	O indicador do desenvolvimento deve ser dinâmico; a população apresenta condições socio-econômicas diferentes e que devem ser levadas em conta.
Europa	Biodiversidade, por exemplo, na agricultura. Não é levada em conta a importância da fauna auxiliar, uso da água, a água como reserva natural. Proteção dos combustíveis.	A utilização da terra é uma categoria importante que requer estudos importantes na Europa.

Tabela 22 - Necessidades Regionais⁵⁰ (continuação).

Região do mundo	Indicador Exigido	Comentários adicionais
América Latina e Caribe	Pobreza; qualidade de vida nas cidades; transportes; ecossistemas existindo em condições extremas; por exemplo na região norte do Chile, onde a concentração natural de arsênico na água e no solo são altas o suficiente para serem consideradas tóxicas em qualquer parte do mundo (antes mesmo da atividade de mineração ou outras atividades humanas)	Uma categoria de impacto direcionada exclusivamente a destruição das florestas
América do Norte	Disfunção das Glândulas endócrinas	Indicadores que foram adaptados para o uso local.

2.9 Comparação da ACV com outros Métodos de Análise

A ACV se diferencia das outras técnicas de análise ambiental principalmente pela intenção e pelo escopo do próprio processo, requisito da norma ISO 14040⁴³.

As principais características da ACV e de como estas podem ser comparadas com outros métodos foram reunidas por Newell¹⁸ e Burgess e Brennan⁵⁵. Na Tabela 23, pode-se observar os resultados destes trabalhos de forma resumida.

A ACV não é recomendada para a escolha do melhor local para instalar uma empresa, por exemplo, então outros métodos de análise

ambiental devem ser utilizados¹³. A quinta coluna da Tabela 23 mostra que a ACV não se utiliza de dados referentes ao espaço e ao tempo.

Por outro lado, a ACV pode propor melhorias no processo estudado se diferenciando das outras técnicas de análise.

Como exemplo de uma das análises mostradas na Tabela 23, há a modelo de Análise de Risco, apresentado por Cirone e Duncan¹²², que define o risco como uma função do perigo e da exposição.

Tabela 23 - Comparação entre os métodos de análise^{14,55}.

Método	Objeto do Estudo	do Proposta	Elementos Básicos	Especificações Espacial e Temporal
ACV	Todos os processos envolvidos no ciclo de vida.	Melhorias no projeto, diminuição das emissões.	Balanço de massa, análise de impacto, avaliação.	Não
Análise de Impacto Ambiental	Etapa da vida do produto especificada.	Escolha do local da empresa, emissões permitidas.	Altamente variável.	Sim
Análise de Risco	Etapa da vida do produto especificada.	Redução dos riscos aos trabalhadores e à comunidade.	Destruição de florestas ou outras categorias de eventos para avaliar a probabilidade de impactos.	Sim
Método do Fluxo de Substâncias	Fluxo de substâncias em uma região (como o ciclo do nitrogênio).	Entendimento da indústria para políticas ecológicas.	Balanço de massa, modelos de transporte, monitoramento da concentração	Contornos definidos pelo usuário.

Tabela 23 - Comparação entre os métodos de análise^{14,55} (continuação).

Método	Objeto do Estudo	do Proposta	Elementos Básicos	Especificações Espacial e Temporal
Análise da melhor opção ambientalmente praticável	Emissão de poluentes no ar, geração de resíduos na terra e efluentes na água com um valor para cada impacto de cada poluente.	Estabelece um critério de custos anuais versus índices ambientais.	Balanço de massa .	Sim
Análise de custo-benefício	Cada perda ambiental é associada a um valor econômico.	Associa de maneira segura valores em dólares para impactos a partir de graus de emissão.	Externalidades como degradação das construções, perda da vida marinha.	Não

Na Figura 14 pode-se observar uma representação esquemática desse modelo. O paradigma da análise de risco, apresenta a seguinte seqüência de eventos, descrita de forma resumida, para a sua realização: diante da possibilidade de ocorrência do risco ou, a partir da identificação do perigo, faz-se a análise da resposta a uma dose, referente a esse perigo, de forma a caracterizá-lo. Por outro lado, se já ocorreu o perigo e se houve exposição, exige-se a caracterização do risco.

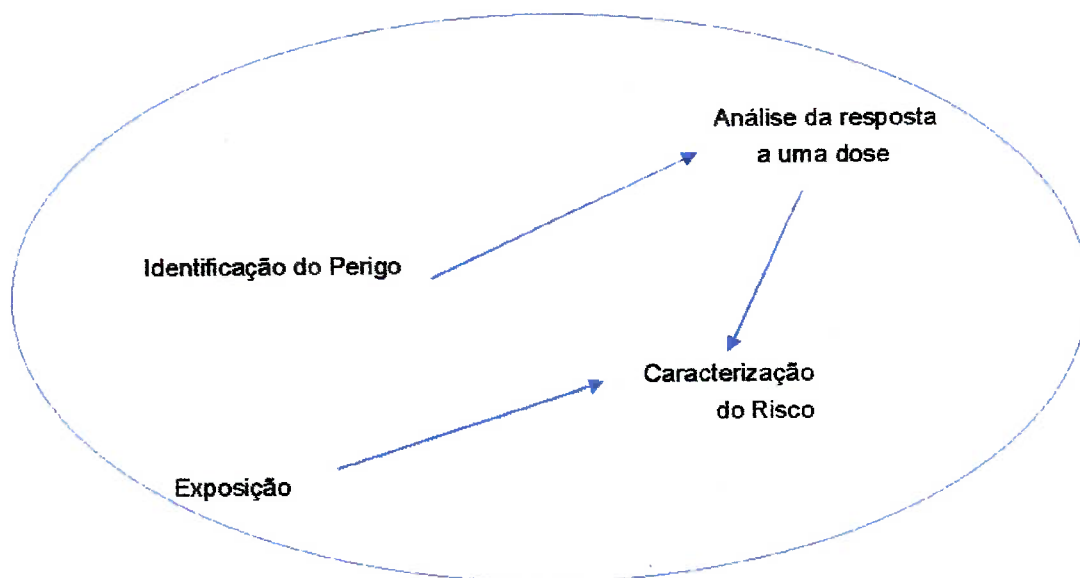


Figura 14 - Paradigma da Análise de Risco¹²³.

2.9.1 A ACV e as Áreas Tecnológica, Ambiental e Social

Há uma outra abordagem em relação a ACV, que a associa a três partes, sistemas ou áreas funcionais: a área tecnológica, a área ambiental e a área social¹².

A área tecnológica é provavelmente a mais facilmente reconhecida a partir do inventário, podendo ser conceituada como a sistematização dos dados de energia, matérias-primas, processos produtivos e níveis de poluição dentro da legislação vigente.

A área ambiental, por sua vez, situa-se entre o inventário e a análise; destina-se a analisar os impactos no meio ambiente decorrentes das emissões e dos resíduos e dos efluentes¹².

Por fim, a área social é geralmente qualitativa, na medida em que determina os efeitos provocados por um produto a saúde pública, e quantitativa quando se verificam os danos na infra-estrutura. Nota-se que os casos de danos à saúde pública são os mais difíceis de serem estimados, uma vez que não há uma unidade padronizada para medir a saúde, ao passo que os danos à infra-estrutura são economicamente quantificáveis¹².

Na Figura 15 pode-se observar a inter-relação entre esses três sistemas funcionais e a ACV.

A área tecnológica gera impactos no meio por extrair recursos naturais e por gerar emissões e resíduos, esta etapa é facilmente quantificável nos inventários. Já o efeito desta área sobre a sociedade pode ser alterado por pressão de grupos ou legislação, a seta de duas pontas indica essa interação. A área social se relaciona com o meio e é, também, afetado por ele¹².

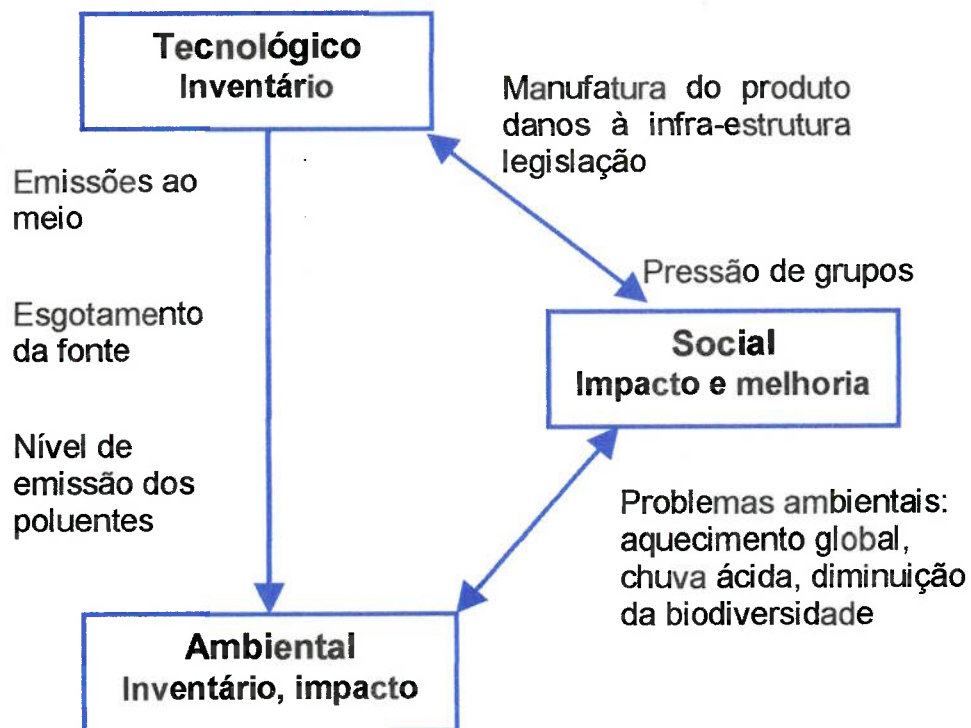


Figura 15 - Interação entre os três sistemas funcionais da ACV¹².

2.10 Banco de Dados

A falta de valores para comparação entre os estudos é um dos maiores obstáculos em um estudo da ACV. De maneira a reduzir esse problema algumas fontes já foram desenvolvidas para auxiliar os usuários da ACV. Na Tabela 24, podem ser observadas algumas delas⁵³.

A exemplo disto, Curran¹² traz uma extensa lista de instituições que conduziram ou que ainda estão desenvolvendo uma ACV, indicando, a categoria alvo do estudo, se esta se refere ao produto ou ao processo, e qual o órgão, a instituição ou a pessoa que chefia o projeto.

Burgess e Brennan⁵⁵ apresentam uma lista de trabalhos de ACV relativos a processos químicos.

Considerando-se as particularidades energéticas, de insumos e de transportes regionais, seria mais efetivo se cada região desenvolvesse seu próprio banco de dados de maneira a otimizarotimizando a realização das ACVs¹²⁵.

Tabela 24 – Listagem de bancos de dados para ACV⁵³.

Fonte	Custo	A Favor	Contra
Norma internacional ISO 14040 - 14043	Baixo		Ainda obscuro em metodologia
Relatório “how to” das normas internacionais ISO 14047 e 14049	Baixo	São bons exemplos	Todos os projetos são muito específicos, pode não ser útil para um estudo genérico de inventário
ISO 14048 para documentação	Gratuito	Documentação detalhada da norma	Muito difícil para entender- melhor se for incorporado a um programa de computador
Guia Internacional de normas CML	Gratuito na web- caro para comprar	Recente- detalhado e baseado em normas	Não está claro a respeito do desenvolvimento de dados genéricos
Artigos e anais de congressos	Relativo	Grande diversidade de trabalhos	Difícil de encontrar, trabalhos em várias áreas. Ainda há contradições nos resultados
Teses relacionadas a inventários de ACV	Relativo	Diversidade de trabalhos	
Guia de análise de entradas e saídas (Input Output) da ONU	Relativo	Texto básico bom	Complexo para não iniciados em ACV
Base de dados da web como US EPA LCA	gratuito	Fonte de informação acessível	Confiança relativa

2.11 ACV Conduzida de forma Seqüencial e Cumulativa para materiais e Produtos

A ACV está se tornando uma ferramenta comum para relacionar os efeitos da produção com o meio. Até o presente momento, a metodologia para uma ACV determinada pela ISO não está completa^{38,53}.

Como princípio básico, um estudo de ACV deve cobrir completamente o ciclo de vida de um produto. Entretanto, é fácil perceber a dificuldade de se cumprir tal objetivo. Assim, um estudo de ACV somente pode ser conduzido de maneira seqüencial e cumulativa.

Partindo desta premissa, Xiao e colaboradores¹²⁶ propuseram o conceito de Análise de Ciclo de Vida Integral (ACVI) – *Whole Life Cycle Assessment*.

O estudo do ciclo de vida de um produto é a coleção dos processos, que incluem várias unidades funcionais, como a extração das matérias primas, o beneficiamento, o processamento, o transporte, o uso e o descarte. Todo o consumo de recursos naturais ocorridos nestes processos e todos os impactos ambientais compõem a ACV¹²⁷.

De uma forma geral esses processos ocorrem em lugares diferentes e em indústrias pertencentes a diferentes corporações. Por esta razão, a viabilização da implantação da ACV somente ocorre quando esta é aplicada de maneira seqüencial e cumulativa, o que significa dizer que cada indústria analisaria individualmente o seu próprio processo, que representaria uma parte do ciclo total¹²⁶.

Neste processo de análise, dois aspectos devem ser considerados:

(i) um quando um mesmo material é utilizado em vários processos, e

(ii) quando vários materiais são utilizados em um mesmo processo.

A soma de todas as ACVs dos processos, caso (i), perfaz a ACV integral (ACVI). Na Figura 16, pode-se observar uma representação desta análise. Os diversos processos i são analisados separadamente, para cada processo faz-se a ACV, denominada Análise do Ciclo de Vida do Processo (ACVP).

No caso (ii), faz-se o acompanhamento dos vários materiais, e faz-se a ACV do material (ACVM). A Figura 17 ilustra essas representações.

(a) Um tipo de material é utilizado em diferentes produtos

(b) um tipo de produto é formado por vários materiais¹²⁷.

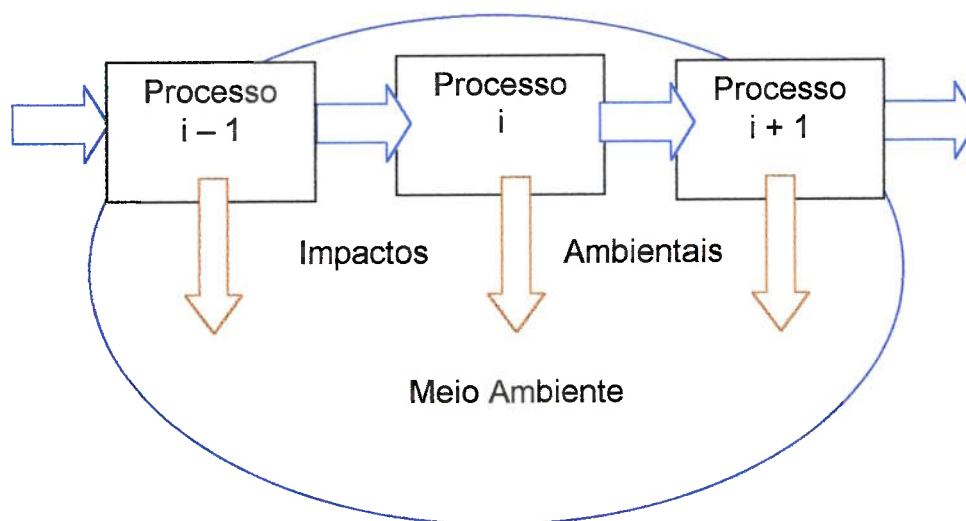


Figura 16 - Ciclo de Vida baseado no processo (ACVP)¹²⁶.

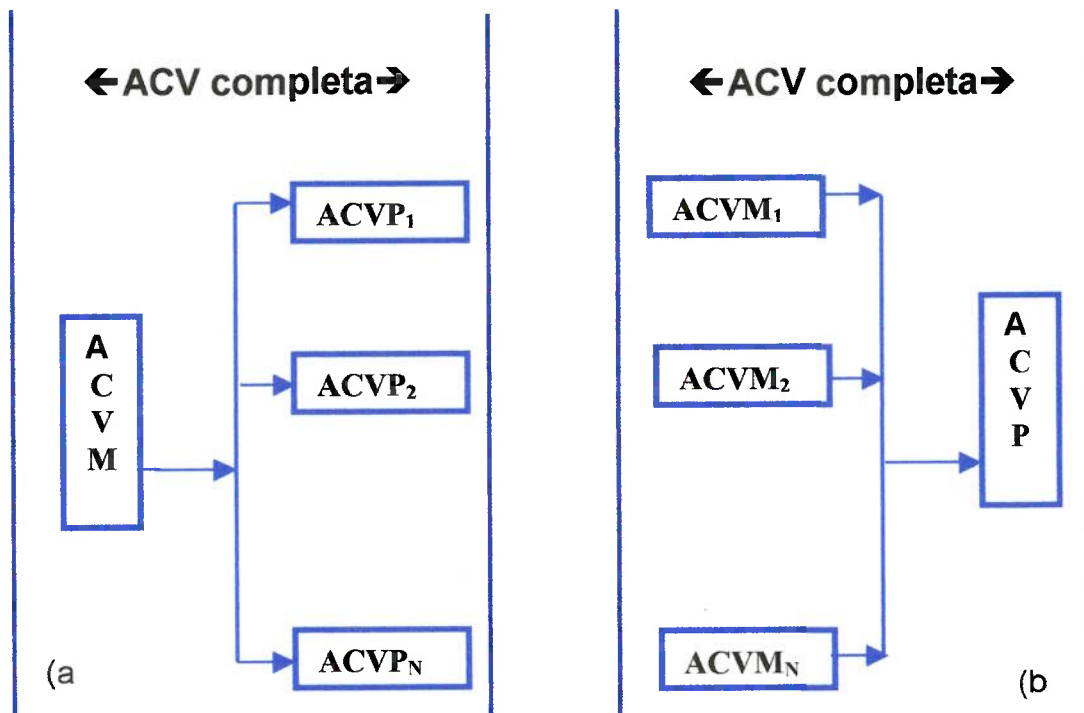


Figura 17 – A ACV dividida em etapas relativamente a processos e matérias-primas:

Na análise seqüencial e cumulativa dos ciclos de vida deve ser levada em conta a equação representativa desta proposta¹²⁵, que é a soma da ACV dos produtos e dos materiais para produzir a ACV Integral (ACVI) :

$$ACVP + ACVM = ACVI$$

2.12 O Aço e a Análise do Ciclo de Vida

O foco da política ambiental da indústria do aço, atualmente, é criar uma relação entre o aço e o desenvolvimento sustentável⁸⁰.

O fato do aço poder ser reutilizado para produzir novos produtos criou uma indústria importante e economicamente estável.

O fato do circuito do aço estar bem estabelecido explica o interesse da indústria do aço em utilizar as técnicas da ACV como uma ferramenta de gerenciamento ambiental^{128,129}.

O interesse das indústrias do aço por maiores e melhores informações sobre os impactos da produção do aço primário e secundário ao redor do mundo compeliu a IISI a criar um banco de dados sobre o aço¹³¹. Este banco de dados foi construído após um inventário realizado por 34 siderúrgicas de diversos países entre os anos de 1994 e 1995¹³¹. No Brasil este estudo foi realizado pelo Grupo Villares e pela Usiminas¹³².

As metas deste projeto foram criar uma metodologia para o de Inventário para os produtos feitos de aço, produzir um banco de dados para as empresas fabricantes e auxiliar na criação de metas e na melhoria dos programas ambientais⁸⁰.

A produção mundial de aço é de $800 \cdot 10^6$ t / ano e quase a metade desse valor provem da sucata¹³⁰. No Brasil, as siderúrgicas consumiram em 2003, $7,3 \cdot 10^6$ t de sucata, o que corresponde a 25% da produção nacional de aço bruto¹³⁰.

O aço é o material mais reciclado no mundo¹³². A cada ano há um crescimento de 400 milhões de toneladas de sucata. Desta, aproximadamente, 140 milhões de toneladas é oriunda de sucata circulante (sucata gerada em siderúrgicas não integradas), aproximadamente 90 milhões provem de operações de manufatura e 190 milhões de sucata proveniente de produtos no final de vida útil¹³². Na Tabela 25 pode-se observar a evolução dos valores e a distribuição por tipo de sucata.

Tabela 25 - Divisão da sucata segundo a sua proveniência¹³².

Ano	Tonelagem (Mt)	Divisão da sucata (%)		
		Interna	Processada	Obsolescência
1985	397,7	38,8	19,7	41,5
1986	398,9	37,7	20,1	42,2
1987	409,5	36,5	20,3	43,2
1988	437,6	35,8	20,3	43,9
1989	437,3	33,7	20,2	46,1
1990	419,9	34,4	20,8	44,8

A maior parte destas 400 Mt de sucata reciclada é fundida em um FEA¹³².

A reciclagem da sucata de ferro e de aço diminui a extração de matérias-primas, 1 t sucata de aço equivale a 1,03 t de minério de ferro, 580 kg de carvão e 50 kg de calcário¹³³.

Nos Estados Unidos, a reciclagem do aço do ferro, em 1998, foi de 73 Mt, e a cada ano a reciclagem desses metais economiza a energia elétrica equivalente a um quinto das residências daquele país (aproximadamente 18 milhões de residências)¹³³. Aproximadamente 16.000 automóveis foram sucitados e isso representou 1/8 do total gerado¹³³.

A taxa de reciclagem para sucata de aço na Europa em 1993 estava entre 65 e 70 %. Sendo que, e o restante da sucata pode ser de difícil recuperação ou perdas por corrosão. Uma vez coletada a sucata, a taxa de recuperação é alta, como mostra a Tabela 26¹³¹.

Tabela 26 – Rendimento da recuperação de sucata de aço na Europa¹³¹.

Ano	Total de sucata consumida (Mt/ano)	Taxa de utilização da sucata (%)
1986	372,6	93,4
1987	362,0	88,4
1988	367,3	83,9
1989	386,0	88,3
1990	388,5	92,5

A Tabela 27 apresenta os valores de produção de aço para o ano de 2002. Nesta Tabela observa-se que a China é o maior produtor mundial de aço e o Brasil é o 8º maior produtor.

Tabela 27- Produção de aço estimada no mundo em 2002¹³³.

País/Região	Produção de aço (Mt)
China	170
Japão	106
Comunidade Européia	161
Estados Unidos	90
Rússia	57,8
Coréia do Sul	44
Ucrânia	33,5
Brasil	27
Outros países	180
Total	830

Usinas siderúrgicas utilizam sucata em conversores, em FEA e em menor escala em alto-fornos. A proporção da sucata em conversores é limitada a 30%, enquanto que no FEA pode-se chegar a 100%. Nos Estados Unidos, os FEAs produzem cerca de 45,1% do aço e os conversores respondem por 54,9%⁹⁰.

A contribuição do FEA na produção de aço tem crescido a uma taxa de 4% ao ano e em 2010 deverá ser o primeiro processo de fusão de aço⁹⁰.

O aço é produzido, predominantemente, por dois modos: pela rota do alto forno e por forno elétrico a arco. O primeiro modo de produção a matéria-prima é a base de minério de ferro e apresenta porcentagens de sucata de aço acima de 25% e, a fabricação do aço é feita em conversores, sendo esse processo conduzido em usinas integradas. Ambos os caminhos podem apresentar fundição contínua para alimentar a laminação que pode ser laminação a quente ou a frio. Produtos planos são produzidos basicamente pela rota do alto forno e produtos extensos são feitos a partir dos dois caminhos. Produtos forjados são produzidos, basicamente, por FEA⁹⁰.

Em 1996, segundo relatório da IISI⁴⁸, a fundição de lingotes de aço representava 23 % da produção mundial de aço.

As etapas da produção de um aço forjado são: fusão a partir de sucata de aço, lingotamento, enformamento, transporte até a prensa e forjamento, estas últimas três etapas se repetem até que as dimensões externas estejam próximas as do tamanho final. A seguir ocorre o tratamento térmico, a usinagem (torneamento e retífica) para que as dimensões externas fiquem exatas, empacotamento e transporte até o cliente. A Figura 18 mostra o fluxograma desse processo. Esse processo é conduzido em uma usina siderúrgica secundária.

O estudo da ACV de peças forjadas de aço, produzidos em uma usina siderúrgica que utiliza como matéria prima aço recuperado, se encaixa neste contexto.

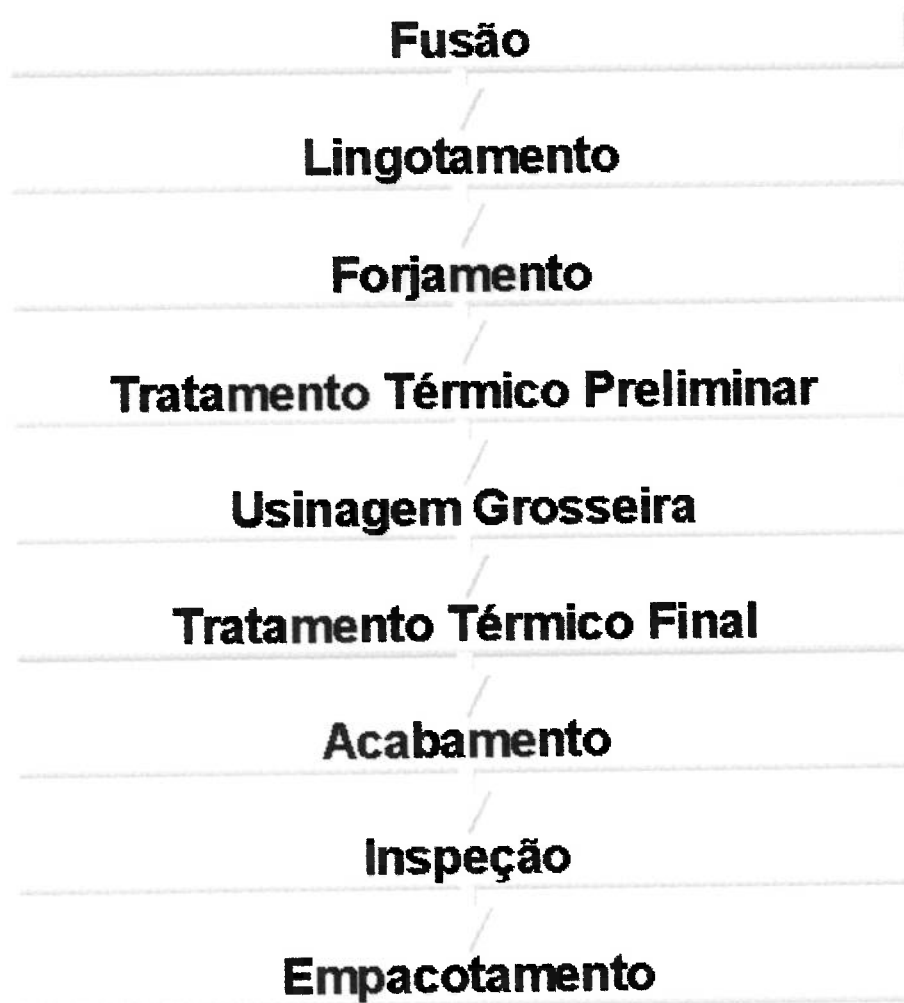


Figura 18 – Fluxograma do forjamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, o processo de análise de ciclo de vida foi conduzido em uma parte do processo de fabricação de aços forjados. A Figura 19 representa a parte do processo que foi estudada. Pode-se observar na Figura 19, (a) a matéria-prima das usinas secundárias (a sucata de ferro)¹³⁴, (b) a fusão¹³⁵, (c) o enformamento de vários esboços, (d) transporte por ponte rolante até a prensa e (e) o forjamento.

Após ser deformado, o lingote recebe o nome de *esboço* ou *peça de metal em bruto*. Durante o processo de enformamento, transporte e deformação ocorre a oxidação do esboço. Essa oxidação recebe o nome de *carepa*. Na Figura 19 (c) pode-se observar a carepa entre o vagonete e as peças que vão ao forno e em (e) o desprendimento da superfície oxidada durante a deformação.

Neste trabalho será feita a ACV das fases compreendidas entre o fusão e a conformação mecânica.

De maneira a realizar a ACV conforme descrita no capítulo 2.4 a caracterização da metodologia ser[á feita no ítem 4.1.

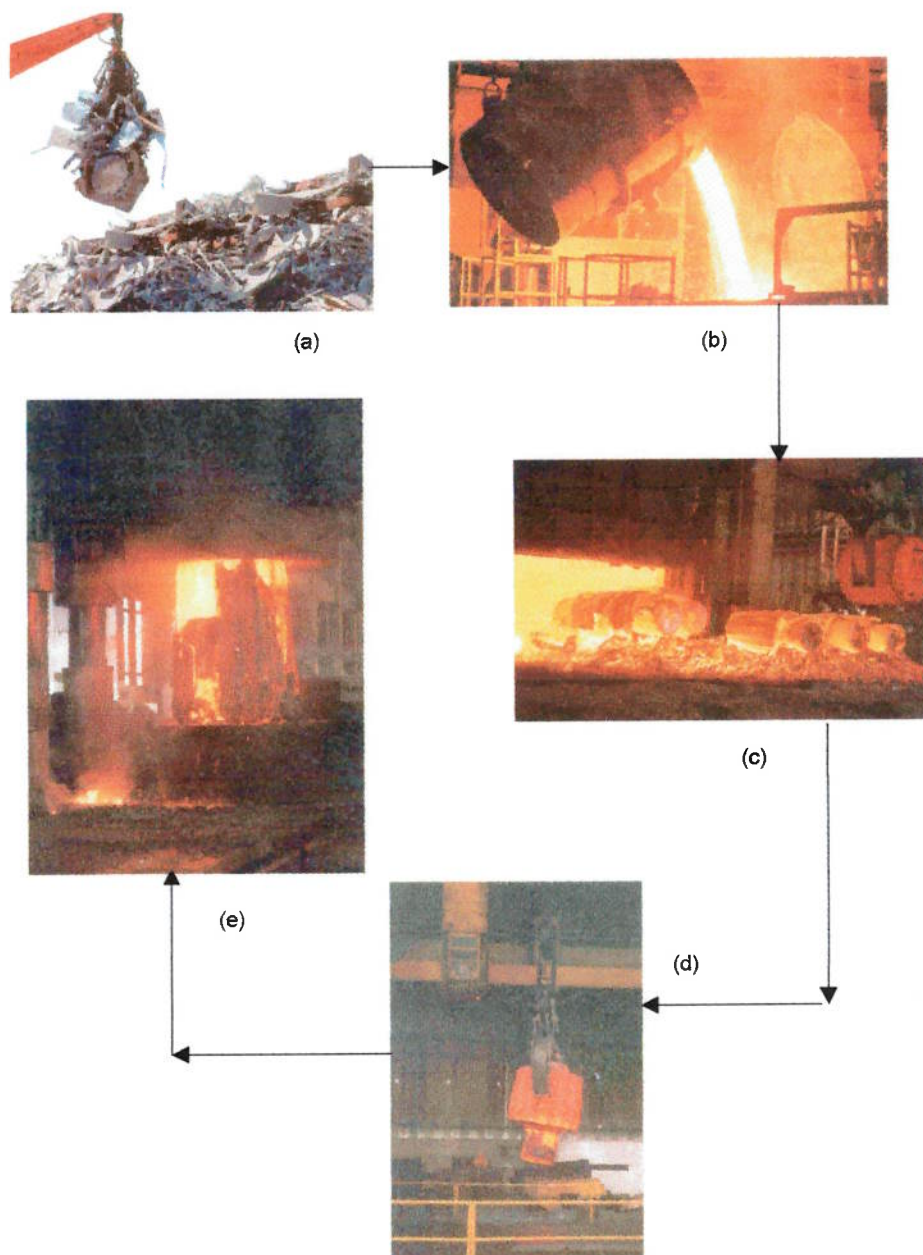


Figura 19 – Imagens ilustrativas das partes do processo estudado. (a) A sucata como matéria-prima¹³⁴; (b) A fusão e o vazamento¹³⁵; (c) o enformamento dos lingotes; (d) o transporte até a prensa; (e) deformação mecânica a quente.

3.1 A ACV cumulativa

Neste trabalho foi utilizada a proposta de Xiao e colaboradores¹²⁶ de forma a dividir o processo total da produção de uma peça forjada em etapas e conduzir a análise do ciclo de vida apenas nas etapas selecionadas, neste caso, entre a fusão e o forjamento. De maneira simplificada, a Figura 20 mostra algumas etapas da produção do aço forjado, em destaque as etapas da aciaria e da forjaria.

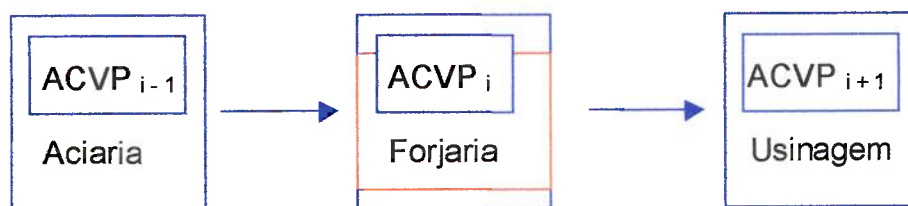


Figura 20 - Organograma esquemático de algumas etapas da produção de uma peça forjada.

3.2 Valores apresentados

Os dados do inventário foram coletados ao longo de dois anos, em visitas semanais a uma usina siderúrgica.

O trabalho consistiu de duas etapas: a tomada de conhecimento do processo produtivo e a coleta de dados. A primeira etapa compreendeu

visitas aos diferentes prédios da usina e localidades responsáveis pela produção e/ou armazenamento. Assim, foram visitados:

- ✓ A aciaria para acompanhar a confecção do lingote.
- ✓ A subestação elétrica para entender como a energia é distribuída entre as diversas áreas na usina e como é feito o levantamento dos relatórios de consumo.
- ✓ Ao aterro para acompanhar o recebimento das cargas.
- ✓ A forjaria para ver o recebimento do lingote da aciaria, o enforamento, o transporte por ponte rolante até a prensa e o forjamento.

4. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DE AÇOS FORJADOS

Neste capítulo será descrita a ACV de aços forjados.

As etapas da ACV serão descritas, os dados e os geradores de tensão serão definidos, bem como a metodologia empregada na coleta e na apresentação dos valores. Será feita a Análise dos Impactos do processo de forjamento e a análise dos resultados. As etapas da ACV estudadas foram:

- ✓ Definição dos objetivos, do escopo e classificação dos dados.
- ✓ Inventário.
- ✓ Análise dos Impactos.
- ✓ Aperfeiçoamento da Análise.

4.1 Definição dos objetivos, do escopo e classificação dos dados

4.1.1 Objetivos

Os objetivos deste estudo são:

- ✓ avaliar as emissões geradas ao longo do processo, e
- ✓ observar possíveis melhorias do processo.

Os insumos e as características escolhidas para definir o processo de forjamento para este estudo foram: o consumo de gás, a massa de escória gerada, óleo consumido, o consumo de refratário, massa de carepa gerada, o pó da aciaria, a água industrial, o consumo de energia elétrica e os insumos para fusão.

O impacto principal definido foi o efeito estufa, devido a geração de CO₂ pelos fornos.

4.1.2 Escopo

O sistema estudado será a produção de peças de aço forjadas em uma usina não-integrada. A unidade utilizada será quantificada e normalizada para a produção de 1 t de aço forjado.

Os valores mostrados no inventário são médias de todas as peças de aço que foram produzidas na forjaria e não de um tipo específico de peça, em conduta semelhante a utilizada no trabalho conduzido por Schweimer e Schuckert¹⁰³.

Os dados foram coletados em períodos diferentes (ao longo de dois anos), e para se obter a média normalizada tomou-se a produção dos períodos correspondentes.

A forma de apresentação dos dados seguirá aquela proposta pelo trabalho da IISI⁴⁸. Este modelo foi o escolhido pois facilita a comparação com os valores médios mundiais do relatório da IISI e resguarda os segredos industriais.

Para a condução deste trabalho, os dados relativos ao consumo de matéria-prima e a geração de emissões e de resíduos foram recebidos na forma de planilhas e relatórios, emitidos pelos setores responsáveis da empresa.

Outras considerações adotadas foram:

- ✓ Análise sobre a evolução do produto ao longo dos últimos anos. O produto (peças forjadas) externamente, mantém-se basicamente o mesmo, houveram variações apenas na composição química.
- ✓ Avaliação do método de produção. O processo de forjamento consiste basicamente em deformação mecânica a quente. Este processo produtivo não varia significativamente de país para país.
- ✓ Os limites do sistema escolhido ficaram compreendidos entre a fusão no FEA e a conformação mecânica na prensa.
- ✓ As unidades definidas para o processo foram: FEA, forno de aquecimento e prensa.
- ✓ As hipóteses levantadas foram: a de que a combustão do gás no forno ocorre completamente, gerando água e dióxido de carbono e

que o gás natural não gera material particulado nem emissões de SO_x, conforme considerado no relatório da IISI⁴⁸. O material particulado que é gerado na forjaria que é, em parte, devido à volatilização dos elementos de liga presentes nos aços e também pela agitação do processo que gera gotículas que são carregadas pelos gases, e é considerado totalmente recolhido pelo sistema de exaustão.

4.1.3 Classificação dos dados

O inventário da ACV se inicia com a inclusão de todos os valores importantes de entrada e de saída para a produção de peças forjadas, para que, na próxima fase possam ser estudados os impactos. Assim, os dados referentes a todas as matérias-primas e energia são alocados como dados de entrada e as emissões e os resíduos, emissões, produtos e subprodutos como dados de saída. A classificação utilizada nesta tese segue a utilizada no trabalho *Methodology Report*⁴⁸.

Resíduo/materiais recuperáveis

Os materiais dispostos em aterros, tanto internamente à usina como fora e materiais conduzidos para incineração são classificados como resíduo.

Não foram considerados os valores relativos a reciclagem de materiais sucitados internamente nem a reciclagem do material do *esboço* cortado para atingir as dimensões da peça.

Os hidrocarbonetos líquidos (como graxa) utilizados no processo de forjamento são recolhidos, embalados e enviados para o aterro. O óleo é recuperado fazendo-se a desumidificação. Porém, eventualmente as sobras de panos, luvas, restos de carepa são colocados em tambores. Mesmo não fazendo parte importante dos insumos no balanço de massa de aços forjados, tanto no custo quanto em volume, as luvas e os panos contaminados com os hidrocarbonetos líquidos acabam se classificando como resíduos sólidos perigosos que necessitam de destino segundo a legislação ambiental.

Carepa e Escória

Durante o processo de forjamento são formados dois tipos de carepa. O primeiro é proveniente da oxidação do suporte dos esboços, que fica no vagonete que vai ao forno. O segundo tipo de carepa é a formada pela oxidação do aço durante todo o processo de forjamento.

Os dados referentes a carepa gerada foram obtidos a partir da planilha de *operação do aterro industrial da usina*, os meses estudados ficaram compreendidos entre janeiro e abril de 2003.

A escória é formada durante a fusão no FEA. Os dados relativos a escória foram coletados na empresa encarregada do tratamento deste material. Os período de coleta de dados foi o mesmo da carepa.

Emissões

O trabalho elaborado pela IISI⁴⁸ traz uma lista de emissões definida como característica para a produção de aços, que inclui: dióxido de carbono, monóxido de carbono, material particulado, óxidos a base de nitrogênio (NO_x e N_2O) e de enxofre (SO_x).

Admite-se a formação de N_2O e NO_x durante a combustão. Os valores do potencial de aquecimento global para esses gases são apresentados na Tabela 5. O potencial para o N_2O vale 310 e para o NO_x é 254. Será admitida apenas a formação de N_2O de modo a analisar o pior cenário, pois o N_2O apresenta potencial de aquecimento global maior do que o NO_x .

As emissões da aciaria consideradas foram: o CO_2 , o NO_2 e o pó de aciaria. Os dados foram coletados entre janeiro e julho de 2001

Energia Elétrica

Alguns materiais, particularmente os combustíveis como gás, carvão e óleo podem ser alocados tanto como massa como energia. Em alguns trabalhos de ACV os valores de energia são colocados em separado, de modo a facilitar a comparação com outras ACVs⁴⁸.

Os valores do consumo de energia elétrica foram obtidos a partir da planilha gerada na subestação elétrica, tanto para a forjaria como para a aciaria. Os meses estudados foram entre setembro de 2001 e abril de 2002. O consumo de energia elétrica é apresentado em kWh. Porém, nos trabalhos de Lupis⁵⁴, de Ruth⁹¹ e no relatório da IISI⁴⁸ a unidade apresentada é MJ.

Para que possa haver comparações entre os trabalhos a unidade kWh foi convertida para MJ (1kilowatt.hora equivale a 3,6.MJ).

Gás Natural

Os valores do consumo de gás para a produção de uma tonelada de lingote foram obtidos através das planilhas de *Consumo de Combustível*. Os meses estudados foram compreendidos entre abril e julho de 2002, para a aciaria e para a forjaria.

Para cada carga colocada no forno de aquecimento, na forjaria, é anotada na planilha a leitura em volume (m^3) de gás na entrada e na saída e a massa da carga em toneladas.

Utilizou-se nos meses estudados os dois tipos de gases, o gás natural (GN) e o gás liqüefeito do petróleo (GLP). Para se obter o volume de CO_2 gerado pelos fornos de aquecimento, utilizou-se como referência o GN, pois será o mais utilizado futuramente pela usina. A composição do gás natural produzido na Bolívia e utilizado nos fornos de aquecimento apresenta a composição química apresentada na Tabela 28 segundo a Agência Nacional do Petróleo (ANP)⁷⁶.

Tabela 28 - Composição química média do GN, segundo a ANP⁷⁶.

Gás	Composição	% volume
Metano	CH_4	91,800
Etano	C_2H_6	5,580
Propano	C_3H_8	0,970
Isso-butano	C_4H_{10}	0,030
N-butano	C_4H_{10}	0,020
Pentano	C_5H_{12}	0,100
Dióxido de Carbono	CO_2	0,800
Nitrogênio	N_2	1,420

Considerando que na mistura, oxigênio e GN, há um volume 10 (dez) vezes maior de oxigênio para garantir a queima total dos combustíveis do que o estequiométrico, os volumes gerados foram calculados e são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Volumes gerados de CO₂ para 100 NL de GN.

Gás	composição	Volume de CO₂ (NL)
Metano	CH ₄	91,800
Etano	C ₂ H ₆	11,16
Propano	C ₃ H ₈	2,91
Isso-butano	C ₄ H ₁₀	0,120
N-butano	C ₄ H ₁₀	0,080
Pentano	C ₅ H ₁₂	0,500
Dióxido de Carbono	CO ₂	0,800
Total		107,37

Para um volume de 34 m³ de GN, que é o volume de combustível para uma tonelada de aço, são gerados 36,51 m³ de gás. A emissão de CO₂ durante o processo de forjamento é o maior gerador de tensão.

O N₂O é formado durante a combustão, sendo o volume gerado de 1,42 NL.

Variação da Temperatura dos Lingotes entre o recebimento e o enformamento

Os lingotes são recebidos no portão da forjaria e a temperatura é medida em três locais diferentes ao longo do comprimento. Antes do enformamento a temperatura volta a ser medida. A partir das *planilhas de temperatura* foi feita a média da temperatura de 27 lingotes, no recebimento e antes do enformamento. Os resultados podem ser observados na Tabela 30.

Tabela - 30 Média das temperaturas dos lingotes(°C).

	Ponto A	Ponto B	Ponto C
Recebimento	585,5	553,3	479,0
Enfornamento	528,9	499,3	420,0

Como pode ser visto na Tabela 30, há uma queda na temperatura do lingote de 56,3°C, devido a espera pelo enfornamento.

Admitindo-se que o calor específico do ferro não varie na faixa de temperatura de resfriamento de lingotes ($c_{Fe} = 0,11 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$), a diminuição da temperatura do lingote enquanto espera para ser enfornado provoca uma perda de energia próximo a 30 MJ/t.

Refratários

A coletada de dados foi feita uma única vez, durante a reforma dos fornos e os dados são considerados por um período de um ano, até a próxima reforma e troca.

Dados da aciaria

Os dados relativos a aciaria foram coletados em 2001. Os valores relativos ao consumo de oxigênio foram coletados na *planilha de insumos* para o mês de maio. Os dados referentes a composição da carga e dos escorificantes foram obtidos nas *planilhas de fusão*.

Água Industrial

Os valores relativos a quantidade de água industrial utilizada na usina são obtidos por intermédio de rateio entre os diversos setores. Os meses considerados foram entre fevereiro e abril.

4.2 Inventário

Os dados do inventário foram divididos em dois conjuntos de valores, conforme apresentação da IISI⁴⁸. A Tabela 31 apresenta os valores dos resíduos gerados durante o processo e na Tabela 32 são mostrados os valores do insumo, de emissão e de energia elétrica, todos os valores apresentados são relativos a produção de 1 t de aço forjado. As unidades funcionais escolhidas foram três: o FEA, o forno de aquecimento e a prensa.

Tabela 31- Valores do inventário: resíduos.

Tipo de Resíduo	Origem		
	FEA	Forno de aquecimento	Prensa
Hidrocarbonetos líquidos	NL	-	1,0
Refratário	kg	3	$4 \cdot 10^{-2}$
Escória	kg	300	-
Pó de aciaria	kg	20	-
Carepa	kg	-	40
Pó de aciaria	kg	20	-

Tabela 32 – Valores do Inventário: Insumos, emissões e energia elétrica

Dados	Origem			
	Entradas	FEA	Forno de aquecimento	Prensa
Escorificante	kg	4,4	-	-
O ₂	Nm ³	50	-	-
Gás natural	MJ	200	1200	-
Hidrocarbonetos	NL	-	-	5
Água industrial	m ³	-	0,022	-
Saídas				
CO ₂	kg	600	150	-
N ₂ O	kg	1,6	0,6	-
Outros Insumos				
Energia elétrica	MJ	1500	1900	-

Visando apresentar os dados do inventário de forma mais clara, os fluxos de massa e de energia serão mostrados em função das unidades funcionais. O fluxo de materiais pode ser visto na Figura 21, o fluxo de energia na Figura 22. A Figura 23 apresenta o fluxo de resíduos, emissões e efluentes e na Figura 24 é mostrado o fluxo total para as 3 unidades funcionais escolhidas.

A Figura 22 mostra os valores de energia, nota-se que a energia pela espera do lingote para ser enfiado é representada entre o FEA e o Forno de aquecimento.

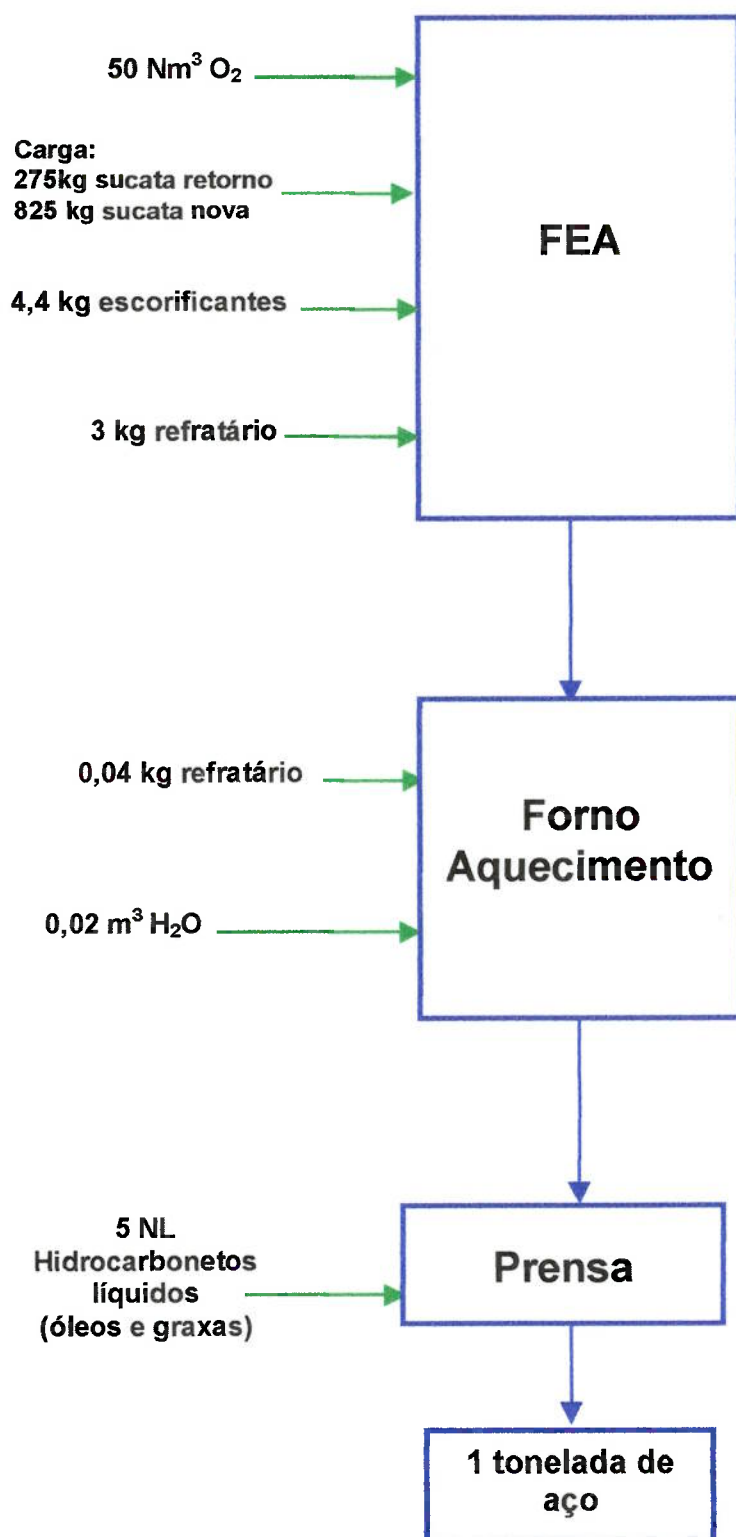


Figura 21 - Inventário da ACV, apresenta os dados de entrada de massa obtidos neste estudo.

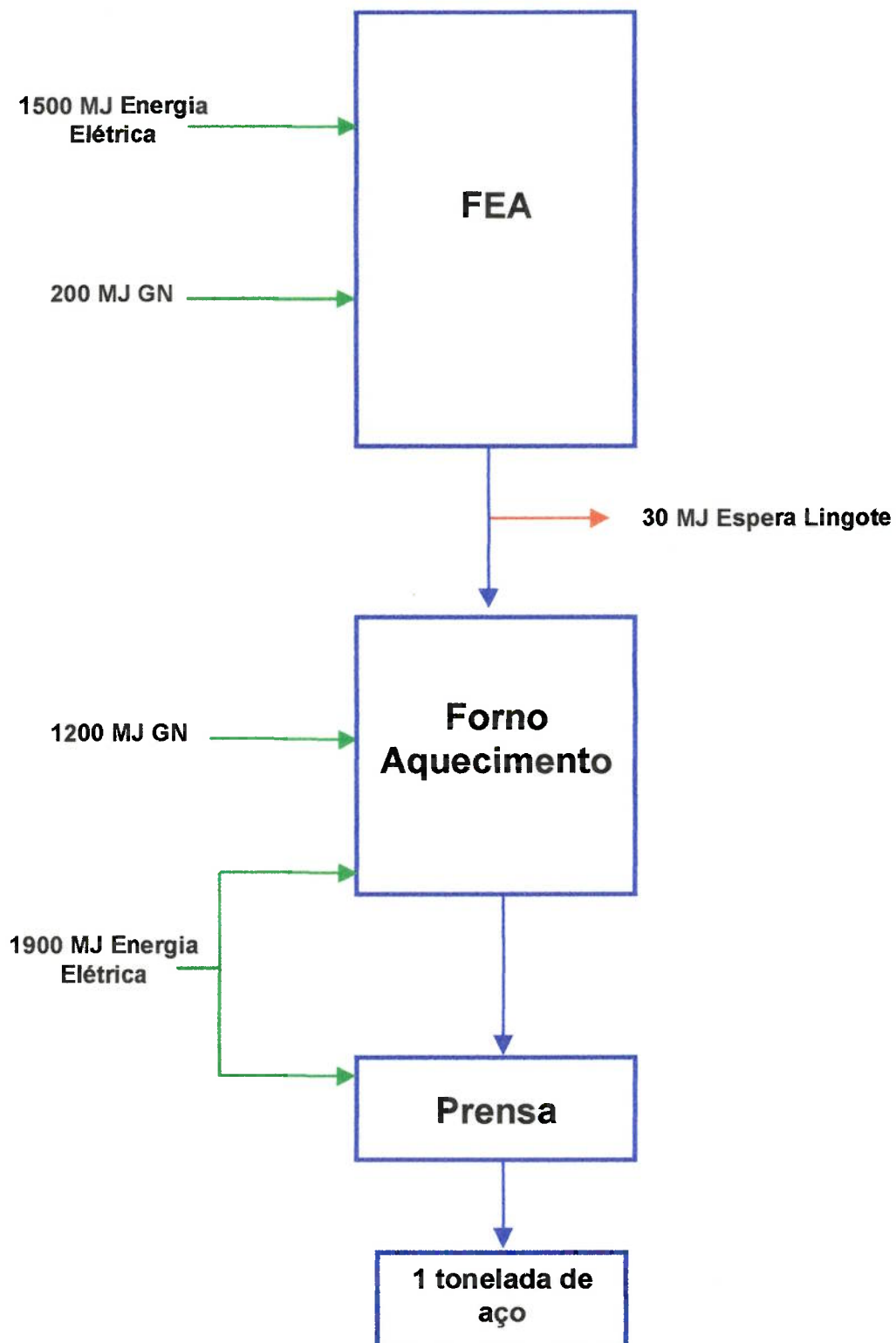


Figura 22 - Inventário da ACV, apresenta os dados de entrada de energia obtidos neste estudo.

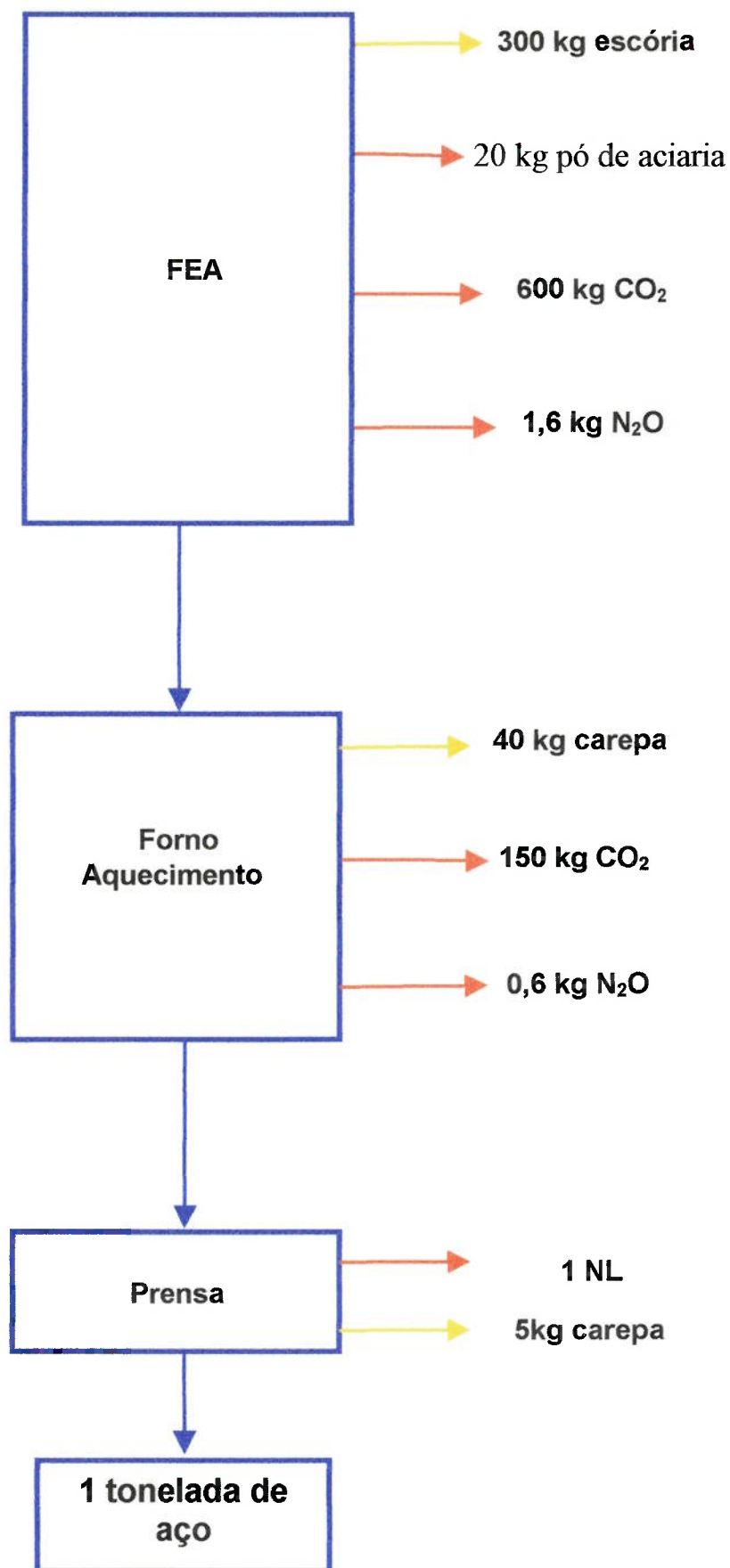


Figura 23 - Inventário da ACV, apresenta os dados de saída (emissões, efluentes e resíduos) obtidos neste estudo.

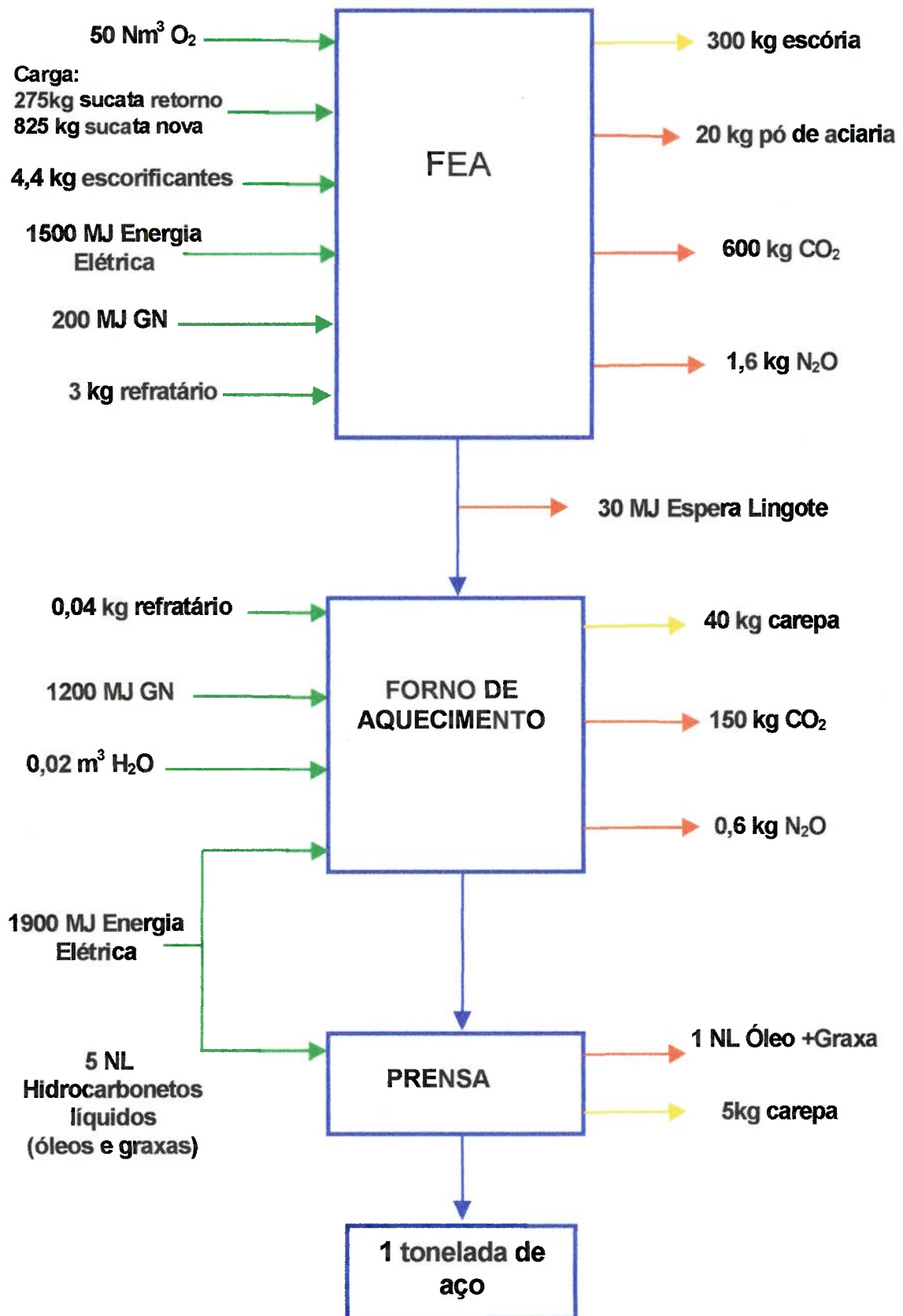


Figura 24 - Inventário da ACV, apresenta todos os dados (de entrada e de saída) obtidos neste estudo.

4.3 Análise dos impactos

Serão quantificados os impactos ambientais devido a emissão de CO₂ e pelo consumo de energia não renovável. Três modelos com índices de mérito diferentes serão comparados a fim de se avaliar a sensibilidade da metodologia.

Serão estimados os impactos ambientais devido a outros geradores de tensão comumente não avaliados em ACV.

4.3.1 Quantificação do impacto ambiental devido ao CO₂

A emissão de CO₂ para as etapas do processo vale (FEA + Forno) 750kg de CO₂/taço, conforme mostrado na Tabela 32 do inventário.

Como há também a emissão de N₂O, 2,1.kg, Tabela 32, foi feita a conversão de maneira a normalizar para a emissão de CO₂. O volume convertido é de 651 kg CO₂.

Portanto, o total emitido, que é a somatória do CO₂ e o CO₂ convertido corresponde a 1401 kgCO₂/taço.

Nota-se que, uma pequena quantidade de N₂O (menos de 1% em massa) promove uma carga equivalente a 48% de CO₂.

A importância deste fato para as concessionárias que distribuem gás é a diminuição de todas as emissões dos compradores.

A classificação dos impactos deste estudo será feita segundo o modelo utilizado por Curran¹², que é o Índice Ambiental. Por esse método, o processo

estudado apresentará dois impactos: o que provoca a diminuição de energia não renovável (GN) e o efeito estufa.

A Tabela 33 foi construída a partir dos valores do inventário.

Tabela 33 – Correlação entre os dados do inventário e impactos ambientais.

	Energia	CO ₂	N ₂ O	
Impacto	1,4	750	2,1	
Consumo de energia não renovável	1	-	-	
Efeito Estufa	-	1	310	
Resultados				Total
Consumo de energia não renovável	1,4	-	-	1,4
Efeito Estufa	-	750	651	1,4

Os valores obtidos para cada impacto ambiental foram divididos pelo valor da emissão anual global correspondente. A Tabela 34 apresenta os valores da fração relativa para esses impactos.

Tabela 34 – Valores médios globais para os impactos considerados neste trabalho¹².

Impacto ambiental	Unidade	Média mundial
Consumo de energia não renovável	GJ.ano.10 ⁹	235
Efeito Estufa	kg.ano.10 ¹²	37,7

A fração de cada impacto estudado com relação ao total mundial (fração relativa FR) é apresentada na Tabela 35.

Tabela 35 – Fração relativa (FR) dos impactos dos valores do inventário.

Impacto ambiental	Valor Inventário	Unidade	FR (ano.10 ⁻¹²)
Consumo de energia não renovável	1,4	GJ	5,9
Efeito Estufa	1401	Kg	37

De maneira a avaliar a sensibilidade dessa metodologia, três modelos com índices de méritos diferentes foram testados, de modo semelhante ao

conduzido por Curran¹², esses índices são apresentados na Tabela 36. No modelo 1 os dois impactos apresentam a mesma importância (0,5), no modelo 2 o consumo de energia não renovável apresenta valor 3 vezes maior do que o efeito estufa e no modelo 3 os valores se invertem.

Tabela 36 – Três modelos de atribuição de valores para impactos ambientais.

Impacto ambiental	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Energia não renovável	0,5	0,75	0,25
Efeito estufa	0,5	0,25	0,75

O cálculo do Índice Ambiental para cada modelo pode ser acompanhado pela Tabela 37.

Tabela 37 – Três modelos de atribuição de valores para o cálculo do Índice Ambiental.

	Mod1x(invent.)=Res.1	Res.2	Res.3
E.n.R.	2,9	4,4	1,4
E.E.	18,5	9,3	28
Í.A. (10 ⁻¹² ano)	21,4	13,7	29,4

Na Tabela 37, podem ser vistos os resultados dessa metodologia. O modelo 1 apresenta como Índice Ambiental 21,4, o modelo 2 o valor obtido é 13,7 e para o modelo 3 esse Índice é de 29,4. Utilizando-se como critério para a escolha do modelo o pior cenário representativo, ou o maior Índice Ambiental, o modelo 3 é o selecionado. Este modelo tem o efeito estufa como o impacto de maior importância.

O valor do Índice Ambiental para o modelo 3 é duas vezes maior do que o obtido com o modelo 2 e aproximadamente 30% maior do que o

modelo1. Como esses resultados se referem a um único estudo, tem-se que, a escolha do modelo para a análise dos impactos altera o valor total dos impactos, o Índice Ambiental. Isto demonstra a subjetividade desta etapa da ACV, e talvez essa seja a razão para que a análise dos impactos seja pouco apresentada na literatura ACV^{11,12}.

Quando a Análise dos Impactos não é realizada, a avaliação da ACV é conduzida diretamente a partir dados do inventário.

A partir dos valores da Tabela 37, nota-se que para qualquer método selecionado o efeito estufa aparece como o impacto ambiental de maior importância no presente trabalho.

Vários impactos ambientais ocorrem durante a fusão e a conformação mecânica do aço, conforme mostra a Tabela 38. Porém, a ACV analisa apenas os impactos no lugar estudado e os danos ambientais que ocorram fora deste sítio não são avaliados. O uso de energia elétrica promove, por exemplo, como danos ambientais a alteração da visibilidade e a destruição permanente do ecossistema e estes impactos não são tradicionalmente considerados pela metodologia da ACV.

De maneira a avaliar esses impactos, mesmo que qualitativamente, foram selecionados os *geradores de tensão* a partir dos resíduos, das emissões e de etapas do processo. As categorias de impacto foram adaptadas para o presente estudo pela exclusão de categorias irrelevantes, como eutrofização que apresenta efeitos insignificantes neste ciclo de vida. Alguns *geradores de tensão* apresentam correlação bem estabelecida com impactos ambientais como o potencial de acidificação, toxicidade humana, e

toxicidade terrestre. A Tabela 38 apresenta valores para alguns *geradores de tensão*.

Tabela 38 – Lista da relação entre os geradores de tensão e os impactos associados (Modificado a partir de Curran¹²).

	P.A. (kg/kg)	T.H. (kg/kg)	T.T. (kg/kg)	E.E. (kg/kg)	E.n.R. (MJ/kg)
Amônia	1,9				
Dióxido de enxofre	1,0				
Cromo (Cr ⁶⁺)		4,7.10 ⁴			
Cobre		0,24	7,710 ⁵		
Cádmio			1,3.10 ⁷		
CO ₂				1,0	
N ₂ O				310	
Petróleo					42,3
G.N.					35,7

P.A. Potencial de acidificação
T.H, Toxicidade humana
T.T. Toxicidade terrestre
E.E. Efeito estufa
E.n.R. Energia não renovável

Chegou-se a dez categorias que buscam avaliar de forma mais completa o processo, são elas: toxicidade humana, toxicidade terrestre, efeito estufa, energia não renovável, acidificação, formação de fumaça, perda de habitat como resultado de ações indiretas, alteração da paisagem, alteração climática local, destruição e alteração permanente do ecossistema.

Para cada *gerador de tensão* foi dada uma nota, entre 0 e 5, que reflete a sua influência na formação do impacto. A nota zero indica nenhuma influência e a nota 5 indica que a atuação deste *gerador* implica na formação direta do impacto.

De maneira a poder classificar os impactos foi estabelecida uma escala qualitativa de pontuação:

- ✓ Efeito estufa: nota 5 para N₂O e nota 1 para o CO₂.
- ✓ Toxicidade humana: 5 para o Cr⁶⁺, e 1 para o cobre.
- ✓ Energia não renovável: 5 para o GN
- ✓ Toxicidade terrestre: 5 para os metais.
- ✓ Potencial de acidificação: 5 para amônia.
- ✓ Alteração da paisagem: 5 alteração permanente, 3 para alterações que possam ser remediadas.
- ✓ Formação de fumaça: 5 para uma pilha de pneus e para queimadas.
- ✓ Alteração climática local: 5 lagos artificiais, 1 equipamentos industriais.
- ✓ Destruição permanente do ecossistema: 3 para instalações industriais.
- ✓ Perda de habitat devido a ações indiretas: 5 derramamento de petróleo.

Os *geradores de tensão* considerados de relevância no processo são: FEA, prensa, aterro, NO_x e CO₂, forno, gás, eletricidade e óleo e luvas.

Nota-se que, dois dos *geradores de tensão* selecionados apresentam superposição, o aterro e o óleo e luvas.

As usinas hidroelétricas causam os seguintes impactos: alteração na visibilidade, alteração climática local, destruição e alteração permanente do ecossistema.

O gás natural por ser uma fonte não renovável de energia será extraído até exaurir a fonte e promoverá o impacto ambiental da escassez. As

instalações do poço de extração do gás provocam impactos como alteração na visibilidade e destruição e alteração do ecossistema.

O aterro promove os seguintes impactos: alteração na visibilidade, destruição e alteração do ecossistema.

São propostos dois modelos para a atribuição de valores aos impactos. Na Tabela 39, pode-se observar os índices de mérito para cada impacto. No modelo 1 todos os impactos apresentam os mesmos valores e no modelo 2 o consumo de energia não renovável é o de maior importância.

Tabela 39 – Índices de mérito para os impactos.

Tipos de Impacto	Mod.1	Mod.2
Toxicidade Humana	0.1	0,141
Toxicidade terrestre	0.1	0,140
Efeito Estufa	0.1	0,129
Energia não renovável	0.1	0,152
Acidificação	0.1	0,076
Formação de Fumaça	0.1	0,102
Perda de habitat	0.1	0,070
Alteração da paisagem	0.1	0,040
Alteração climática local	0.1	0,049
Destruição e alteração permanente do ecossistema	0.1	0,101

A Tabela 40 apresenta a relação entre os geradores de tensão e os impactos.

Tabela 40 – Impactos ambientais e geradores de tensão selecionados do processo.

Geradores de Tensão									
Tipos de Impacto	FEA	Prensa	Aterro	N ₂ O CO ₂	Forno	Gás	Eletri Cidade	HL	Total
Toxicidade Humana	2	0	0	2	2	1	0	0	7
Toxicidade terrestre	0	0	2	0	1	0	0	5	8
Efeito Estufa	3	0	0	5	5	5	0	0	18
Energia não renovável	-2	1	0	0	0	5	1	1	6
Acidificação	0	0	0	2	1	0	0	0	3
Formação de Fumaça	2	0	0	5	5	5	0	0	17
Perda de habitat	0	0	1	1	1	1	1	0	5
Alteração da paisagem	1	1	3	0	1	2	5	0	13
Alteração climática local	1	0	0	2	1	0	0	0	4
Destruição e alteração permanente do ecossistema	1	1	3	3	1	0	5	0	14

A partir da Tabela 40, percebe-se que o FEA apresenta impacto negativo no consumo de energia não renovável. Isto ocorre porque este tipo de forno utiliza sucata como matéria-prima e economiza minério de ferro (matéria-prima mineral).

Deve-se considerar que os panos e as luvas contaminados não são calculados no conjunto dos impactos. De maneira diferente da que ocorre na análise de impactos ambientais onde há estudos das possíveis conseqüências (como no caso do efeito estufa) o impacto devido aos panos e

luvas contaminados tem que ser resolvido e não são calculados como possíveis danos ambientais.

A Tabela 41 apresenta a pontuação para cada impacto

Na Tabela 41 podem ser vistos os valores para o Índice Ambiental dos dois modelos. O processo estudado apresenta para os dois modelos propostos o efeito estufa como o impacto de maior pontuação. Mesmo para o modelo 2 que apresenta o efeito estufa como o 4º impacto de maior importância. Por outro lado, os efeitos do forno, do gás e dos gases CO₂ e N₂O apresentam sobreposição relativamente ao efeito estufa mas foram considerados separadamente.

Tabela 41 – Valores dos impactos para os dois modelos.

Tipos de Impacto	Mod.1	Mod.2
Alteração da paisagem	1,3	0,52
Efeito Estufa	1,8	2,32
Formação de Fumaça	1,7	1,73
Alteração climática local	0,4	0,196
Toxicidade terrestre	0,8	1,12
Perda de habitat	0,5	0,35
Toxicidade Humana	0,7	0,987
Energia não renovável	0,6	0,9
Destruição e alteração permanente do ecossistema	1,4	1,41
Acidificação	0,3	0,228
Índice Ambiental	9,5	9,76

O método 1 apresenta a formação de fumaça como o segundo impacto de maior importância no processo de forjamento de aços. A formação de fumaça é um dano de efeito local e de menor importância do que, por exemplo, o consumo de energia não renovável, sendo que não foi considerada como impacto no trabalho da IISI⁴⁸.

4. 4 Aperfeiçoamento da análise

Neste capítulo serão avaliados os dados oriundos do inventário e feita uma análise dos geradores de tensão isoladamente. Na ACV convencional a etapa de Análise dos Impactos não é normalmente feita, sendo realizada, portanto, apenas o aperfeiçoamento da análise, ou seja, os impactos não são discutidos, sendo apenas contemplados na discussão os dados do inventário.

Conforme mostrado no inventário os principais fatores a serem analisados são:

- ✓ FEA,
- ✓ Energia elétrica,
- ✓ Temperatura do Lingote,
- ✓ Hidrocarbonetos Líquidos (graxas e óleos),
- ✓ GN,
- ✓ Escória,
- ✓ Carepa,
- ✓ CO₂,

4.4.1 FEA

Segundo Lupis⁵⁴, a fusão em conversores, nas usinas integradas, de uma carga contendo 25% de sucata e 75% gusa apresenta emissão de carbono 3 vezes maior do que a fusão em FEA com uma carga contendo 100% de sucata. Segundo Birat⁷⁹, a utilização de sucata de aço é a melhor solução para a diminuição das emissões de CO₂ nas usinas siderúrgicas.

Na usina siderúrgica estudada, a carga do FEA é composta 100% de sucata de aço e ferro.

Assim, segundo Lupis⁵⁴ e Birat⁷⁹, a etapa de fusão dos lingotes que serão forjados apresenta a mais baixa taxa de emissão de CO₂ por tonelada de aço líquido produzido, promovendo menor impacto ambiental no que se refere ao efeito estufa, tanto pelo uso do FEA como pela composição da carga.

4.4.2 Energia Elétrica

A energia elétrica total consumida no processo é de 3,4 GJ (3,03MWh/t). Este valor é menor do que a média anual japonesa para o processo, segundo o trabalho de Sakamoto e colaboradores⁷⁷, que é de 17,6GJ por tonelada de aço produzido. Esta diferença pode ser creditada ao fato de que os valores apresentados pelos autores são uma média de todos os tamanhos de peça forjada, e de todas as empresas e o processo estudado utiliza oxigênio no FEA o que deve diminuir o gasto com energia elétrica.

Os valores de energia gastos para a fusão em FEA e laminação de barras, apresentados pela IISI⁴⁸, são aproximadamente o dobro dos valores deste trabalho. A energia total consumida obtida pelo trabalho da IISI foi de 11,3 GJ.

4.4.3 Temperatura do Lingote

A perda de energia é próxima a 30 MJ/t. Considerando-se uma economia de 10% nesse processo, que poderia ser conseguida através da simples otimização dos procedimentos da empresa, e considerando-se as emissões no forno de aquecimento, onde são gerados 326 kgCO₂/t (140kgCO₂ e 0,6 kgN₂O) não seria emitido 0,8 kgCO₂/t aço. ($3 \cdot 326 / 1,2 \cdot 10^3$).

Assim a empresa poderia negociar esses “créditos” de carbono com siderúrgicas do hemisfério norte, onde existem diversos países com restrições segundo o protocolo de Quioto.

Uma solução tentativa para atingir essa diminuição seria a aciaria enviar o lingote apenas quando o forno estivesse com espaço para receber a carga. De maneira que não haja espera do lingote (forno cheio), nem espera do forno, forno vazio sem lingote.

4.4.4 Hidrocarbonetos Líquidos (graxas e óleos)

A geração de resíduos sólidos com hidrocarbonetos líquidos provoca três conseqüências diretas, duas ambientais e uma administrativa. O óleo que se mistura aos outros materiais acaba tendo a recuperação dificultada, pois são necessárias as etapas de filtração e decantação para só então, enviá-lo para a recuperadora. Os panos e luvas acabam contaminados e devem ser encaminhados ao aterro gerando um resíduo desnecessariamente.

A falta de seletividade no processo ou a não obediência na seqüência de procedimentos no manejo dos resíduos gerados, deverá ser enfrentado pela empresa para se obter uma futura certificação.

4.4.5 GN

O consumo de GN, deste estudo, para a produção de 1 t de aço é de 1,2 GJ. Segundo Prüm¹³⁶, o consumo médio da Europa, parte da Ásia e dos Estados Unidos para a produção de 1 t de aço é de 2,4 GJ de gás natural. A média mundial apresentada no relatório IISI é 2,6 GJ/taço⁴⁸. Portanto o valor para o consumo de GN apresentado neste estudo é menor do que as médias dos trabalhos. Duas razões são propostas para explicar este fato: os equipamentos dos fornos de aquecimento da usina são relativamente novos, o que sugere que devam trabalhar próximos à estequiometria. Como os dados comparativos mostrados são médias mundiais de todos os processos de fabricação de aço, alguns processos gastam mais energia que outros.

4.4.6 Escória

A escória gerada durante a fusão é encaminhada para tratamento e colocada à venda.

A massa de escória produzida no FEA é de 300 kg/t de aço. Para se gerar 1 t de escória são manufacturados 3,3 t de aço.

O problema da escória da aciaria está na estabilidade dimensional da mesma. A escória sofre expansão causada pela hidratação do CaO livre.

Assim, este material deve ser estocado por até 60 dias para que haja estabilização dimensional.

A escória tratada pode ser utilizada na substituição da brita no calçamento de estradas vicinais ou como lastro rodoviário, ou ferroviário. A partir de uma certa distância o valor do frete passa a ser significativo no custo, ficando o mercado da escória limitado a um raio de cerca de 100 km do gerador.

O preço médio, em julho de 2003, da tonelada da escória tratada era US\$ 1,30 /t, e da brita US\$ 6,20 /t.

As soluções propostas para diminuir o passivo ambiental devido ao armazenamento da escória são: criar um programa de publicidade e venda do material em prefeituras do interior e em construtoras, e criar um programa de pesquisa e desenvolvimento que vise obter novas aplicações da escória tratada.

4.4.7 Carepa

Os óxidos formados podem ser divididos em, basicamente, dois tipos: o óxido de ferro proveniente dos suportes e os óxidos de ferro e de elementos de liga presentes do *esboço*.

Estes óxidos acabam se desprendendo do material e caem sobre o vagonete e nos trilhos que o conduzem, conforme pode ser visto na Figura 19 (c). A carepa também se solta ao ser levada pela ponte rolante até a prensa e também durante a conformação mecânica 19 (e).

Como o forjamento exige material extra para a sua execução, o lingote apresenta massa maior do que o aço produzido, assim a carepa não afeta as dimensões finais da peça. O custo relativo a sua formação seria somente o preço da sucata oxidada, porém a carepa que cai sobre os trilhos trava o movimento do vagonete e diminui a produção. A importância econômica da carepa então, é maior do que o preço da sucata perdida.

A carepa gerada durante a produção de peças de aço forjadas é conduzida para o aterro. O volume produzido ocupa espaço físico no aterro e gera preocupação relativa ao passivo ambiental que está sendo criado. O custo por tonelada de carepa disposta no aterro é de, aproximadamente, US\$ 5,00. Como são geradas 45 kg por t de aço, para cada 23 t de aço é gasto US\$ 5,00 para a disposição de carepa. O preço de peças de aço forjado pode variar entre US\$ 800,00 e US\$ 3000,00 por tonelada e uma peça de 23 t custaria entre US\$ 18.000 e US\$ 70.000,00.

Dois fatores pesam contra a iniciativa na busca de alternativas para o uso da carepa: o valor relativo a disposição final da carepa apresenta baixo impacto no preço final do produto e a carepa tem pouco uso como matéria-prima em outras aplicações.

4.4.8 CO₂

O *Conceito de geração Zero de Resíduos* proposta por Wrona⁸⁸ e Bandyopadhyay⁸¹ não pode ser aplicado neste caso pois a emissão de CO₂

não pode ser evitada. O dióxido de carbono gerado faz parte da combustão do gás.

A média da Europa, parte da Ásia e Estados Unidos apresentada por Prüm¹³⁶, com fusão em FEA é de 599 kgCO₂/t de aço.

Segundo Lupis⁵⁴, nos Estados Unidos, nas usinas integradas este valor é de 2350 kgCO₂/t para produtos semi acabados e na França é de 1540.

O relatório do IISI⁴⁸ apresenta como valor 558,2 kgCO₂/t aço, para aço fundido em FEA e 1910 kgCO₂/t aço para aços laminados a quente e fundidos em conversores.

O valor obtido neste trabalho para a emissão de CO₂ durante o forjamento é de 750 kgCO₂/taço.

Destaca-se que há duas classes de valores obtidos na literatura^{48,54,136} referente as emissões de CO₂. Uma para os aços produzidos em siderúrgicas primárias, que se utilizam de conversores e matéria-prima contendo maior percentagem de carbono, o que acarreta maior emissão. Esta classe apresenta tipicamente emissões próximas ou acima de 1500 kgCO₂/taço.

Na segunda classe de valores estão os aços fundidos em FEA que apresentam valores próximos a 600 kgCO₂/taço. O caso estudado se encaixa na segunda categoria.

Algumas propostas disponíveis na literatura^{137,138,139,141} com o objetivo de diminuir os impactos gerados pelas emissões de CO₂ serão apresentadas a seguir.

A captura de carbono por reflorestamento é a opção comumente utilizada¹³⁷. Segundo Hu¹³⁸, uma floresta de pinheiros tem a capacidade de

absorver $4,48 \cdot 10^{-3} \text{ tCO}_2/\text{m}^2\text{ano}$. Se o objetivo do reflorestamento for apenas a captura do CO_2 produzido (750 kg) serão necessários 167 m^2 . Porém, se o objetivo do reflorestamento for estabilizar as emissões dos gases estufa com o seqüestro de carbono equivalente, a área plantada necessária será de 313 m^2 .

Segundo Moreira e Serrasqueiro¹³⁹, gasta-se US\$ 1.500,00 para plantar um hectare de eucalipto nas regiões chuvosas do Brasil. Utilizando-se este valor, serão gastos US\$ 25,00 /aço para capturar apenas o carbono e US\$ 47,00 /aço para não haver efeito estufa.

A proposta de Hu¹³⁸ é modificar o albedo local por intermédio da instalação de placas refletoras, de albedo 0,88, e dessa forma aumentar a reflexão da energia proveniente do sol. Isso diminuiria o aquecimento direto da Terra, abrindo a possibilidade de aumentar a geração de CO_2 . Os argumentos dessa proposta são:

- ✓ as florestas plantadas com o intuito de capturar o CO_2 podem se incendiar ou atingirem a maturidade sendo necessário o corte;
- ✓ o aquecimento da Terra é um problema de energia e não de emissão, e assim deve ser tratado.

Como exemplo, mostra-se que para a emissão de 0,025 Gt de CO_2 (aumento de 5% das emissões australianas), são necessárias $1,7 \cdot 10^8 \text{ m}^2$ ($1,7 \cdot 10^4$ hectares) em placas refletoras. Esta é uma área 30 vezes menor do que aquela que produziria o mesmo efeito por reflorestamento.

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro¹⁴⁰, o preço da tonelada de aço inoxidável importada valia US\$ 1644,96 /t, com 2 mm de espessura. Este

material cobre uma área de 63 m². O custo da placa é de US\$ 26,00 /m². Dessa forma, seriam necessárias colocar 2,8 milhões de chapas refletoras a um custo, sem o valor da compra do terreno, do transporte e da instalação, de US\$ 4,5 bilhões.

Hu¹³⁸ sugere tanto a colocação das placas como a construção de uma estrada no interior da Austrália, onde existem os desertos de Gibson, o Great Victoria e o Sandy.

Usando o método de Hu, para reduzir o efeito estufa causado pelo processo de fabricação por forjamento, seriam necessários (apenas para o CO₂) 5,1 m² de chapa a um custo de US\$ 133,00 para cada t de aço. Para a emissão de CO₂ e N₂O, são necessários 9,5 m² de chapa a um custo de US\$ 248,00 /t aço.

Jean-Baptiste & Ducroux¹³⁷ fizeram um levantamento das técnicas existentes para a captura e armazenamento de CO₂. Os autores consideraram duas técnicas para a captura: por lavagem do gás com mono-etanolamina e pelo uso do solvente Selexol. O custo estimado para a captura está compreendido entre US\$ 20,00 e 50,00 /tCO₂. O custo do transporte deste gás capturado está avaliado entre US\$ 1,00 e 3,00 /tCO₂ para uma distância de até 100 km.

O armazenamento do CO₂ capturado é uma atividade considerada complexa devido aos volumes envolvidos nesta tarefa¹³⁷. Considera-se como a solução mais satisfatória a estocagem em formações geológicas subterrâneas como os reservatórios de gás natural, poços de petróleo e aquíferos salinos todos em final de vida ou já exauridos. O potencial de

armazenamento estimado destas localidades é de 10 Tt de CO₂, valor considerado suficiente para centenas de anos de emissão. Esta atividade já é realizada atualmente nos Estados Unidos, onde 20.10³ t de CO₂ são injetados em campos petrolíferos para a recuperação de petróleo. É ressaltado que a alternativa dos campos de gás e de petróleo apresentam vantagens comparativas como a existência de infraestrutura e o conhecimento da geologia local. O custo estimado para o armazenamento está entre US\$ 2,00 e 3,00 /tCO₂.

Outra solução é analisada por Jean-Baptiste & Ducroux¹³⁷ é a utilização de CO₂ em atividades industriais. Nos Estados Unidos o consumo anual de CO₂ pelas indústrias alimentícia, química e petrolífera é de 40.10⁶tCO₂ porém, são geradas no mundo uma massa estimada em 22.10⁹tCO₂, demonstrando que a utilização industrial de dióxido de carbono atuaria de forma limitada no seu controle.

Gielen¹⁴¹ apresenta uma análise de custos para siderúrgicas situadas no Japão que visam diminuir as emissões de CO₂. Considera-se como condições para que esta atividade seja viável economicamente, que a captura do CO₂ deva ser conduzida na fonte das emissões e que haja escala industrial de produção, é citado o valor de 3,8.10⁶ tCO₂/ano. As alternativas para o armazenamento do CO₂ apresentadas são: em águas oceânicas profundas, em aquíferos salinos terrestres, em aquíferos salinos oceânicos e em bacias petrolíferas exauridas.

Segundo Gielen¹⁴¹, as atividades sísmica e vulcânica do Japão afastam a possibilidade do armazenamento em terra. Estocar CO₂ em

campos de petróleo está no início do seu desenvolvimento e a injeção de CO₂ em águas oceânicas é ilegal por não se conhecerem os impactos ambientais associados. Assim, os locais que apresentam maior potencial para serem reservatórios são os aquíferos costeiros japoneses. O custo estimado associado ao transporte (até 600 km) e ao armazenamento está na faixa entre US\$ 0,5 e 2,00 /t.

No presente trabalho, a emissão de dióxido de carbono obtida vale 750 kgCO₂/taço. Este valor calculado para uma tonelada de CO₂, produz aproximadamente 1,3 t de aço. Utilizando-se os valores apresentados por Jean-Baptiste & Ducroux¹³⁷ que são para captura (US\$ 50,00), transporte(US\$ 3,00) e armazenamento(US\$ 3,00) e considerando 500 km a distância até o poço de petróleo mais próximo (Bacia de Campos) o custo total seria de US\$ 68,00 para cada 1,3 t de aço produzido.

Utilizando-se os valores para a captura, transporte e armazenamento apresentados por Jean-Baptiste e Ducroux¹³⁷, de maneira a optar pela segurança, e não os mostrados por Gielen¹⁴¹, e os valores calculados para o seqüestro de CO₂, foram normalizados para 1 t de aço:

- ✓ Capturar, transportar e armazenar: US\$ 52,00 /taço.
- ✓ Seqüestro de CO₂ por reflorestamento: US\$ 25,00 a 47,00 /taço.
- ✓ Placas refletoras: US\$ 133,00 a 248,00 /taço.
- ✓ Para as empresas brasileiras, o seqüestro de carbono se apresenta como a solução mais viável economicamente.

Estes resultados mostram que a solução não é global, mas tem que ser calculada para cada região. Na composição dos valores entram

características próprias das regiões como espaço para reflorestamento, clima para o plantio, tecnologia disponível para o transporte de CO₂ e geologia apropriada para o armazenamento do CO₂.

4.4.9 Taxas e impostos como ferramenta para a redução das emissões de CO₂

Uma forma que pode ser empregada na tentativa de se reduzir as emissões de CO₂ é a cobrança de taxas e impostos⁸⁴.

Tributos sobre o uso do carbono já são aplicadas em países escandinavos¹⁸ visando a redução das emissões. Na Tabela 42 pode-se observar os valores cobrados pela emissão de carbono em países nórdicos.

Tabela 42 - Tributos sobre a emissão do carbono, modificado a partir de Newell¹⁸.

País	Tributo (US\$ /vol ou peso)	Custo do C (US\$ /tC)	Observação
Noruega	0,13 /NL gasolina	190 /tC	Início em 1991
Dinamarca	17,70 /tCO ₂	65 /tC	Tributação para energia Doméstica a partir de 1992, para outros usos os valores são menores
Suécia	45 /tCO ₂	165 /tC	
Finlândia	4 /tcarvão	2,6 /tC	
Holanda	2 /tcarvão	1,3 /tC	

Porém, segundo van Veen⁸⁴, as medidas que envolvam a tributação pela emissão de CO₂ das siderúrgicas, não implicarão em uma redução significativa das emissões, mas sim ocorrerá uma drenagem de recursos financeiros de outros setores da corporação como o da pesquisa e

desenvolvimento, que justamente são os melhores caminhos para se alcançar o desenvolvimento sustentável.

4.4.10 Custos relativos a emissões e resíduos

Os valores relativos aos custos da espera do lingote para ser enornado, a escória, a carepa, e para o reflorestamento foram normalizados para uma tonelada de aço.

Se a espera pelo enornamento for otimizada, obtém-se uma redução de 0,8 kgCO₂/t aço. Como exemplo, se a usina tiver uma produção mensal de 100000 t/mês, isso representaria uma redução na emissão de 800tCO₂/mês que poderia ser comercializado com as usinas dos países mais desenvolvidos. Por outro lado, essa economia na geração de CO₂ pode ser representada pela diminuição de gastos com reflorestamento (US\$ 0,05 /taço) ou por captura, transporte e armazenagem (US\$ 0,06 /taço) ou pela colocação de placas refletoras (US\$ 0,15 /taço).

A Tabela 43 apresenta os valores, em dólares para estocar a carepa no aterro, comercializar a escória, reflorestar uma área para a produção de 1 t de aço e economizar 10% de energia na espera pelo enornamento. No caso da economia decorrente da eventual otimização do enornamento considerou-se o custo com reflorestamento como referência.

Usou-se a seguinte notação:

- ✓ Se o custo associado é positivo, recebe-se pela operação, e.
- ✓ Se a operação da destinação for deficitária o valor é negativo.

Tabela 43 – Valores estimados para alguns geradores de tensão considerados, normalizados para 1 taço.

Tópico	Valor (US\$)
Reflorestamento	- 47,00
Carepa	- 0,22
Escória	+ 0,06
Espera do cilindro	+0,05

A partir da Tabela 43 pode-se concluir que o efeito estufa apresenta o maior custo relativo dentre os geradores de tensão estudados. Esse valor representa 6% da peça mais barata de aço da empresa (US\$ 800,00 /t) e 1% para a peça mais cara (US\$ 3.000,00 /t).

Por outro lado, como passivo ambiental a carepa e a escória devem sofrer tratamento de maneira a diminuir ou acabar com o armazenamento.

5 CONCLUSÕES

Os resultados alcançados no presente estudo permitem inferir o seguinte:

1. Os principais geradores de tensão das usinas não integradas são o CO₂ e o consumo de energia não renovável.
2. Para as etapas estudadas (da aciaria até o final do forjamento), o valor emitido de CO₂ é de 750 kg/taço e a energia total consumida é de 4,4 GJ/taço, sendo 1,4 GJ provenientes de fontes não renováveis.
3. A melhor técnica para captura de CO₂, para a usina é o reflorestamento, a um custo aproximado de US\$ 47,00 /taço.
4. A otimização do processo de aquecimento dos lingotes pode gerar um crédito de CO₂ de 80. tCO₂/mês que pode ser comercializado na forma de crédito de carbono.
5. O efeito estufa é o principal impacto ambiental do processo de manufatura de aços forjados.
6. Comprovou-se que a ACV é uma ferramenta que pode ser utilizada para avaliar os processos produtivos e para propor melhorias.
7. A geração de resíduos sólidos (carepa, poeiras e escória) é um problema local.
8. A ACV permitiu detectar a geração de tensões não inerentes ao processo, como os resíduos produzidos pela contaminação de materiais com hidrocarbonetos líquidos. Para esses geradores de tensão não deve haver avaliação dos impactos e análise dos resultados do inventário.

9. Os valores totais para remediação da carepa e da escória representam menos de 1% do valor do produto final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) PRATES, G.A. **Eco Design utilizando QFD, métodos de taguchi e DFE**. 1998. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998. Disponível em: <<http://www.eps.ufsc.br/teses98/glaucia/cap4.html>>. Acesso em 7 out. 2003.
- 2) EPA. Apresenta leis, normas e orientações americanas. Disponível em <www.epa.gov/epaoswer/osw/hazwaste.htm>. Acesso em: fev. 2003.
- 3) CHAVES, A.P. et al. **Mineração e Desenvolvimento Sustentável: Desafios para o Brasil**. Rio de Janeiro: Maria Laura Barreto, 2001. p. 40-75.
- 4) MÜLLER-PLANTENBERG, C.; AB`SABER, A.N. **Previsão de Impactos**. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002. p. 27-94.
- 5) MacDonald's. Apresenta atividades desenvolvidas. Disponível em <www.mcdonalds.com/community/environ/envinfo.html>. Acesso: em maio/2003.
- 6) HUNTER, J.S.; BENFORADO, D.M. Life-Cycle Approach to Effective Waste Minimization 3M Company. In: 80th ANNUAL MEETING OF APCA, New York, 1987. **Anais**. New York. 1987, p.21-26.
- 7) Greenseal. Apresenta as características para o selo verde. Disponível em: <www.environmentalchoice.org>. Acesso em: mai. 2003. capturado em abril 2003.
- 8) Greenseal. Selo verde. Disponível em: <www.greenseal.org>. Acesso em: abr. 2003.

- 9) GRAEDEL, T.E. e ALLEMBY, B.R. **Industrial Ecology**. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 398p.
- 10) CHEN, A.C. **A product lifecycle framework for environmental management and policy analysis: case of automobile recycling**. 1995. 86p. Dissertação (Mestrado) - MIT , Boston, Boston 1995.
- 11) Ciambrone, D.F. **Environmental life cycle analyses**, Florida: Lewis Publishers, 1997. 111p.
- 12) CURRAN, M.A. **Environmental life-cycle assessment**. Nova York: Ed McGraw-Hill, 1996.
- 13) CHEHEBE, J.R.B. **Análise do Ciclo de Vida de Produtos – Ferramenta Gerencial da ISO 14000**. 1.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 1998.
- 14) CALLAN, S.J. e THOMAS, J.M. **Environmental economics and management**. 2.ed. Orlando: The Dryden Press, 2000.
- 15) SIMON, N. Experiences with the first ever made lci/lca in the packaging industry, In: SEMINÁRIO IISI , Estocolmo, 1997. **Anais**. Estocolmo, 1997, 1-5p.
- 16) FAVA, J.A. et. al. A technical framework for entire life-cycle assessments. In: SOCIETY OF ENVIRONMENTAL TOXICOLOGY AND CHEMISTRY WORKSHOP HELD IN SMUGGLER 'S NOTCT VT, 1990. 76-85p.
- 17) FRANKLIN Associates Ltda. **Background Document on Clean Products Research and Implementation**. Cincinnati: for U.S. Environmental Protection Agency, 1990. (EPA/600/2-90/048).

- 18) NEWELL, S.A. **Strategic Evaluation of Environmental Metrics: Making Use of Life Cycle Inventories**. 1998. 66p. Tese (Doutorado) – MIT. Boston 1998.
- 19) KUTA, C.C. et al. Improvement of products and packaging through the use of life cycle analysis.. **Resources, Conservation and Recycling**, v.14, p.185-198, 1995.
- 20) CURRAN, M.A., **Environmental life-cycle assessment**. New York: McGraw-Hill, 1996.
- 21) SETAC. LIFE-cycle assessment data quality: a conceptual framework. Pensacola, 1994.
- 22) BUDIANSKY, S. Apelo Ecológico vira estratégia promocional. **O Estado de São Paulo**, 13 out.1996. Seção Meio Ambiente.
- 23) SETAC. A conceptual framework for life-cycle impact assessment. Pensacola, 1993, p.53.
- 24) FRANKLIN, W.E. Editorial : Life Cycle Assessment – a remarkable tool in the era of sustainable resource and environmental management. **Resources, Conservation and Recycling** v.14, p.v-vii, 1995.
- 25) HEKKERT, M. et al, Reduction of CO₂ emissions by improved management of material and product use: the case of primary packaging. **Resources, Conservation and Recycling**,. v.29, p.33-64, 2000.
- 26) VILLAS BÔAS, R.C.; PEITER, C. C. **Abordagem participativa na gestão de recursos minerais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. (Série Estudos e Documentos, 51).
- 27) MEDINA, H.V. **Inovação em materiais na indústria automobilística**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. (Série Estudos e Documentos, 48).

- 28) UGAYA, C.M. Life cycle energy consumption in different lifetimes of the automobile. In: VII INTERNATIONAL MOBILITY TECHNOLOGY CONFERENCE & EXHIBIT – SAE Brasil 98- São Paulo, 1998. **Anais**. São Paulo, 1998, p.1-6.
- 29) REIS, M.J.L. **ISO 14000. Gerenciamento Ambiental. Um Novo Desafio Para a Sua Competitividade**. Rio de Janeiro: Editora Qualitymark.1995.
- 30) UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Florianópolis. Apresenta definições sobre ACV. Disponível em: <www.ens.ufsc.br/~soares>. Acesso em: 24 mar.2003.
- 31) 3M. Apresenta atividades e orientações relativas ao meio ambiente. Disponível em: <www.3m.com/profile/envt/index.html>. Acesso em: mar. 2003.
- 32) **Polyurethane (TDI, MDI, Polyols) ALECO- Profiles of the European Plastics Industry**. Bruxelas: ISOPA, 1996. Report 9.
- 33) LEE, J.J.; ALLEN, P.O.D. Critical review of life cycle analyses and assessment techniques and their application to comercial activities. **Resources, Conservation and Recycling**, v.13, p.37 – 56, 1995.
- 34) KEOLEIAN, G.A., **Life-Cycle Design**. In Curran, M.A. Environmental Life-Cycle Assessment. New York: Ed McGraw-Hill, cap.6, 1996.
- 35) WHITE, A.L. et al. **Life-Cycle costing: concepts and applications**. In Curran, M.A. Environmental Life-Cycle Assessment. New York: Ed McGraw-Hill, cap.7, 1996.
- 36) FABRYCKY, W.J., Designing for the Life Cycle. **Mechanical Engineering**, v. 109, n. 1, p.72-74, 1987.

- 37) KEOLEIAN, G.A. The application of life cycle assessment to design. **Journal of Cleaner Production**, v.1, p.143-149, 1994.
- 38) ISO. Grupo de trabalho que desenvolve normas ambientais. Disponível em: <www.tc207.org>. Acesso em: abr. 2003.
- 39) British Standart 7750, seção 4.4.1, 4.22 (a) e (c). Londres. 1992.
- 40) NBR ISO 14004 Sistemas de Gestão Ambiental – Diretrizes gerais sobre princípios, sistemas e técnicas de apoio – out 1996 – ABNT.
- 41) EMAS. Compara diversos sistemas de gestão ambiental. Disponível em: <www.emas.org>. Acesso em: 13 mar. 2003.
- 42) Life-Cycle. Apresenta a ACV. Disponível em: <www.life-cycle.org/>. Acesso em: 5 jun. 2003.
- 43) Environmental Management – Life Cycle Assessment – principles and framework ISO/DIS 14040 (1997)(E).
- 44) Environmental Management- Life Cycle Assessment – goal and scope, definition and inventory analisys, ISO/DIS 14041 (1997).
- 45) ABNT. Apresenta as normas brasileiras. Disponível em: <www.abnt.org.br>. Acesso em: fev. 2003.
- 46) GARCIA, E.E.C., **Análise do ciclo de vida ISO 14000**, In: Encontro ECO-Rio. 1996. **Anais**. Rio de Janeiro, 1996, p.39-42.
- 47) Gestão Ambiental Disponível em: <www.gen.gr.ip/members.html>. Acesso em: abr. 2003.
- 48) INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, **Methodology Report**. Belgium, 1997.

- 49) AZAPAGIUC, A., CLIFT, R., The application of life cycle assessment to process optimisation. **Computers and Chemical Engineering** v. 23, p. 1509-1526,1999.
- 50) BERKHOUT, F. e HOWES, R. The adoption of life-cycle approaches by industry: patterns and impacts. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 20, p.71-94, 1997.
- 51) JOLLIET, O. et al. **Life Cycle Impact Assessment programme of the Life Cycle Initiative**. Final draft report of the LCIA Definition study. Bo Weidema, 9th 20/fev/2003.
- 52) CETAL. Descreve uma ACV conduzida. Disponível em <www.bsi.com.br/unilivre/centro/experiências>. Acesso: em 15 abr. 2003.
- 53) NORRIS, G.A. et al. **Life cycle inventory program of the life cycle initiative**. Final draft report of the Ici definition study. 2003. (Version 6^a).
- 54) LUPIS, C.H.P. Greenhouse gases and the metallurgical industry. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 30B, p. 841-856, oct.1999.
- 55) BURGESS, A.A. E BRENNAN, D.J. Application of life cycle assessment to chemical processes. **Chemical Engineering Science**. v. 56, p.2589-2604, 2001.
- 56) JINCHENG, X. et al. Research and development of the object-oriented life cycle assessment database. **Materials and Design**. v. 22, p.101-105, 2001.
- 57) UDO DE HAES, H.A., Applications of life cycle assessment: Expectations, drawbacks and perspectives. **Journal of Cleaner Production**. v.1, p.131-137, 1993.

- 58) AYRES, R.U. Life cycle analyses: a critique. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 14, p.199-223, 1995.
- 59) UDO de HAES, H.A., Towards a methodology for life cycle impact assessment, **Relatório SETAC** do grupo europeu de Life Cycle Impact Assessment, SETAC- Bruxelas
- 60) BOUSTEAD, I. Life-cycle assessment: an overview. **Energy World**. P.7-11, 1995.
- 61) BAKER, K.A., Fennessy, M.S. e Mitsch, W.J., Designing wetlandsfor controlling coal mine drainage: an ecological-economic modeling approach. **Ecological Economics**, v.3, p.1-24, 1991.
- 62) CHEVALIER, J.L., le TÉNO, J.F., requirements for an lca-based model for evaluation of the environmental quality of building products, **International journal of LCA** v.31, p.487-491, 1996.
- 63) NIEUWLAAR, E. ALSEMA, E. e van ENGELENBURG, B.. Using Life-Cycle Assessment for the environmental evaluation of greenhouse gas mitigation options. **Energy Conversion &Management**, v.37, n.6-8, p.831-836, 1996.
- 64) STEWART, M.; GOEDKOOP, M. **Life Cycle Impact Assessment definition study: Background document I**. UNEP-SETAC, 2003. (LCIA Needs analysis report of the UNEP-SETAC Life Cycle Initiative, 18/02/2003).
- 65) SOLOW,R.M., Resources and growth. **American Economics Ver..** v.68, p.5-11, 1978.
- 66) KAUFMANN, R.K. The economic multiplier of environmental life support: can capital substitute for a degraded environment. **Ecological Economics**, v.12, p.67-79, 1995.

- 67) KAUFMANN, R.K. A biophysical analysis of the energy/real gdp ratio: implications for substitution and technical change. **Ecological Economics**, v.6, p.35-56, 1996.
- 68) Le TÉNO , J.F.E CHEVALIER, J.L., LCA, with ill-defined data and its application to building products. **International journal of LCA**, v.1, n.2, p.90-96, 1996.
- 69) vanLonn, G. W. , Duffy, S.J. **Environmental chemistry- a global perspective**. Avon: Oxford University Press, 1ª reimpressão, 2001, cap. 8.
- 70) BAIRD, C. **Environmental chemistry**. 2. ed. New York: W. H. Freeman and Co, 1999. cap. 4.
- 71) IPCC. Apresenta dados a respeito de mudanças climáticas e impactos ambientais. Disponível em <www.IPCC.org> em Climate Change 2001: Appendix 1, Glossary. Acesso: em 28 abr. 2003.
- 72) IPCC. Apresenta dados a respeito de mudanças climáticas e impactos ambientais. Disponível em <www.IPCC.org> em Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability , cap.1. Acesso: em 28 abr. 2003.
- 73) CHATFIELD, H. **Atmospheric composition, mixing and ozone destruction**. In ERNEST, W.G. Earth Systems: Processes and Issues. USA:Cambridge University Press, cap.13, 2000.
- 74) IPCC. Apresenta dados a respeito de mudanças climáticas e impactos ambientais. Disponível em <www.IPCC.org> em Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, cap.2. Acesso: em 28 abr. 2003.
- 75) ESPARTA, R. **Captura de CO₂ oportunidades**. São Paulo, Universidade de São Paulo, 14 Nov. 2003./ Palestra conferida na EPUSP.

- 76) ANP. Apresenta dados e estatística de gases. Disponível em www.anp.gov.br. Acesso: em maio 2003.
- 77) SAKAMOTO, Y.; TONOOKA, Y.; YANAGISAWA, Y. Estimation of energy consumption for each process in the Japanese steel industry: a process analysis. **Energy Conversion & Management**, v. 40, p.1129-1140, 1999.
- 78) AUDUS, H. IEA Greenhouse Gas R&D Programme: Full Fuel Cycle Studies. **Energy Conversion & Management**, v.37, n.6-8, p.837-842, 1996.
- 79) BIRAT, J.-P.; ZAOUI, A. Le Cycle du Fer ou le recyclage durable de l'acier. **La Revue de Métallurgie-CIT**, Oct. 2002.
- 80) TPHILIPP, J. A. **Steel industry and the environmental Steel for sustainable development**, - IISI – jun 16-17 Estocolmo, Suécia, Anais pp1-17
- 81) BANDYOPADHYAY, D. SANTOS, A. A.; ASSIS, P. S. Some considerations about process to profit waste in iron and steelmaking. In: **Environmental Industrie: EMOMAMI –98**. Bhubaneswar, India, 1998.
- 82) WORRELL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N. Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel sector. **Energy**, v.26, p.513-536, 2001.
- 83) SZEKELY, J. A research program for the minimization and effective utilization of steel plant wastes. **I&SM**, p.25-29, jan 1995.
- 84) van Veen, M. C., The steel industry's role in sustainable development, **Encosteel – Steel for sustainable development**, - IISI – jun 16-17 Estocolmo, Suécia, Anais pp11-17

- 85) MICHAELIS, P.; JACKSON, T. Material and energy flow through the UK iron and steel sector. Part 1: 1954-1994. **Resources, Conservation and Recycling**, v.29, p.131-156,2000.
- 86) MICHAELIS, P.; JACKSON, T. Material and energy flow through the UK iron and steel sector. Part 2: 1994-2019. **Resources, Conservation and Recycling**, v.29, p.209-230,2000.
- 87) MARUKAWA, K.; EDWARDS, K. L. Development of iron and steel into eco-material, **Materials and Design**, v.22, p.133-136,2001.
- 88) WRONA, L.M. Pollution prevention in the steel industry – Toward a zero waste plant. **Iron and Steel Engineer**, June 1997.
- 89) COMMITTEE ON ENVIRONMENTAL AFFAIRS AND COMMITTEE ON TECHNOLOGY Aspects of Steel Recycling. International Iron and Steel Institute – cap.6, Bruxelles, 1995.
- 90) INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, **Methodology Report**. Belgium, Appendix 5, 1997.
- 91) RUTH, M. Technology change in US iron and steel production – Implications for material and energy use, and CO₂ emissions. **Resources Policy**, v.21,n.3, p.199-214,Sep. 1995.
- 92) LOMBARDI, L. LCA and ELCA of a semi-closed gas turbine cycle with CO₂ chemical absorption. **Energy Conversion & Management**, v.42 p.102-114, 2001.
- 93) BRETZ,R.,FANKHAUSER,P., Life cycle assessment of chemical production processes: a tool for ecological optimization. **CHIMIA**, v.51 p.213-217, 1997.

- 94) ARESTA, M., TOMMASI, I. Carbon dioxide utilization in the chemical industry. **Energy Conversion & Management**, v.38, p.373-378, 1997.
- 95) OPHUS, E., DIGEMES, V. Life-Cycle Assessment of na alkyd emulsion: improvement in environmental performance. **Jocca – Surface Coatings International**, v.79, p.156-159, 1996.
- 96) DOBSON, I.D., Life-cycle assessment for painting process: putting the voc issue in perspective. **Progress in Organic Coatings**, v.27, p.55-58, 1996.
- 97) JUNGBLUTH, N. KOLLAR, M. e KOß, V., Life cycle inventory for cooking. **Energy Policy**, v.25, n.5, p.471-480, 1997.
- 98) MOHEE, R. e BEEHARRY, R. P., Life cycle analysis of compost incorporated sugarcane bioenergy systems in Mauritius. **Biomass & Energy**, v.17, p.73-83, 1999.
- 99) KRAMER, K. J. MOLL, H.C. e NONHEBEL, S., Total greenhouse gas emission related to the Dutch crop production system. **Agriculture ecosystems & environment**, v.72, p.9-16, 1996.
- 100) TAHARA et al. Evaluation of CO₂ payback time of power plants by LCA. **Energy Conversion & Management**, v.38, p.615-620, 1997.
- 101) MARTIN, J. A., A total fuel cycle approach to reducing. **Solar Energy**, v.59, n.4-6, p.195-203, 1997.
- 102) STEELE, N.L.C., ALLEN, D.T. Life cycle assessment- Na abridged life-cycle assessment of electrivehicle batteries. **Environmental Science Technology**, v.32, p.40-46, 1998.

- 103) SCHWEIMER, G.W. E SCHUCKERT, M. Life Cycle Inventory of a Golf. In: IISI- LCA Seminar. Stockholm 18- 19 June 1997. **Anais**. Stockholm, 1997. p.1-22.
- 104) MILDENBERGER, U. e KHANE, A., Planning for an environment-friendly car. **Technovation**, v.10, p.205-214, 2000.
- 105) ERIKSSON, E. BILINGE,M., LOVGREN, G. Life cycle assessment of the road transport sector. **The Science of the Total Environment**, v. 190 p.69-76, 1996.
- 106) HACKNEY,J. , de NEUFVILLE, R., Life cycle model of alternative fuel vehicles: emissions, energy, and cost trade-offs. **Transportation Research part A**, v.32, p.243-266, 2001
- 107) GRIFFIN,A. A clean technology approach for nuclear fuel reprocessing. **Journal of Chem. Technol. Biot**, v. 64 p.361-366, 1997.
- 108) YOUNG, S.B., Materials in LCA. In: Curran, M.A. , **Environmental Life-Cycle Assessment**, New York: Ed McGraw-Hill, 1996, cap.10.
- 109) CHUBBS, S.T., ATEINER, B.A., Life-Cycle Assessment in the steel industry. **Environmental Program**, v.17, p.922-935, 1998.
- 110) YOUNG, S. B. E VANDERBURG, W. H., Applying Environmental Life-Cycle Analysis to Materials. **JOM**, v.46, n.4, p.22-27, 1994.
- 111) ROBERTSON, J.G.S. et al. Analysis of lead/acid battery life cycle factors: their impact on society and the lead industry. **Journal of Power Sources**, v.67, p.225-236, 1997.
- 112) FINKBEINER, M. HOFFMANN, G. KREISEL, G., The functional unit in the life cycle inventory analysis of degreasing processes in

the metal-processing industry. **Environmental Management**, v.21, p.635-642, 1997.

113) MACDONALD, D. DONNER, J. e NIKIFORUK, A. Full fuel emission analysis for electric power generation options and its application in a market-based economy. **Energy Conversion & Management**, v.8, p.601-606, 1997.

114) MORRIS, J. e CANZONERI, D. Comparative lifecycle energy analysis: theory and practice. **Resources, Conservation and Recycling**, v.11, p.25-29, 1992.

115) FURUHOLD, E. Life cycle assessment of gasoline and diesel. **Resources, Conservation and Recycling**, v.14, p.251-263, 1995.

116) DENNISON, F.J. et al. Life Cycle Assessment: comparing strategic options for the mains infrastructure – part I. **Water Science Technology**, v.39, n.10-11, p.315-319, 1999.

117) RAFASCHIERI, A. et al. Life Cycle Assessment of electricity production from poplar energy crops compared with conventional fossil fuels. **Energy Conversion & Management**, v.40, p 1477-1493, 1999.

118) KEOLEIAN, G. E MENEREY, D., Sustainable development by design: review of life cycle design and related approaches. **Air and Waste**, v.44, p.645-668, May 1994.

119) NAGEL, C.E MEYER, P. , Caught between ecology and economy: end-of-life aspects of environmental conscious manufacturing. **Computers & industrial engineering**, v.36, p.781-792, 1999.

120) CALLIHAN, J. Life Cycle Engineering and Design . **Anais do CIRP**. v.44, fev. 1995.

- 121) ASSIES, J.A., A risk approach to life-cycle impact assessment. **Journal of Hazardous Materials**. v. 61, p.23-29, 1998.
- 122) CIRONE, P. A. E DUNCAN, P. B. Integrating human health and ecological concerns in risk assessments. **Journal of Hazardous Materials**, v. 78, p.1-17, 2000.
- 123) NAVNCHANDRA, D. Design for environmentalability. Design Theory and Methodology. **ASME, DE** v.31, p.119-125, 1991.
- 124) AZAR, C. HOLMBERG, J. e LINDGREN, K. Socio-ecological indicators for sustainability. **Ecological Economics**, v.18, p.89-112, 1996.
- 125) AYRES, R.U., Statistical measures of unsustainability. **Ecological Economics**, v.16, p.239-255, 1996.
- 126) XIAO, D et al, Sequent and accumulative life cycle assessment of materials and products. **Materials and Desing**, v.22, p.147-149, 2001.
- 127) KASAI, J. , Life cycle assessment, evaluation method for sustainable development. **JSAE Review**, v.20, p.387- 393, 1999.
- 128) BIZEC, R-F., **IISI's Ici project: an initial report on methology, scope and conclusions**, ENCOSTEEL – steel for sustainable development, Suécia 16-17 Jun 1997, p.1-5.
- 129) Informações e dados estatísticos sobre aço. <www.worldsteel.org> Acesso em: janeiro de 2003.
- 130) COSIPA, São Paulo. Apresenta dados e informações a respeito de aço. Disponível em: <<http://www.cosipa.com.br/secao/0,1576,17-816,00.html>>. Acesso em: 01 de dez. 2003.

131) COMMITTEE ON ENVIRONMENTAL AFFAIRS AND COMMITTEE ON TECHNOLOGY Aspects of Steel Recycling. International Iron and Steel Institute – cap.1, Bruxelles, 1995.

132) BRIMACOMBE, L. , IISI LCI Project Overview. In: IISI-LCA Seminar 18-19 junho 1997, Stockholm, Sweden. **Anais** . Stockolm: IISI-LCA, 197. p23-27.

133) FENTON, M.D. **Flow studies for recycling metal commodities in the united states. Iron and steel recycling in the United States in 1998.** USA: U.S. Geological Survey, 2001 (Circular 1196-G).

134) Metalurgia & Materiais, v.56, n.495, p.80, fev 2001.

135) Metalurgia & Materiais v. 57, n.512, p.453 ago 2001.

136) PRÜM, N. Life Cycle Inventory. Issues of data collection and presentation. In: IISI- LCA Seminar. Stockholm 18- 19 June 1997. **Anais**. Stockholm, 1997. Session 2.

137) JEAN-BAPTISTE,P.; DUCROUX, R. Potentiel des méthodes de séparation et stockage du CO₂ dans la lutte contre l'effet de serre. **Comptes Rendus Geosciences**, v.335, n.6-7, p.611-625, June2003.

138) HU, E. CO₂ credit or energy credit in emission trading? **Energy Policy**,v.30, p.263-265, 2002.

139) MOREIRA, J.R., SERRASQUEIRO, M.A. A bun paper: strategies for biomass implementation. **Network News – Biomass Users Network**, v.8,n.1,p.9-10, jan-feb, 1994.

140) ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO, 2001 p243.

141) GIELEN, D. CO₂ removal in the iron and steel industry. **Energy Conversion and Management**, v.44, n.7, p.1027-1037, 2003.