

LUIZ ALEXANDRE KULAY

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE ANÁLISE DE CICLO
DE VIDA ADEQUADO ÀS CONDIÇÕES BRASILEIRAS -
APLICAÇÃO AO CASO DO SUPERFOSFATO SIMPLES**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientador:
Gil Anderi da Silva

SÃO PAULO

2000

**Aos Profs. Drs. Luiz Kulay Júnior e Maria Nice Caly Kulay
por terem me transmitido os ensinamentos mais
preciosos que alguém pode receber ...
por terem me ensinado lições de vida ...
"Obrigado Papai ... Obrigado Mamãe ..."**

LUIZ ALEXANDRE KULAY

**DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE ANÁLISE DE CICLO
DE VIDA ADEQUADO ÀS CONDIÇÕES BRASILEIRAS -
APLICAÇÃO AO CASO DO SUPERFOSFATO SIMPLES**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia.

SÃO PAULO

2000

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Gil Anderi da Silva por ter sido em muitos momentos mais que orientador, contribuindo decisivamente tanto para minha formação acadêmica quanto pessoal.

Ao Professor Guglielmo Taralli pelas importantes sugestões, e pelo incentivo permanente.

Ao Professor Lyrio Sartório pela influência marcante em minha formação profissional.

Ao Engenheiro Moacir Ferreira da Silva, pela valiosa contribuição na coleta de dados e levantamento de informações.

À Maria Elizete Alves Monteiro, Graça, Sônia, Simone e Alexandre pelo tratamento sempre especial e pelo incentivo constante.

À Maria Cristina Olaio Villela, Maria Lúcia, Marília, Maria e Edgard pela atenção, gentileza e prestatividade e incentivo permanentes.

A Gabriela Gastaldo Badolato pelo incentivo e pelos conselhos valiosos na elaboração do trabalho.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

A Deus, por ter estado sempre junto a mim, me amparando nos momentos de maior ansiedade e desolação.

SUMÁRIO

Lista de tabelas	i
Lista de figuras	ii
Resumo	iii
"Abstract"	v
I INTRODUÇÃO	1
II REVISÃO DA LITERATURA	7
II.1 Análise de Ciclo de Vida - ACV	7
II.1.1 Metodologia de ACV	10
II.1.1.1 Definição de objetivos e escopo	10
II.1.1.2 Elaboração do inventário	11
II.1.1.3 Avaliação de impactos ambientais	13
II.2 Fertilizantes fosfatados	14
II.2.1 Superfosfato simples	18
II.3 Ciclo de vida do SSP	19
II.3.1 Lavra da rocha fosfática	19
II.3.2 Beneficiamento	20
II.3.3 Fabricação de ácido sulfúrico a partir de enxofre	22
II.3.4 Produção de superfosfato simples	23
III OBJETIVOS	25
IV METODOLOGIA	26
V DISCUSSÃO	27
V.1 Definições	30
V.1.1 Definição de objetivos	30
V.1.2 Definição do escopo do sistema	32
V.1.2.1 Definição de fronteiras do sistema	32
V.1.2.2 Aplicação de critérios de exclusão de unidades de processo	33
V.1.3 Definição de função e de unidade funcional	35

V.1.4	Definição dos critérios de alocação	37
V.1.5	Definição de critérios de significância ambiental	40
V.2	Realização do inventário do ciclo de vida	41
V.2.1	Preparação para a coleta de dados	41
V.2.1.1	Elaboração de fluxogramas	42
V.2.1.2	Elaboração de critérios de exclusão de aspectos ambientais	43
V.2.1.3	Definição de critérios de qualidade de dados	44
V.2.2	Coleta de dados	47
V.2.2.1	Formulário de coleta de dados	47
V.2.2.2	Fontes de informação	48
V.2.2.3	Uso de dados específicos e dados agregados	49
V.2.2.4	Substituição de dados primários	49
V.2.2.5	Aspectos ambientais de entrada e saída de um sistema	50
V.2.2.5.1	Aspectos ambientais de entrada	50
V.2.2.5.1.1	Recursos materiais renováveis e não renováveis	51
V.2.2.5.1.2	Recursos energéticos	52
V.2.2.5.2	Aspectos ambientais de saída de um ICV	53
V.2.2.5.2.1	Emissões atmosféricas	54
V.2.2.5.2.2	Efluentes líquidos	54
V.2.2.5.2.3	Resíduos sólidos	55
V.2.3	Normalização de valores	56
V.2.4	Aplicação de critérios de alocação	57
V.3	Realização da avaliação de impactos de ciclo de vida	58
V.3.1	Classificação	58
V.3.2	Caracterização	61
V.3.3	Valoração	62
V.4	Recomendações gerais	63
VI	MODELO DE ACV ADEQUADA A CONDIÇÃO BRASILEIRA	65
VI.1	Definições	65
VI.1.1	Definição de objetivos	66
VI.1.2	Escopo do sistema	66
VI.1.2.1	Definição das fronteiras do sistema	66

VI.1.2.2	Aplicação de critérios de exclusão	67
VI.1.3	Definição da função e da unidade funcional	67
VI.1.4	Definição de critérios de alocação	68
VI.1.5	Definição de critérios de significância ambiental	69
VI.2	Realização do inventário de ciclo de vida	69
VI.2.1	Preparação para a coleta de dados	70
VI.2.1.1	Elaboração de fluxogramas	70
VI.2.1.2	Definição de critério de exclusão de aspectos ambientais	73
VI.2.1.3	Definição de critérios de qualidade dos dados	75
VI.2.2	Coleta de dados	76
VI.2.3	Normalização de valores	81
VI.2.4	Alocação	84
VI.3	Classificação	85
VI.3.1	Classificação	85
VI.3.2	Caracterização	87
VI.3.3	Atribuição de pesos	94
VII	ESTUDO DE CASO	97
VII.1	Definições	97
VII.2	Realização do inventário de ciclo de vida	98
VII.2.1	Elaboração de fluxogramas do processo	98
VII.2.2	Descrição de aspectos ambientais	104
VI.2.2.1	Consumo de recursos energéticos	104
VI.2.2.2	Emissões atmosféricas	105
VI.2.2.1	Efluentes líquidos	105
VI.2.2.4	Resíduos sólidos	106
VI.2.3	Coleta de dados	107
VI.2.3.1	Lavra da rocha fosfática	107
VI.2.3.2	Beneficiamento da rocha fosfática	109
VI.2.3.3	Produção de ácido sulfúrico	113
VI.2.3.4	Manufatura de SSP	117
VI.2.3.5	Unidade de processo de transporte	121
VI.2.4	Normalização de valores	124

VII.3 Realização de avaliação de impactos	126
VII.3.1 Classificação	126
VII.3.2 Caracterização	127
VIII CONCLUSÕES	129
ANEXOS	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138

LISTA DE TABELAS

Tabela VI.1 -	Tabela de valores normalizados para a manufatura do óleo de soja.	81
Tabela VI.2 -	Tabela bruta de aspectos ambientais para a produção de óleo de soja.	82
Tabela VI.3 -	Tabela consolidada de valores para sistema de produção de óleo de soja.	86
Tabela VI.4 -	Principais impactos , indicadores e bases de referência.	90
Tabela VI.5 -	Perfil ambiental da produção de óleo de soja.	92
Tabela VI.6 -	Normalização para produção de óleo de soja.	93
Tabela VI.7 -	Tipos de fatores de peso.	96
Tabela VII.1 -	Aspectos ambientais para a lavra da rocha fosfática.	107
Tabela VII.2 -	Aspectos ambientais para o beneficiamento da rocha fosfática.	110
Tabela VII.3 -	Balanço de água do beneficiamento.	112
Tabela VII.4 -	Aspectos ambientais para a produção de H_2SO_4 (100 %).	114
Tabela VII.5 -	Distribuição de fluxos de energia.	115
Tabela VII.6 -	Aspectos ambientais para manufatura do SSP (18,2 % P_2O_5).	118
Tabela VII.7 -	Aspectos ambientais do transporte da rocha fosfática.	122
Tabela VII.8 -	Aspectos ambientais do transporte do concentrado fosfático.	124
Tabela VII.9 -	Tabela consolidada de valores para a produção de 1,0 t de SSP.	125
Tabela VII.10 -	Associação de aspectos ambientais e seus respectivos impactos	127
Tabela VII.11 -	Caracterização de aspectos ambientais do SSP.	128

LISTA DE FIGURAS

Figura V.1 -	Relação entre as fases da ACV.	28
Figura VI.1 -	Fluxograma geral do sistema estabelecido para o óleo de soja.	72
Figura VI.2 -	Fluxograma detalhado da unidade.	74
Figura VI.3 -	Exemplo de formulário de informação para coletas de dados de ICV.	77
Figura VI.4 -	Processo de classificação de aspectos ambientais aos seus impactos associados.	88
Figura VI.5 -	Formação do indicador global.	95
Figura VII.1 -	Fluxograma geral do sistema em estudo.	99
Figura VII.2 -	Fluxograma da unidade do processo de lavra da rocha fosfática.	100
Figura VII.3 -	Fluxograma da unidade de processo de beneficiamento da rocha.	101
Figura VII.4 -	Fluxograma da unidade de processo de produção de ácido sulfúrico.	102
Figura VII.5 -	Fluxograma da unidade de processo de manufatura de superfosfato simples.	103

RESUMO

A noção de que o consumo de produtos manufaturados atinge adversamente o suprimento de recursos e a qualidade do meio ambiente fez com que o mercado consumidor exigisse das corporações e dos organismos reguladores medidas mais eficientes quanto a preservação da Natureza. Através de iniciativas como essa renasceu um instrumento de gestão ambiental conhecido por Análise de ciclo de Vida -ACV.

A ACV é uma metodologia criada para identificar aspectos ambientais e quantificar seus impactos associados, ao longo de todo seu ciclo de vida, ou seja, desde a extração de matérias-primas, até a disposição final do produto, novamente no meio natural.

Seu uso auxilia na priorização de ações de melhoria visando a prevenção da poluição, permitindo uma alocação mais adequada de recursos materiais, humanos e econômicos. Além disso, estimulariam o aumento da competência e favoreceriam a inovação tecnológica, considerando sempre a relação custo-benefício envolvida.

O objetivo desse trabalho é propor um modelo de ACV que seja adaptado às condições brasileiras. Para a comprovação do modelo, foi estudado o caso de produção de um fertilizante fosfatado – superfosfato simples.

Verificou-se que por ser a ACV uma metodologia amplamente dependente de dados precisos e confiáveis, a indisponibilidade de bancos de dados genuinamente nacionais limita em muito seu raio de aplicação no país.

Entretanto, foi possível constatar também, que mesmo diante dessa limitação, o uso da ACV amplamente aplicável na prática, principalmente no que se refere a hierarquização de ações de melhoria de desempenho ambiental de um produto.

Verificou-se ainda que o ciclo de vida de manufatura do superfosfato simples não traz impactos significativos sobre o meio ambiente.

Suas maiores contribuições em termos de impactos ambientais são relativas ao Aquecimento Global – dada a predominância de transporte rodoviário no país – a Eutrofização – em função das constantes perdas de processo – e a redução do espaço físico, motivada pela elevada geração de resíduos sólidos por ocasião da etapa de beneficiamento da rocha fosfática.

ABSTRACT

The society is actually convinced that the manufactured products bring problems to the Nature, mainly, in terms of resource depletion and environment quality.

This posture, make the government and the corporations change their ways to deal with environmental management.

In this picture, appeared again the life cycle assessment.

LCA is a tool used to identify environmental damage, and evaluate it's proportion,. From the cradle to grave of a product.

Besides, LCA can support improvement actions, in the way of the pollution prevention, permitting the allocation of material, human and economic resources.

The goal of this scientific work is to propose a model of life cycle assessment specific to the brasilian condition.. To test the model it was studied the manufacturing life cycle from the single superphosphate.

The main conclusion's were that, even with deep limitation in term of databases extricate from Brazil, limited the use of the methodology to qualitative conclusions.

On the other side, ,the model, even needing some sets, proved being useful in practical studies.

In term of superphosphate, the most significative environmental impacts are Global Warming,, because of the material transportation in Brazil is basicallly by road - do the Nitrification, because the losses of the process.

In general, the single superphosphate has, in reality low environmental profile.

I - INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos 20 anos, a questão ambiental tem despertado grande interesse na sociedade. O mercado consumidor, torna-se a cada dia mais consciente de que o consumo de produtos manufaturados e o uso de serviços afetam adversamente o suprimento de recursos naturais e a qualidade do meio ambiente.

Além disso, esses efeitos ocorrem ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, o que inclui a produção, consumo e disposição final do mesmo, agora na forma de rejeito. Esta noção, levou o consumidor comum a ter maior preocupação com preservação da Natureza, e conseqüentemente, a exigir medidas mais eficazes neste sentido.

Desta forma, os órgãos ambientais e o segmento industrial passaram a intensificar o desenvolvimento e a aplicação de métodos que permitissem identificar e reduzir os efeitos adversos causados por estas atividades. Uma das técnicas em desenvolvimento, criada exclusivamente com esse propósito é a Análise de Ciclo de Vida – ACV.

A Análise de Ciclo de Vida permite avaliar aspectos ambientais e os impactos a eles associados, não apenas quanto à fabricação, mas ao longo de todas as etapas do ciclo de vida de um produto; ou seja, do berço – extração dos recursos naturais materiais e energéticos necessários a todas as etapas de sua produção - ao túmulo – disposição final do produto com rejeito, após seu uso ter sido esgotado.

Desta forma, pode ser usada para identificar e avaliar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental de processos e produtos.

Além disso, presta-se à comparação entre produtos de mesma aplicação no mercado, ao projeto de novos produtos - menos impactantes para o meio ambiente - e à avaliação de opções de gerenciamento de recursos visando a criação de sistemas sustentados.

Em termos históricos, pode-se dizer que a Análise de Ciclo de Vida é uma técnica bastante recente em todo o mundo.

Os primeiros registros de trabalhos neste campo datam da segunda metade da década de 60, quando algumas organizações, preocupadas com os impactos ambientais causados durante a manufatura das embalagens que acondicionavam seus produtos, decidiram patrocinar estudos dessa natureza.

Segundo CHEHEBE (1998), na crise energética de 1974 o uso da ACV foi bastante difundido na busca de fontes alternativas de energia em substituição ao petróleo. Nesta época, entretanto, a diversidade de padrões e critérios para a aplicação da metodologia, aliada à falta de bancos de dados amplos e confiáveis, como também, aos elevados custos envolvidos, resultaram em muitos casos na manipulação de seus resultados. Desta forma a ACV caiu em descrédito perante a comunidade científica, seguido do conseqüente abandono de seu uso.

Os centros de estudo de ACV, porém, persistiram em seu desenvolvimento buscando aprimorar estes pontos deficientes, com a finalidade de torná-la um procedimento confiável e exequível.

O cenário econômico do final dos anos 80, onde as grandes empresas optaram por posturas mais agressivas, tentando demonstrar a superioridade ambiental de seus produtos perante seus concorrentes imediatos foi favorável ao ressurgimento da ACV.

Agora remodelada, esta técnica tornou-se uma alternativa bastante atraente para a indústria de maneira geral, cujas preocupações em termos ambientais não mais se restringem exclusivamente a etapa de manufatura de produtos, mas ao ciclo de vida como um todo.

O grupo de Prevenção de Perdas e a ACV

O grupo de Prevenção da Poluição do Departamento de Engenharia Química da EPUSP, decidiu fazer do tema a sua primeira linha de pesquisa.

As razões que motivaram esta decisão, estão ligadas ao caráter estratégico assumido pela ACV nos contextos de gestão ambiental e prevenção da poluição, assim como, ao ineditismo desta técnica no Brasil.

Ao se aprofundar no tema, o grupo percebeu que os resultados obtidos pela ACV auxiliariam na priorização de ações de melhoria visando a prevenção da poluição, permitindo uma alocação mais adequada de recursos materiais, humanos e econômicos. Além disso, estimulariam o aumento da competência e favoreceriam a inovação tecnológica, considerando sempre a relação custo-benefício envolvida.

A estruturação da linha de pesquisa de ACV foi elaborada segundo duas vertentes. A primeira, com objetivo de estabelecer bancos de dados nacionais para os produtos, processos e atividades desenvolvidos no Brasil.

Os bancos de dados detém informações sobre recursos materiais (alumínio, PVC, água, etc.), recursos energéticos (como energia hidroelétrica) e atividades (por exemplo transporte rodoviário), que são comuns aos ciclos de vida de diversos produtos, podendo portanto serem aproveitados em mais de um estudo de ACV.

A segunda vertente da linha de pesquisa, voltada para a realização de estudos e desenvolvimentos aplicados de ACV, pretende preencher a lacuna existente hoje em nosso país.

Aproveitando a experiência adquirida ao longo dos anos junto ao setor de fertilizantes, o grupo decidiu elaborar um projeto para comparação em termos ambientais, das rotas úmida e térmica de fabricação de fertilizantes fosfatados.

Além de determinar a rota ambientalmente mais correta, o estudo possibilitará também a identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental ao longo dessas vias de processamento.

O projeto foi dividido em três sub-projetos:

- ACV do Termofosfato;
- ACV do Superfosfato Triplo (TSP); e
- ACV do Superfosfato Simples (SSP).

O termofosfato é reconhecido pelos especialistas como um dos fertilizantes fosfatados mais adequados às condições agrícolas brasileiras. Entretanto, sua produção - realizada através da rota térmica - merece ser avaliada em termos ambientais, por ser notadamente grande consumidora de energia.

A rota úmida será estudada através dos ciclos de vida de produção do Superfosfato Triplo e Superfosfato Simples.

A produção do TSP passa pela fabricação de ácido fosfórico, onde são geradas grandes quantidades de fosfogesso, um rejeito desse processamento constituído por sulfato de cálcio.

O fosfogesso é um produto de pequena aceitação de mercado, sendo disposto em sua grande maioria na forma de resíduo sólido, o que traz impactos ambientais significativos como a ocupação de grandes áreas e contaminação de lençol freático.

O SSP, é um fertilizante fosfatado que apresenta teor de fósforo similar ao do termofosfato, cerca de 20%, sem no entanto gerar fosfogesso ao longo de sua fabricação.

O sub-projeto do SSP foi escolhido como o primeiro a ser desenvolvido, considerando ser o objetivo principal deste, o desenvolvimento de um modelo de execução de ACV, adaptado às condições brasileiras. A justificativa para tal decisão está no fato de ser o SSP o menos polêmico dos três fertilizantes, do ponto de vista ambiental.

O modelo a ser desenvolvido, e que será utilizado nos demais sub-projetos, corresponde ao tema da presente dissertação de mestrado.

II - Revisão da Literatura

Para o presente trabalho de dissertação, a revisão da literatura foi conduzida em três etapas: na primeira, foram levantados os conceitos que fazem parte da metodologia de Análise de Ciclo de Vida.

Em um segundo momento, faz-se a avaliação dos elementos que compõe o ciclo de vida do Superfosfato Simples, desde a extração de recursos naturais até a sua manufatura.

Na última etapa, promoveu-se a união das duas primeiras etapas, levantando-se informações sobre o ciclo de vida do SSP. Apresenta-se a seguir o produto dessa revisão.

II.1 - Análise de ciclo de vida - ACV

A gestão ambiental tem se demonstrado como o mais eficiente – para não dizer o único – mecanismo visando a melhoria do desempenho ambiental das organizações. Os ganhos que têm sido referidos por diferentes empresas que têm aplicado a gestão ambiental são: melhoria de imagem, vantagem competitiva, aumento de produtividade, redução de custos e aumento de receita.

A adoção de sistemas de gestão ambiental pelas empresas, de acordo com as normas da série ISO 14000, emanadas da International Standard Organization – ISO, as torna elegíveis para a certificação pela norma ISO 14001, permitindo maior visibilidade à preocupação da organização com o meio ambiente (SILVA, 1998). Dentro da série ISO 14000, uma dos mais modernos procedimentos de gestão ambiental é a Análise de Ciclo de Vida.

Em termos gerais, a ACV pode ser definida como uma metodologia técnico-científica capaz de avaliar impactos ambientais gerados por um produto, grupo de produtos ou materiais, desde o berço até o túmulo; isto é, desde a extração de matérias-primas da Terra, ou biota, até a disposição final do produto, após o seu uso (CONSOLI, 1993).

Segundo CHRISTIANSEN (1996), ACV é uma compilação de diferentes metodologias de avaliação, a ser empregada no projeto de novos produtos, ou na reavaliação de produtos já consagrados com o objetivo de orientar seu reprojeto, visando estabelecer possibilidades de redução de impacto.

Este mesmo autor pondera que, mesmo sendo ACV uma técnica eficiente de avaliação de impactos ambientais, não será apenas através dela que todas as dificuldades das empresas ou agências governamentais reguladoras quanto a matéria ambiental venham a ser solucionadas.

CONSOLI (1993) complementa este raciocínio apontando que outras técnicas de avaliação ambiental, como Avaliação de Minimização de Rejeitos, Estudos de Impacto Ambiental – EIA e Análise de Risco ou Avaliação de Riscos e Perigos Ambientais, são ainda necessárias para que sejam atingidos bons resultados através do uso da ACV. Este autor relata ainda que simpósio organizado pela Society of Environmental Toxicology and Chemistry – SETAC - sociedade norte-americana dedicada ao estudo de problemas causados pelos impactos de atividades humanas sobre o meio ambiente, e um dos maiores centros de estudos de ACV no mundo – estabeleceu os seguintes objetivos gerais para a realização de uma ACV:

- fornecer uma imagem instantânea, tão fiel quanto possível, de quaisquer interações existentes com o meio ambiente;
- contribuir para o entendimento da natureza global e interdependente das conseqüências ambientais das atividades humanas, e
- gerar subsídios que permitam definir os efeitos ambientais dessas atividades e identificar oportunidades para melhorias de desempenho ambiental.

Neste mesmo fórum identificou-se que os procedimentos sistemáticos da ACV, vieram a facilitar um diálogo construtivo entre os diferentes setores da sociedade, no que diz respeito à qualidade ambiental.

Para CURRAN (1996), a disputa por mercados consumidores em alguns setores industriais, fez da comparação entre produtos, objeto de uso regular da ACV. Entretanto, este mesmo autor também evidencia a influência exercida pela ACV sobre outras técnicas que orientam a seleção de opções para projeto, principalmente, quanto a busca de materiais e formas alternativas de energia, minimização de perdas de processo e concepção de produtos menos agressivos ao meio ambiente.

Esta tendência é confirmada por HIGGINS (1995), ao citar a iniciativa de grandes corporações como AT&T, General Eletric, IBM, DEC, Procter & Gamble, Whirlpool, e Xerox, em usar a ACV durante a etapa de projeto de seus processos de manufatura, tendo como resultado significativa melhoria de desempenho tanto em termos de gestão ambiental, como de aceitação de seus produtos junto ao mercado.

II.1.1 - Metodologia de ACV

A ACV estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais gerados ao longo do ciclo de vida do produto, desde a aquisição de matérias primas, através da produção, uso, até sua disposição final (ISO 14040, 1997). Assim, a realização de uma ACV compreende as seguintes etapas:

- definição de objetivos e escopo;
- realização do inventário;
- avaliação de impactos ambientais;

II.1.1.1 - Definição de objetivos e escopo

Os objetivos e o escopo de um estudo de ACV devem ser claramente definidos e estar de acordo com a aplicação que se pretendem (UNEP, 1996).

O objetivo de uma ACV deve expressar de maneira não ambígua a aplicação pretendida, os motivos para a realização do estudo e o público a que se destina.

A definição do escopo do trabalho deve ser feita de maneira a assegurar que a extensão e a profundidade do estudo sejam compatíveis e suficientes para atender aos objetivos propostos (ISO 14040, 1997).

Para a definição do escopo são considerados aspectos como: produto a ser estudado, unidade funcional, as fronteiras do sistema, a forma e qualidade dos dados, o tipo de impactos e a metodologia de avaliação.

Entende-se por unidade funcional uma quantidade ou base de cálculo, à qual as entradas e saídas do sistema em estudo devam ser referenciadas.

O estabelecimento de fronteiras vai delimitar a porção do ciclo de vida do produto que será objeto de estudo da ACV. Este dimensionamento também será feito em função dos objetivos a que o estudo se destina. Este conceito pode ser estendido para os critérios de qualidade de dados e para os tipos de impactos, bem com suas formas de avaliação.

A ACV é uma técnica iterativa; portanto, o escopo do estudo pode sofrer modificações ao longo de seu desenvolvimento, caso uma informação adicional seja acrescentada.

II.1.1.2 - Elaboração do inventário

O segundo estágio de um processo de ACV é denominado Inventário de Ciclo de Vida - ICV. A elaboração de um ICV abrange todas as etapas que compõem o sistema de produto em análise (VIGON, 1993).

Durante o ICV, são portanto avaliadas, as operações de aquisição de recursos materiais e energéticos a partir do meio ambiente, sua transformação em componentes intermediários e a conversão desses no produto principal em estudo, ou em quaisquer outros produtos também resultantes destas operações, aqui chamados de subprodutos. Outras atividades não menos importantes a serem consideradas nesta etapa do estudo são o transporte de insumos, de materiais auxiliares e do produto final manufaturado, bem como o uso e a disposição final deste último, quando poderão estar relacionadas atividades de reciclagem, reuso ou reaproveitamento.

O ICV se inicia pela coleta dos dados que caracterizam os diversos aspectos ambientais relativos ao sistema. Entende-se por aspectos ambientais, as correntes de fluxo de recursos naturais e de rejeitos que, respectivamente, entram e saem através das

fronteiras do sistema (UNESCO, 1995). As fronteiras irão delimitar o campo para a aplicação da metodologia, determinando que operações do sistema de produto deverão ser consideradas pelo estudo.

A qualidade dos dados coletados no ICV é crucial para o bom desenvolvimento da ACV. Desse modo, a escolha das fontes de informação deve ser cuidadosamente considerada.

Os dados mais adequados para a elaboração do ICV são os chamados dados primários, que são medidos diretamente no sistema onde está sendo realizada a ACV. Entretanto, nem sempre é possível conseguir dados primários para alguns processos; nestes casos, faz-se necessário o uso de dados secundários, levantados em literatura ou junto a bancos de informação.

A existência de bancos de dados específicos e representativos é de fundamental importância nos estudos de ACV, principalmente no se refere a etapa de elaboração do inventário. A ausência de dados confiáveis e precisos levará a conclusões errôneas e, conseqüentemente, colocará em risco o processo de implementação de medidas de melhoria nelas baseado. O tipo de dado a ser coletado será definido em função dos objetivos a que cada estudo se propõe a atingir (CURRAN, 1996).

Após a operação de coleta, os dados devem passar por um tratamento de ajuste à unidade funcional, a fim de que possam ser executados balanços materiais e energéticos. São esses balanços que irão permitir quantificar os aspectos ambientais relacionados no estudo.

Concluídos os balanços, faz-se a alocação dos aspectos ambientais, ponderando-os entre o produto em estudo e os demais subprodutos gerados pelo sistema, atribuindo a cada qual, a parcela que lhe concerne.

O critério de alocação mais comum é o da ponderação das quantidades mássicas das correntes. Outros métodos conhecidos de alocação podem ser desenvolvidos em termos de massa de sólidos secos, quantidades estequiométricas ou calores de reação (VIGON, 1993).

CURRAN (1996) cita ainda como critério alternativo de alocação o uso de valor econômico. Neste caso, porém, faz-se necessária uma análise preliminar de aspectos de ordem mercadológica, sócio-econômica, regional ou de natureza equivalente, a fim de que os resultados obtidos por este critério possam expressar de maneira fiel, o comportamento do ciclo de vida em estudo.

A elaboração de um inventário de ciclo de vida é precedida da fixação de diversas de premissas, estabelecidas em função dos objetivos e escopo a que se propõem a ACV.

Desta forma, quaisquer conclusões estabelecidas da elaboração do ICV só poderão ser estendidas a outros casos de aplicação - ainda que estes tratem de produtos, processos ou atividades equivalentes - se critérios bem definidos de comparação forem adotados (ISO 14041, 1997).

O mesmo pode ser dito se modificações profundas vierem a ocorrer em uma ou mais etapas do ciclo de vida em estudo, a ponto de descaracterizá-lo quanto ao escopo original.

II.1.1.3 - Avaliação de impactos ambientais

O ICV fornece uma grande quantidade de dados a respeito de consumo de recursos naturais e de liberações para o meio ambiente que são, via de regra, de difícil interpretação. Assim, incorporou-se à metodologia de ACV, uma etapa de avaliação de

impacto, capaz de traduzir, sempre que possível, esses resultados em termos de descritores de impactos sobre a saúde humana e sobre o meio ambiente. A Avaliação de Impactos é composta das etapas de classificação, caracterização e valoração (ISO 14042, 1997).

Na etapa de classificação, os aspectos ambientais obtidos no ICV são agrupados em categorias de impacto.

Cada categoria de impacto representa um grande foco de preocupação ambiental. A escolha das categorias de impacto, é feita de acordo com os propósitos a que o estudo se destina. Eventualmente, um mesmo aspecto ambiental poderá ser agrupado em mais de uma categoria de impacto.

Os dados do inventário distribuídos nas categoria de impacto, passam então por um processo de caracterização, onde serão tratados de maneira a compor um indicador numérico. Cada indicador, reflete o impacto ambiental causado por todos os aspectos ambientais relacionados à categoria por ele representada. Juntos, todos indicadores permitirão compor o perfil ambiental relativo ao sistema de produto em estudo.

A valoração é uma etapa complementar da Avaliação de Impactos que objetiva hierarquizar os resultados obtidos nas diferentes categorias de impacto, de forma a quantificar a importância relativa entre eles.

II.2 - Fertilizantes fosfatados

A matéria-prima para a produção de fertilizantes fosfatados é a rocha fosfática. Trata-se de um recurso natural onde o fósforo apresenta-se na forma de apatita, a qual não é assimilável pelos vegetais.

Em termos de constituição geológica, a rocha fosfática pode ser de origem ígnea ou sedimentar; no Brasil, predominam as de origem ígnea, formadas a partir da consolidação do magma, sendo seu principal constituinte a fluorapatita, de fórmula estrutural $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ (SILVA, 1982).

De acordo com RÜGER (1996), o Brasil dispõe de 3,80 bilhões de toneladas em reservas de rocha fosfática, correspondentes a 400 milhões de toneladas de fósforo - cerca de 10,5%.

As principais minas de rocha fosfática hoje em lavra no Brasil, estão localizadas em Araxá, Lagamar, Tapira (todas em MG), Catalão (GO) e Jacupiranga (SP).

Em termos de produção de rocha fosfática, o Brasil ocupa atualmente o 7º lugar no cenário mundial, com uma participação de 3,1% do mercado - equivalente a 3,5 milhões de toneladas de rocha (ANDA, 1997). Cerca de 96% do consumo de rocha fosfática no Brasil destinam-se à produção de fertilizantes, ficando o restante dividido entre produção de suplemento para alimentação animal, aplicação direta no solo e outros compostos de fósforo.

Para que o fósforo possa ser assimilado pelas culturas, ele deve ser transformado da forma apatítica para uma forma na qual seja solúvel em solução edáfica; estes processos recebem o nome genérico de “solubilização do fósforo”. A indústria de fertilizantes fosfatados dispõe de duas rotas de solubilização: rota úmida e rota térmica.

A rota úmida – pela qual são produzidos cerca de 98% dos fertilizantes fosfatados do Brasil - caracteriza-se pelo ataque da rocha fosfática por um ácido mineral. Os ácidos minerais usados podem ser: ácido clorídrico, ácido sulfúrico, ácido fosfórico e ácido nítrico.

O modelo brasileiro de produção de fertilizantes fosfatados está calcado na utilização de ácido sulfúrico como agente de solubilização do fósforo (LOBO & SILVA, 1984). Esta condição confere ao Brasil o 7º lugar entre os produtores mundiais deste insumo, com uma produção de 4,5 milhões de toneladas, ou o equivalente a 3 % do mercado (ANDA, 1997).

O ataque da rocha fosfática por ácido sulfúrico pode gerar superfosfato simples (SSP), ou ácido fosfórico. A partir do ácido fosfórico podem ser produzidos os seguintes fertilizantes fosfatados:

- TSP (superfosfato triplo) - por reação com rocha fosfática;
- MAP e DAP (respectivamente fosfatos de mono e diamônio) - por reação com amônia.

Do total de fertilizantes fosfatados produzidos pela rota úmida, 56% passam pela fabricação de ácido fosfórico (CEKINSKI, 1990).

De acordo com SILVA (1982), o ácido sulfúrico pode ser obtido principalmente, a partir de enxofre elementar - seja ele natural ou recuperado - pirita ou sulfetos metálicos. Dentre essas fontes, o enxofre elementar é a mais empregada, por se tratar da matéria-prima mais econômica.

No Brasil, 85% da matéria-prima para a produção de ácido sulfúrico é importada na forma de enxofre elementar. Os 15% restantes são produzidos no país, a partir da recuperação do enxofre existente no petróleo e gás natural, ou em sulfetos de metais não ferrosos.

Na solubilização por via térmica, também chamada de via seca, a rocha fosfática passa por um tratamento térmico, com ou sem a adição de outros materiais. Esse tratamento térmico, que consiste de calcinação ou fusão, tem por objetivo destruir a

estrutura da apatita, convertendo o fósforo para uma forma disponível aos vegetais denominada de termofosfato (CEKINSKI, 1990).

O Brasil produz apenas o termofosfato magnésiano fundido, um produto obtido através da fusão de uma mistura de rocha fosfática com materiais que sejam fontes de sílica e magnésio.

Como anteriormente citado, o termofosfato é conhecido por ser um dos fertilizantes fosfatados mais adequados às condições agrícolas brasileiras. Entretanto, apesar dessa característica o termofosfato responde por apenas 2 % do total de fertilizantes fosfatados produzido no país (SILVA, 1982).

Em termos ambientais, a produção de fertilizantes fosfatados através da rota úmida e por intermédio da produção de ácido fosfórico - caso da produção de superfosfato triplo - tem como aspecto significativo a geração de fosfogesso (SILVA, 1997).

O fosfogesso - subproduto da reação de formação de ácido fosfórico - é constituído de sulfato de cálcio impregnado por contaminantes, como fluoretos, óxido de magnésio e sais de fósforo. Segundo RÜGER (1996), para cada tonelada de P_2O_5 produzido como ácido fosfórico, são geradas 4,5 toneladas de fosfogesso.

Dada a presença de contaminantes, o fosfogesso torna-se pouco competitivo em termos comerciais, se comparado ao gesso natural. Desta forma, resta apenas sua disposição como rejeito sólido, o que em muitos casos, pode produzir impactos ambientais locais (SILVA, 1997). Além disso, a incapacidade de recuperação do enxofre contido no fosfogesso, produz como impacto ambiental adjacente a redução das reservas desse recurso.

A rota térmica, é processo reconhecidamente consumidor de energia elétrica em demasia para a fusão das matérias-primas, fato que pode trazer impactos ambientais também de âmbito regional.

II.2.1 - Superfosfato simples

Superfosfato simples é um fertilizante fosfatado produzido a partir da reação direta entre concentrado fosfático e ácido sulfúrico.

Em verdade, o produto comercial é bastante mais complexo, principalmente por conta das impurezas presentes nas matérias-primas; daí serem encontradas no produto final, quantidades residuais de fosfatos bicálcico e tricálcico, ácidos fosfórico e sulfúrico livres, fosfatos de magnésio, ferro e alumínio, pirofosfatos de cálcio e sílica (MALAVOLTA, 1967).

O SSP possui entre 14,0% e 22,0% de P_2O_5 solúvel em água, sendo a média brasileira de 18,4% (ANDA, 1997); além disso, apresenta em sua composição, de cerca de 29,0% de enxofre expressos em SO_3 .

Em termos de compatibilidade, pode ser misturado com quaisquer outros fertilizantes, salvo aqueles que possuam reação fortemente alcalina (cal, calcário, cinzas, e outros fosfatos em fusão).

O superfosfato simples se apresenta no mercado na forma de pó, de coloração esbranquiçada ou cinzenta, ou de grânulos, sempre de cor cinza. Segundo MALAVOLTA (1967), o SSP pó, apresenta como vantagem a diminuição da superfície de contato entre as partículas de solo e as de adubo. Entretanto, esse mesmo autor pondera que a aplicação na forma de grânulos reduz as perdas por ação do vento.

Dada sua alta solubilidade em água, o superfosfato simples é um fertilizante de ação relativamente rápida. Para MALAVOLTA (1967), essa característica torna esse produto altamente recomendável para plantas com ciclo curto de cultivo, como batatinhas, hortaliças em geral, e para culturas que crescem em condições de clima ou solo, onde é difícil a dissolução dos fosfatos naturais.

A produção brasileira de superfosfato simples em 1997 foi de 3,4 milhões de toneladas, correspondentes a 70,9% de toda a produção nacional de fertilizantes fosfatados (ANDA, 1997).

II.3 - Ciclo de vida do SSP

Para o presente projeto de dissertação, as etapas do ciclo de vida do SSP a serem consideradas são as seguintes:

- extração da rocha fosfática;
- beneficiamento da rocha fosfática;
- produção de ácido sulfúrico a partir de enxofre elementar;
- produção de superfosfato simples.

II.3.1 Lavra da rocha fosfática

A mineração da rocha fosfática, também conhecida por lavra ou desmonte, refere-se à extração da rocha fosfática do meio natural, processo que, em geral, é realizado a céu aberto. Após a extração, a rocha fosfática é transportada até a área de britagem.

Entende-se por britagem, a fragmentação das rochas pela operação unitária moagem. A britagem primária tem por objetivo reduzir o diâmetro aparente - Φ_a - do minério (SILVA, 1994). O material que sofreu britagem primária é transportado através de correias transportadoras para mais dois estágios de britagem - ditas secundária e terciária - seguidos de classificação por dimensão em peneira vibratória. A fração de aceite da classificação - $\Phi_a < 3/4''$ - segue no processo, enquanto o rejeito retorna, por um circuito fechado de correias transportadoras, para a britagem secundária.

Como a rocha fosfática apresenta como característica a falta de uniformidade ao longo da mina, este material deve ser homogeneizado para aumentar a eficiência de conversão em superfosfato. Essa operação é realizada no pátio de homogeneização, com o material aceito na classificação. Após a homogeneização, o material é então transportado para a etapa de beneficiamento.

II.3.2 - Beneficiamento

Para colocar a rocha fosfática em condições de atender as especificações para fabricação de fertilizantes fosfatados, esta deve ser previamente beneficiada.

O processo de beneficiamento consiste na concentração do teor de minério de fósforo – no caso brasileiro predominantemente composto por fluorapatita – pela remoção dos minerais acessórios magnetita e calcita.

O beneficiamento pode ser dividido segundo as etapas de moagem, desmagnetização e condicionamento do meio e flotação. Após essa etapa, o teor de fósforo presente na rocha estará entre 32% e 36% em P_2O_5 .

A moagem é feita a úmido em moinho de barras. O grau de liberação ou grau de moabilidade, estabelece a percentagem de separação entre os grãos de apatita e dos demais componentes da rocha fosfática. Essa variável determina a que dimensão será reduzida a rocha no moinho.

Segundo, SILVA (1998), o consumo de energia elétrica na moagem, é uma variável significativa no estabelecimento do grau de liberação.

Segue-se à moagem, o processo de desmagnetização, onde ocorre a remoção da magnetita presente no minério. A desmagnetização é feita a úmido, colocando a suspensão minério-água em contato com um cilindro imantado que, por ação magnética, separa as partículas de magnetita.

A etapa de preparação ou condicionamento do meio refere-se a colocação de agentes depressores e coletores, capazes de conferir ao sistema propriedades superficiais que permitam separar a apatita da calcita (LEAL, 1991).

A separação por flotação é feita através da introdução de ar. A apatita é recolhida e encaminhada para secagem; já a calcita sai pelo fundo do tanque é encaminhada para um pátio aberto de estocagem, podendo ser comercializada como subproduto.

Por se tratar de um processo predominantemente feito a úmido, o beneficiamento tem no balanço de água um aspecto ambiental relevante.

Para cada 1,0 tonelada de concentrado fosfático produzido, são utilizados entre 6,0 e 12,0 m³ de água, geralmente como veículo para movimentação de partículas sólidas, sendo que cerca de 70% deste total é recuperado através de fechamento de circuitos.

II.3.3 - Fabricação de ácido sulfúrico via enxofre elementar

Os processos industriais de fabricação de ácido sulfúrico a partir de enxofre elementar se iniciam pela fusão desta matéria-prima, seguida de filtração do enxofre líquido. Dessa última etapa resulta como rejeito a borra de filtração do enxofre, um dos resíduos sólidos procedentes desse processamento (DWECK, 1990).

O enxofre fundido entra em combustão com ar seco, formando anidrido sulfuroso. Este último é encaminhado para os chamados conversores, onde sofre oxidação catalítica na presença de pentóxido de vanádio (V_2O_5), passando a anidrido sulfúrico.

De acordo com TRAINA apud DWECK (1990), o uso sucessivo, leva a fragmentação das partículas de V_2O_5 ; isso, faz com que o leito catalítico seja periodicamente peneirado - para a remoção desses fragmentos - e recomposto.

A fração substituída - composta por V_2O_5 contaminado - é resíduo sólido de alta toxicidade, devendo por isso ser acondicionado em tambores ou outros recipientes lacrados, antes de sua destinação final (DALO & VILANI apud DWECK, 1990).

O processo de fabricação de ácido sulfúrico é característico por recuperar energia na forma de vapor; conforme BRUNO (1985) a relação mássica, estimada entre o vapor produzido e a quantidade de H_2SO_4 gerado, é da ordem de 1,1:1,0.

A etapa seguinte à conversão é a hidrólise do anidrido sulfúrico, formado por absorção em solução de ácido sulfúrico concentrado em geral a 98% em massa; essa etapa ocorre nas torres de absorção. Nos processos mais novos, conhecidos por duplo contato e dupla absorção, a eficiência de conversão em termos de SO_2 em SO_3 é de 99,8% (SANDER, ROTHE & KOLA, 1984).

A fabricação de ácido sulfúrico tem como característica geração de efluentes gasosos, como SO₂, gerado no conversor, e névoa de SO₃, das torres de absorção. Essas emissões podem causar sérios impactos ambientais, como a chuva ácida (MELLANBY, 1988). Uma das soluções para a minimização desse impacto ambiental, seria a transformação da unidade em processo de absorção dupla, o que envolveria necessariamente, investimentos na planta de produção.

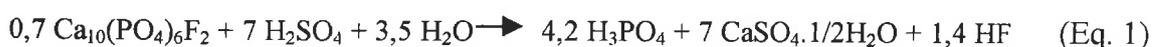
II.3.4 Produção de superfosfato simples

A produção de SSP pode ser efetuada por meio de diversas rotas processuais. No Brasil, a tecnologia mais difundida é a do processo contínuo, composto por um misturador de alta intensidade e por um reator do tipo correia (SILVA, 1982).

A decomposição da apatita existente na rocha fosfática pelo ataque do H₂SO₄ acontece em dois estágios.

No primeiro estágio, o ácido sulfúrico reage com parte da apatita gerando ácido fosfórico, sulfato de cálcio (geralmente hemi-hidratado) e ácido fluorídrico. Esta reação, é rápida e forma uma suspensão no interior do misturador.

A equação (1), apresentada por HILL, (1964), representa o reação ocorrida no primeiro estágio:



A reação no misturador é exotérmica, o que faz com que a temperatura na saída do misturador atinja cerca de 125°C.

A suspensão verte sobre o reator do tipo correia, ali permanecendo por períodos que variam de 5 até 20 minutos, onde ocorre o segundo estágio de reação.

Neste, o ácido fosfórico produzido na primeira etapa ataca a apatita não reagida, para formar fosfato monocálcico e ácido fluorídrico. Trata-se de uma reação lenta, onde a suspensão formada começa a se solidificar.

A equação (2), também citada por HILL (1964), representa o segundo estágio de reação:



É desejável que ao final deste período o material esteja a uma temperatura próxima de 90°C, devendo o calor excedente ser removido por circulação de ar sobre o mesmo.

Segundo CEKINSKI (1990), após a acidulação o superfosfato simples recém obtido é levado para a cura, onde as reações de solubilização da apatita e minerais contaminantes se completam.

A cura tem um período de duração sempre superior a 10 dias, podendo, em alguns casos, exceder quatro semanas. É também nesse período que se iniciam reações químicas colaterais de formação de sais complexos, capazes de afetar a solubilidade e disponibilidade do fósforo contido (UNIDO, 1980).

III - OBJETIVOS

Como já foi apontado, o projeto de dissertação faz parte do projeto maior, que visa comparar ambientalmente as rotas úmida e térmica de produção de fertilizantes fosfatados e identificar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental para os três produtos que compõem o estudo.

Nestas condições, são objetivos específicos dessa dissertação:

- desenvolvimento de um modelo de ACV adaptado as condições brasileiras, para o caso do SSP;
- identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental para o SSP; e
- avaliação do desempenho ambiental do ciclo de vida do SSP, para posterior comparação com o TSP e o termofosfato.

IV. METODOLOGIA

Para que os objetivos da presente dissertação fossem atingidos, foi estabelecida uma metodologia de trabalho a qual, em sua etapa inicial, consistiu no levantamento do estado da arte da ACV hoje.

Após essa etapa, passou-se então ao exercício da formação do conceito de modelo de análise de ciclo de vida, onde procurou-se discutir todos os elementos necessários a sua elaboração. A etapa que se seguiu a essa, consistiu na concepção e elaboração do modelo propriamente dito.

A última etapa da metodologia compreendeu o estudo de caso do superfosfato simples, a título de teste e comprovação do modelo concebido. O caráter de retroalimentação dessa atividade, implicou em refinamento do modelo inicialmente proposto, sendo versão final apresentada no presente trabalho.

V - DISCUSSÃO

De acordo com a norma ISO 14040, o Análise de Ciclo de Vida é uma metodologia de identificação de aspectos ambientais e de avaliação dos impactos a ela associados. Em termos de composição, ACV pode ser dividida nas etapas de definição de objetivos e de escopo, elaboração do inventário de ciclo de vida e avaliação de impactos ambientais. A mesma norma estabelece que todas essas etapas estejam intimamente interligadas.

A etapa de definição dos objetivos e estabelecimento do escopo faz parte do planejamento do estudo de ACV. O conteúdo dessas etapas, influencia a coleta de dados do inventário, bem como a interpretação dos mesmo, realizada durante a avaliação de impactos. A Figura V.1 apresenta a relação entre as etapas da ACV, destacando as subetapas que compõem cada uma delas.

Com o intuito de facilitar o entendimento do leitor, quanto ao conteúdo existente nos capítulos de Discussão e de apresentação do Modelo de ACV adequado às condições brasileiras, preparou-se um glossário com a definição de termos técnicos inerentes à ACV. Esse glossário passa a ser agora apresentado.

Alocação: parcelamento da carga ambiental associada a uma unidade de processo, entre a corrente do subproduto que deixa o sistema e a corrente do produto que segue para a unidade de processo subsequente.

Análise de Sensibilidade: procedimento sistemático de avaliação dos efeitos causados sobre os resultados de um estudo por incertezas de dados e alterações de metodologias.

Carga Ambiental: parâmetro que representa a somatória de aspectos ambientais associados a uma corrente.

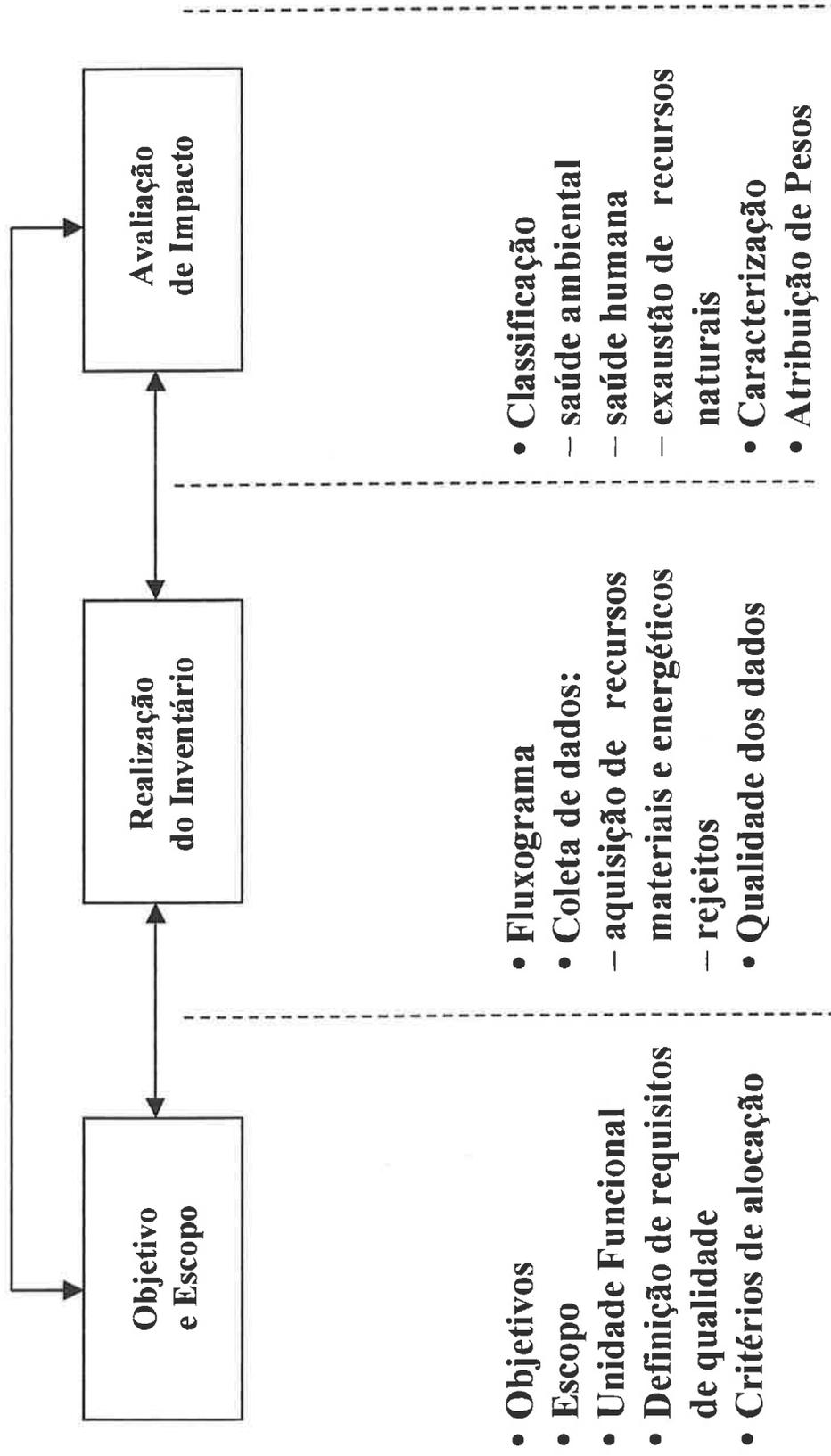


Figura V.1: Relação entre as Fases da ACV
 Fonte: Adaptado de CHEHEBE (1998)

Correntes: quantidades de matéria ou energia que atravessam uma fronteira.

Corrente elementar: correntes que entram no sistema em estudo tendo sido produzida no meio ambiente sem a ação do ser humano, ou que dele saem sendo dispostas no meio ambiente.

Correntes entre sistemas: correntes que ligam um sistema adjacente ao sistema em estudo.

Correntes internas: correntes que ligam duas unidades de processo de um sistema.

Fronteiras : limites imaginários criado com o propósito de separar o sistema em estudo do meio ambiente e de outros sistemas com o qual este se relaciona.

Fronteiras da unidade de processo: limite imaginário criado com o objetivo de separar duas unidades de processo.

Produto: quantidade de matéria ou energia gerada por um sistema, que é o objeto do estudo de uma análise de ciclo de vida;

Rejeito: toda forma de matéria ou energia cujo ciclo de vida já tenha se encerrado, sendo portanto disposto no meio ambiente.

Sistema: conjunto de unidades de processo coordenadas entre si e compreendidas no ciclo de vida de um produto.

Subproduto: quantidade de matéria ou energia gerada por um sistema cujo ciclo de vida ainda não foi concluído, podendo portanto encontrar utilização em outros sistemas; difere do produto por não ser o objeto de estudo da ACV.

Unidade de processo: conjunto de operações de um sistema que estejam agrupadas entre si por uma fronteira.

O capítulo de Discussão será dividido nas seguintes subetapas:

1. definições;
2. realização do inventário de ciclo de vida;
3. realização da avaliação de impactos ambientais e
4. recomendações gerais.

V.1 - Definições

A etapa inicial de discussão do modelo compreende as seguintes definições:

1. objetivos;
2. escopo do sistema;
3. função e da unidade funcional;
4. critérios de alocação e
5. critérios de significância ambiental.

V.1.1 - Definição de objetivos

A definição dos objetivos de uma ACV, deve ser feita em reuniões conjuntas entre o cliente e a equipe designada para a realização do estudo.

Durante o processo de definição de objetivos, devem ser avaliados fatores como as expectativas do cliente quanto as conclusões do estudo, assim como, os custos e o tempo de duração envolvidos.

No âmbito interno das organizações, podem ser realizados estudos de ACV com diversos objetivos, entre os quais destacam-se:

- planejamento estratégico ou desenvolvimento de estratégias ambientais;
- otimização ou "reprojeto" de processos e produtos existentes;
- desenvolvimento de novos produtos e
- identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental.

Nesses casos, os resultados de uma ACV costumam servir de suporte para decisões corporativas voltadas ao gerenciamento ambiental da organização.

De outra forma, caso o cliente tenha como meta a publicação de suas conclusões – visando atender ao mercado consumidor, organismos reguladores, ou quaisquer outras fontes externas – a ACV poderá dar suporte para diversas outras atividades como:

- "marketing" e atendimento a reclamações de clientes;
- estabelecimento de procedimentos ou especificações de negociação;
- rotulagem (incluindo formulação de critérios para eco-rotulagem);
- elaboração de procedimentos e padrões ambientais e
- educação ambiental.

Para quaisquer dos objetivos apresentados, deve-se sempre considerar que as expectativas do cliente precisam ser atendidas.

Dessa forma, cuidados especiais devem ser observados ao longo das demais etapas que compõem a ACV, a fim de garantir credibilidade, transparência e integridade aos resultados atingidos.

V.1.2 - Definição do escopo do sistema

No Modelo de ACV ora proposto, a definição do escopo do sistema pode ser dividido em duas atividades:

1. definição de fronteiras do sistema e
2. aplicação de critérios de exclusão de unidades de processo.

V.1.2.1 - Definição de fronteiras do sistema

Um estudo de ACV que se propusesse a estudar um produto ao longo de todo o seu ciclo de vida – portanto do “berço” ao “túmulo” – poderia acabar se tornando impreciso e pouco conclusivo– em função da indisponibilidade de dados confiáveis para todas as operações que o compõe – além de bastante dispendioso, tanto em termos de custo quanto de tempo.

Dessa forma, para que um estudo de ACV possa atender aos objetivos para que se propõe, assim como, se tornar eficiente em termos de custo e de tempo, devem ser estabelecidas as fronteiras do sistema, tanto com o meio ambiente como com outros sistemas.

O meio ambiente desempenha funções importantes junto ao sistema, atuando ao mesmo tempo como fonte de geração dos recursos naturais utilizados por suas unidades de processo e como meio receptor dos rejeitos dele emanados. A comunicação entre o sistema e o meio ambiente é feita através de correntes elementares de matéria e energia.

As fronteiras entre o sistema em estudo e os demais sistemas devem ser cuidadosamente definidas, a fim de tornar claros os pontos de interação entre os mesmos. Diferentemente do meio ambiente, a comunicação entre sistemas é feita através de correntes de materiais por eles manufaturados.

O estabelecimento inicial das fronteiras deve incluir de maneira indistinta, toda e qualquer operação ou atividade que de alguma forma esteja relacionada com o sistema em estudo.

Após a definição das fronteiras do sistema, a equipe de execução da ACV passa então a trabalhar em seu interior. A primeira ação neste sentido é o estabelecimento das unidades de processo.

As unidades de processo correspondem a conjuntos formados pelas operações e atividades contidas no sistema e agrupadas por fronteiras próprias. As ligações entre as unidades de processo são realizadas por correntes internas de matéria e energia.

Com a definição das fronteiras do sistema e das unidades de processo, a equipe executante do estudo poderá dimensionar sua profundidade e extensão, a fim de fornecer parâmetros para uma estimativa preliminar dos custos e do tempo de duração envolvidos.

V.1.2.2 - Aplicação de critérios de exclusão de unidades de processo

Depois que foram definidas as fronteiras do sistema e estabelecidas suas unidades de processo, a equipe de ACV passa então ao processo de refinamento; essa atividade compreende a aplicação dos critérios de exclusão de unidades de processo.

Como regra geral, uma unidade de processo deve ser excluída, caso haja incompatibilidade desta com os objetivos do estudo, ou ainda se sua contribuição, em termos ambientais, for não significativa. Nessa última categoria se enquadram normalmente os bens de capital e edificações.

As cargas ambientais associadas a bens de capital (como equipamentos) ou construções utilizados pelas unidades de processo, usualmente não afetam os resultados da ACV. Isso pode ser comprovado, dividindo-se as cargas ambientais associadas a produção e manutenção de máquinas e construções pela unidade funcional do sistema, considerando contudo, a enorme quantidade de produto produzida nessas instalações ao longo de seu tempo de uso.

A confrontação das fronteiras estabelecidas para o sistema com os objetivos do estudo pode também fornecer informações quanto a exclusão de unidades de processo. Dois casos com resultados opostos são apresentados a seguir:

A) Considere-se uma situação onde a ACV se destina à comparação ambiental entre os produtos A e B, desde a extração de recursos naturais, até a manufatura dos mesmos, passando pela fabricação de componentes intermediários. Considere-se ainda que comprovadamente as duas primeiras etapas dos dois ciclos de vida sejam idênticas.

Nesse caso, o sistema pode ser refinado eliminando-se simplesmente as etapas de extração de recursos e fabricação de componentes, ficando a comparação restrita apenas a etapa de manufatura dos produtos.

B) Considere-se agora que o objetivo do estudo seja simplesmente a avaliação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental do produto B, para o mesmo ciclo de vida. Nesse segundo caso, não será possível excluir as etapas de aquisição de recursos naturais e produção de componentes, mas sim, incluir o maior número possível de operações a fim de determinar com a maior precisão possível os impactos ambientais gerados.

Durante o processo de refinamento de fronteiras, qualquer omissão de etapas ou unidades de processo do ciclo de vida de produto, pode comprometer os resultados do estudo; assim sendo, ações dessa natureza devem ser bem fundamentadas e registradas.

Em muitos dos casos, com o surgimento de novas informações ao longo da evolução do estudo, as fronteiras estabelecidas no início do trabalho - embora já tendo passado pelo refinamento - podem ainda sofrer alterações.

V.1.3 - Definição de função e de unidade funcional

Uma das considerações mais importantes ao ser definido o escopo de uma ACV é a definição clara das características de desempenho do produto em estudo. Esse elemento é denominado função do sistema do produto.

Um produto pode ter diversas funções possíveis; dessa forma, a seleção da função mais adequada ao estudo deve ser feita levando-se em conta os objetivos a que este se propõe. Em estudos comparativos, por exemplo, é essencial que os produtos em questão estejam desempenhando funções equivalentes para que a comparação possa ser estabelecida.

A quantificação da função, recebe o nome de unidade funcional - UF. Em outras palavras, a UF representa uma base de cálculo para a qual os valores das correntes de entrada e saída apontados no inventário devem ser normalizados.

Assim como a função, a unidade funcional deve ser de fácil mensuração; além disso, ambas deve ser definidas de maneira clara e estarem de acordo com os objetivos do estudo.

Para exemplificar os conceitos de função e unidade funcional, assim como a relação de ambos com os objetivos de uma ACV, considere-se uma seguinte situação hipotética: um fabricante de fósforos pretende quantificar os impactos ambientais causados por seu produto ao longo do ciclo de vida de sua produção.

Tendo em vista que o estudo se propõe apenas a quantificar impactos ambientais, a escolha da função "produzir fósforos" é capaz de atender ao seus objetivos.

Como a unidade funcional corresponde a uma base de cálculo que quantifica a função, para a presente caso elegeu-se "100 caixas de palitos de fósforo" como unidade funcional. Dessa forma, todos os aspectos ambientais identificados e quantificados no inventário foram normalizados a essa unidade funcional, formando um panorama uniforme quanto ao consumo de recursos e a geração de rejeitos.

Considere-se agora uma situação diferente, onde o objetivo pretendido para o estudo fosse uma comparação ambiental entre fósforos e isqueiros. Nesse caso, tanto a função quanto a unidade funcional seriam definidas de maneira diferente da anteriormente apresentada.

Como já mencionado, dois ou mais produtos só poderão ser comparados, desde que desempenhem a mesma função. Para satisfazer a essa condição, determinou-se que a função eleita para ambos os sistemas passaria a ser então "acender cigarros". Dessa forma, passa a ser possível estabelecer uma UF que permita um estudo comparativo, que nesse caso correspondeu a "acender 1000 cigarros".

O estabelecimento das funções e de unidades funcionais para bens de consumo imediatos não apresenta, na maioria dos casos, muitas dificuldades. Entretanto, em

estudos relacionados a bens duráveis, esses conceitos precisam ser ainda mais bem especificados para evitar ambigüidades.

Um exemplo dessa situação é apresentado por LUNDHOLM & SUNDSTRÖM, (1985), em um estudo cujo objetivo era avaliar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental no ciclo de vida de refrigeradores. A função definida pelos autores para o caso em questão foi "refrigerar alimentos".

Para formular uma unidade funcional que atendesse a essa função sem incorrer em erros de interpretação ou ambigüidades, diversos parâmetros tiveram que ser especificados.

Para isso, os autores consideraram como variáveis na definição da unidade funcional, o volume de alimentos a ser acondicionado, a vida útil do refrigerador, a temperatura especificada de refrigeração a frequência média de abertura da porta e até a temperatura ambiente média ao longo do ano.

O resultado do estudo, levou LUNDHOLM & SUNDSTRÖM a propor - para evitar ambigüidades durante o estudo - a seguinte unidade funcional: "manter 100 litros de alimentos a uma temperatura de 5 °C por um período de 10 anos, com uma frequência diária de abertura de porta de 23 vezes, quando o tempo médio de exposição dos alimentos à temperatura ambiente - em média 17 °C - é de 25 segundos".

V.1.4 - Definição dos critérios de alocação

Ao longo de um ciclo de vida, é comum encontrar unidades de processo que gerem mais de um produto.

Uma parte dessas correntes elementares é aproveitada em outras unidades de processo do sistema, para a manufatura do produto de interesse do estudo. Outra parcela

atravessa as fronteiras do sistema, sendo aproveitada em sistemas adjacentes. A essas correntes que deixam o sistema, mas cujo ciclo de vida ainda não se encerrou, dá-se o nome subprodutos.

Em unidades de processo que produzam subprodutos além do produto de interesse, é necessário que seja realizada uma alocação dos aspectos ambientais relativos ao consumo de recursos naturais e a geração de rejeitos, atribuindo assim a cada um, a parcela desses impactos que lhe concerne.

O critério de alocação mais comumente empregado é o de ponderação mássica das correntes. Nesse caso as correntes elementares que caracterizam aspectos ambientais de entrada e saída são alocados entre o produto da unidade de processo e os demais subprodutos por ela gerados, com base na percentagem mássica de contribuição de cada um deles.

Outros critérios de alocação como massa de sólidos secos , estequiometria e calor de reação, podem ser também utilizados, podendo inclusive ser mais eficientes que a locação em base mássica, dependendo do tipo de sistema em estudo.

O critério de alocação por massa de sólidos secos é preferencialmente usado na análise de sistemas de produção de produtos agrícolas. Nessa situação, produtos, produtos intermediários e subprodutos, podem ser diluídos em grandes quantidades de água. Assim, o uso da massa de sólidos secos evita o efeito da diluição na ponderação dos aspectos elementares.

O critério de alocação baseado na estequiometria de equações químicas, permite uma ponderação mais adequada de aspectos ambientais, no caso de reações químicas complexas.

Se as moléculas de um recurso natural contribuem exclusivamente para um subproduto e não para o produto de uma unidade de processo, fará mais sentido que uma alocação baseada nesse critério.

A alocação baseada em calor de reação pode ser empregada nas unidades de processo de manufatura de hidrocarbonetos, em unidades de olefinas - caso do etileno, propileno e mistura de butinos.

Como mencionado anteriormente, CURRAN (1996), sugere o uso de valor econômico como critério de alocação. Essa mesma autora recomenda entretanto, que nessa situação seja realizada uma análise mercadológica prévia.

CURRAN observa, que a ACV é uma técnica que se baseia na medição de parâmetros físicos, classe onde o valor econômico não pode ser incluído; esse fato por si só, desencoraja o uso desse critério de valor econômico na maioria dos estudos (além do dispêndio de recursos financeiros e de tempo para a realização desse estudos complementares).

De qualquer maneira, a seleção dos critérios de alocação deve ser feita cuidadosamente, considerando sempre a conjuntura do processo em análise. Assim, cada sistema de transformação deve ser estudado em particular, já que não existe critério de alocação que possa ser sempre aplicado.

Segundo BOUSTEAD (1992) "o objetivo da alocação é encontrar um parâmetro de partição que, de alguma forma, reflita tão fielmente, quanto possível, o comportamento físico do sistema em si".

Em alguns casos especiais, algumas correntes de saída do sistema podem ser consideradas ambíguas, se comportando ao mesmo como subprodutos e como rejeitos, caso de materiais cujo aproveitamento é pequeno se comparados à sua geração.

Como exemplo, pode ser citado o fosfogesso, resultante do processo de fabricação de H_3PO_4 , a partir da rocha fosfática e ácido sulfúrico.

Para essas situações, é necessária a identificação da relação entre subproduto e rejeito, uma vez que os critérios de alocação de aspectos ambientais serão válidos apenas para os primeiros.

V.1.5 - Definição de critérios de significância ambiental

Os critérios de significância ambiental devem considerar qual a contribuição de determinado aspecto ambiental sobre o meio ambiente, independentemente da quantidade gerada do mesmo.

A definição desses critérios será de fundamental importância posteriormente, por ocasião da aplicação dos critérios de exclusão de aspectos ambientais na etapa de ICV.

Exemplos típicos de aspectos ambientais cujo impacto independe da quantidade são a geração de mercúrio nas correntes de efluentes líquidos e emissões atmosféricas de asbesto.

Ainda que esses produtos apresentem-se em concentrações bastante baixas em suas correntes, o impacto por eles acusado sobre o meio ambiente pode assumir proporções tão elevadas, que mesmo que os critérios de exclusão de aspectos ambientais justifiquem sua desconsideração do estudo, esses devem ser mantidos e analisados cuidadosamente.

V.2 - Realização do inventário de ciclo de vida

A etapa de definições de uma ACV, fornece as premissas iniciais para a realização do estudo. Na etapa seguinte - elaboração do inventário de ciclo de vida - as premissas pertinentes deverão ser aplicadas para a coleta dos dados, normalização de valores e aplicação de critérios de alocação.

O ICV pode ser dividido nas seguintes subetapas:

1. preparação para a coleta de dados;
2. coleta de dados;
3. normalização de valores e
4. aplicação de critérios de alocação.

Embora a maioria dos procedimentos para a realização no ICV destinem-se a processos industriais de produção - campo que tem motivado maior número de trabalhos de ACV- estes não são de sua exclusividade. Assim, podem ser aplicados a qualquer sistema físico de atividades onde estejam envolvidos direta ou indiretamente o uso de recursos materiais energéticos.

V.2.1 - Preparação para a coleta de dados

O estabelecimento do escopo da ACV, define as unidades de processo que compõem o sistema. Tendo em vista que a coleta de dados irá considerar muitas informações - levantadas junto a diferentes tipos de fonte e em diversas situações diferentes - faz-se necessária uma preparação prévia para essa atividade, com o objetivo de garantir uma interpretação uniforme e consistente do sistema a ser estudado.

Durante a subetapa de preparação para a coleta de dados, quatro atividades devem ser consideradas:

1. elaboração de fluxogramas;
2. elaboração de critérios de exclusão de aspectos ambientais e
3. definição de critérios de qualidade dos dados.

V.2.1.1 - Elaboração de fluxogramas

O objetivo da elaboração de um fluxograma, é permitir uma visão global do sistema, bem como das inter-relações deste com o meio ambiente e com outros sistemas a ele ligados.

O nível de detalhamento de um fluxograma é determinado principalmente pelos objetivos do estudo e pela existência de bases de dados.

Quando um estudo tem por objetivo o desenvolvimento de estratégias ambientais de uma determinada organização, é necessário que o fluxograma apresente o maior nível de detalhes possível, podendo entretanto se restringir apenas as atividades realizadas na corporação. Por outro lado, se o estudo visa identificar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, o fluxograma deverá ser mais extensos, não precisando dispor, eventualmente, de tantas informações.

Em alguns casos, a indisponibilidade de dados confiáveis leva a utilização de dados agregados a fim de garantir a consistência dos resultados do estudo.

Os dados agregados correspondem a valores consolidados de correntes de matéria e energia de um sistema, usadas em substituição a informações específicas estejam indisponíveis ou sejam pouco confiáveis. O uso de dados agregados acaba por

tornar o fluxograma menos detalhado.

Além do fluxograma do sistema, devem também ser elaborados fluxogramas individuais para cada unidade de processo, detalhando ao máximo as operações e correntes que a compõem.

V.2.1.2 - Elaboração de critérios de exclusão de aspectos ambientais

Para a realização de um ICV é preciso ter em mente que, em termos práticos, será impossível considerar todos os aspectos ambientais de um sistema.

Como na subetapa anterior foram preparados os fluxogramas detalhados das unidades de processo, faz-se necessária agora a aplicação de critérios para a exclusão de aspectos ambientais para o refinamento dos mesmos.

Os critérios para exclusão de aspectos ambientais podem ser estabelecidos em termos das quantidades de matéria e energia que entram e saem do sistema, bem como dos impactos causados por elas sobre o meio ambiente.

Em termos de quantidade, devem ser excluídos do sistema correntes de matéria ou energia, cuja contribuição para a massa total que entra (ou sai) no sistema seja inferior a uma determinada percentagem; usualmente adota-se 1,0% como limite inferior para exclusão.

Embora esses critérios tragam como benefício a economia de tempo e de investimentos, sua aplicação pode acabar desconsiderando aspectos que causem impactos significativos sobre o meio ambiente, ainda que esses se apresentem em pequenas proporções frente aos demais. Como consequência, o estudo pode ficar exposto a resultados imprecisos, chegando assim a conclusões erradas e perdendo portanto credibilidade.

Para contornar essa situação, sugere-se um segundo critério que tem por objetivo avaliar os impactos sobre o meio ambiente, provocados pelo sistema por ocasião do consumo de recursos materiais e energéticos e geração de rejeitos.

Esse critério faz com que a seleção de aspectos seja baseado na análise de sensibilidade, o que constitui um ganho em termos de confiabilidade para o estudo.

A desvantagem dessa mesma abordagem, é que será necessário que um banco de dados de grande porte esteja disponível para fornecer os valores preliminares para sua execução, o que nem sempre é possível em qualquer situação.

V.2.1.3 - Definição de critérios de qualidade de dados

Como a ACV depende estritamente de dados e informações para a sua realização, a qualidade dessas informações pode afetar diretamente os resultados da análise. Assim sendo, em muitas situações torna-se difícil definir que dados deverão de fato ser considerados no estudo. Para orientar essa seleção, são propostos critérios de qualidade de dados relacionados a tempo, abrangência e tecnologia.

Em termos de tempo, os fatores a serem considerados são a idade, o período mínimo e a frequência com que um dado é coletado.

Em estudos de ACV é usual estabelecer um período de coleta de 5 anos; entretanto, mudanças de equipamentos, implementação de sistemas de controle ou instalação de sistemas de tratamento e recuperação de rejeitos podem abreviar esse período, uma vez que os dados tem que refletir a condição mais atual do sistema.

O período mínimo de tempo de coleta é de 1 ano de operação; esta condição é normalmente suficiente para englobar flutuações de produção, desvios operacionais, paradas programadas e não programadas, bem como suas respectivas repartições.

A abrangência leva em conta a amplitude geográfica a ser considerada no estudo, no intuito de satisfazer seus objetivos. Cuidados adicionais precisam ser tomados quando o ciclo de vida do produto excede fronteiras entre nações, caso típico da energia elétrica. Nessa situação, se os dados ambientais relativos a produção e distribuição de energia não estiverem disponíveis, podem ser tomados dois caminhos dependendo dos objetivos do estudo: fazer uma abordagem apenas qualitativa dos impactos ambientais causados por essas atividades, ou lançar mão de dados de outras fontes.

Os critérios de qualidade voltados para tecnologia, consideram as condições de processo em que os dados serão coletados, como por exemplo a média dos dados reais coletados no campo, a melhor tecnologia disponível ou até a média do setor onde é produzido o produto em estudo.

Em algumas situações, as alterações tecnológicas podem ser tão recentes que os dados disponíveis não sejam ainda suficientemente representativos. Para essas situações, a utilização de dados de plantas que se utilizem de processos semelhantes pode fornecer estimativas bastante confiáveis; entretanto, uma análise crítica preliminar desses dados deve ser conduzida.

A aplicação dos critérios de qualidade acima apresentados auxilia na delimitação do espaço amostral para a coleta de dados. Entretanto, ainda considerando a importância da qualidade dos dados nos estudos de ACV, indicadores estatísticos como representatividade, precisão, integridade e reprodutibilidade devem ser também considerados.

A amostra de dados selecionada para o estudo, deve ser capaz de representar de maneira fiel sua população de origem. Para isso, usa-se um indicador denominado

representatividade que expressa essa relação em termos percentuais.

Além da representatividade, é importante também conhecer a forma de variação dos dados em torno de seu valor médio, a fim de apontar os valores que de fato quantificam cada aspecto ambiental identificado. A medida dessa variação é fornecida por um indicador conhecido como precisão dos dados, correspondente ao desvio padrão da amostra.

Outro indicador importante é o que representa a integridade dos dados. Esse valor expressa, em termos percentuais, a proporção de dados primários em relação ao número total de dados coletados para o inventário de uma unidade de processo.

Como regra geral, os dados primários serão sempre preferidos aos dados secundários. Entretanto, os objetivos a que o estudo se destina podem influenciar bastante nessa decisão, fazendo portanto, com que o indicador de integridade não seja tão elevado.

Na eventualidade de alguns dados relativos a certas unidades de processo não poderem ser obtidos diretamente junto ao sistema em estudo, dados primários de processos similares tem ainda preferência sobre dados secundários.

Nessas situações, recomenda-se que uma análise crítica dos valores seja conduzida, com o objetivo de minimizar o erro potencial introduzido pela decisão de se usar de processos equivalentes como fonte de informações.

Um estudo de ACV deve ser acima de tudo transparente com relação aos procedimentos e premissas assumidos para sua realização. Dessa forma, uma equipe de profissionais que esteja de posse de uma ACV já realizada, deve ser capaz de atingir resultados semelhantes aos apresentados nesse documento, caso se valha das informações nele contidas. Para medir essa capacidade, deve ser utilizado um indicador

denominado de reprodutibilidade.

V.2.2 - Coleta de dados

Os estudos de ACV dependem de dados e informações para sua realização, o que torna a coleta de dados uma das etapas mais importantes de toda a metodologia. A coleta de dados será dividida nos seguintes componentes:

1. formulário de coleta de dados;
2. fontes de informação;
3. uso de dados específicos e dados agregados;
4. substituição de dados primários e
5. aspectos ambientais de entrada e saída de um sistema.

V.2.2.1 - Formulário de coleta de dados

A coleta de dados tem por objetivo quantificar os aspectos ambientais selecionados para o sistema em estudo, a partir de diversas fontes de informação. Dada a complexidade dessa atividade, é conveniente que além dos fluxogramas elaborados anteriormente, sejam também preparados formulários de coleta de dados, também denominados de "checklists".

O formulário de coleta de dados é um recurso usado para que o registro das informações levantadas ocorra de maneira organizada, de forma que essas possam ser recuperadas e disponibilizadas rapidamente caso seja necessário.

Um formulário de coleta corresponde a uma tabela onde serão listados e quantificados os aspectos ambientais de cada unidade de processo, na forma de correntes de entrada e saída e incluindo suas unidades. As correntes de entrada compreendem recursos materiais e recursos energéticos, enquanto que as correntes de

saída são compostas pelo produto, por subprodutos e pelos rejeitos gerados no sistema.

Além dos valores das correntes, o formulário deve trazer indicações sobre a fonte de informação do dado, os critérios de qualidade e os indicadores estatísticos selecionados para o estudo, bem como, referências quanto ao uso de recursos naturais não tradicionais e critérios de alocação que se façam necessários.

Os formulários de coleta de dados não devem ser extensos, pois isso poderia causar atraso no recebimento de respostas; além disso, a clareza em sua elaboração é fundamental, a fim de evitar erros de interpretação e ambigüidades.

V.2.2.2 - Fontes de informação

Um dos problemas da coleta de dados é a disponibilidade de fontes de informações específicas e confiáveis para a realização do estudo. Considerando que a ACV é uma metodologia bastante nova, a elaboração de bancos de dados regionalizados para recursos comuns a diversos sistemas - caso de energia elétrica, água, combustíveis fósseis, alumínio, aço e outros materiais - começou a ser realizada apenas recentemente nos países desenvolvidos.

No caso do Brasil, iniciativas dessa natureza são ainda muito superficiais, fato que tem inviabilizado bastante a realização de estudos de ACV para as condições nacionais. Dadas as peculiaridades do país - como por exemplo a predominância da energia de origem hidrelétrica, ou a supremacia do transporte de insumos e produtos por via rodoviária - a utilização de bancos de dados internacionais tende a distorcer os resultados do estudo, conduzindo assim a conclusões irreais.

O incentivo a criação de bancos de dados genuinamente brasileiros permitirá a viabilização da ACV como instrumento bastante útil ao gerenciamento ambiental da indústria nacional.

V.2.2.3 - Uso de dados específicos e dados agregados

Como regra geral, quando os resultados de uma ACV são destinados ao uso interno das corporações - como por exemplo no "reprojeto" de processos ou produtos - recomenda-se o uso de dados específicos do sistema, visando formar um panorama mais representativo do sistema.

De outra forma, no caso de estudos voltados para o mercado consumidor e para organismos ambientais, costuma-se privilegiar os dados agregados, que podem ser disponibilizados para o público em geral, sem no entanto revelar segredos de produção ou aspectos vulneráveis de processo. Nesses casos, é necessário entretanto, que seja realizada uma análise crítica dos dados para garantir a transparência e integridade dos resultados.

V.2.2.4 - Substituição de dados primários

Em algumas situações, os dados primários embora sendo necessários, não podem ser medidos; nesses casos, algumas inclusões precisam ser feitas para que inventário do sistema possa ser concluído. Desse modo, a norma ISO 14041 sugere as seguintes alternativas para situações de substituição de dados primários:

- incluir um valor calculado, originário de processos que se usem de tecnologias semelhantes às empregadas para o sistema em estudo, fazendo porém uma análise crítica preliminar dos mesmo;

- incluir um valor consistente extraído de literatura (passando-se portanto a considerar como substituto um dado secundário);
- atribuir-se à corrente o valor "zero", seguindo-se a isso, uma justificativa formal e técnica para tal ação;
- dependendo do número de graus de liberdade do sistema, realiza-se um cálculo estimativo do dado através de balanços de massa e energia dentro da unidade de processo. Nesse caso, porém, as premissas que orientam essa ação, devem ser documentadas e cuidadosamente fundamentadas por conhecimentos técnico-científicos pertinentes.

V.2.2.5 - Aspectos ambientais de entrada e saída de um sistema

V.2.2.5.1 - Aspectos ambientais de entrada

Os aspectos ambientais que entram no sistema em estudo podem ser divididos em recursos naturais e materiais provenientes de outros sistemas.

Os recursos naturais são materiais extraídos da Terra, que não sofrem qualquer tipo de processamento antes de entrar no sistema - caso de óleo, gás, bauxita, rocha fosfática, areia e madeira. Os recursos naturais podem ser classificados em recursos materiais - renováveis e não renováveis - e recursos energéticos, os quais merecerão comentários mais adiante.

Além dos recursos naturais, os sistemas podem se usar também de materiais já manufaturados em sistemas adjacentes a ele.

Nesses casos, considerando que esse materiais tem seu próprio ciclo de vida, devem ser estabelecidos critérios para quantificar a carga ambiental adicionada ao sistema em estudo por ocasião de sua utilização.

V.2.2.5.1.1 - Recursos materiais renováveis e não renováveis

A coleta de dados de recursos materiais expõe dois pontos de controvérsia entre os estudiosos da ACV; tratam-se do conceito de renovabilidade de recursos naturais e em que etapa esses devem ser abordados no estudo.

Uma das definições que encontra melhor aceitação por parte da comunidade científica estabelece que recursos renovável é aquele que pode ser repostos no meio ambiente segundo uma velocidade maior que a de seu consumo. Desse modo, a maioria dos minerais é de uma natureza tão estável que seu suprimento não se alterará dentro de um período de tempo equivalente a algumas gerações, sendo portanto considerados não renováveis.

Combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural, são outro exemplo de recursos não renováveis, em virtude de sua reposição não acontecer em uma escala de tempo que permita uma utilização contínua por parte da sociedade.

Segundo JORGUENSEN & PEDERSEN (1990), a natureza intrínseca do recurso não determina sua renovabilidade. Esses autores combatem uma outra definição bastante difundida, onde a sustentabilidade de um recurso pode ser aplicada se a taxa de sua reposição exceder a taxa de uso. Os autores argumentam ainda que o potencial de reposição em uma escala de tempo aceitável de tempo é condição necessária mas não suficiente para qualificar um material como renovável; segundo eles a reposição - ou renovação - deve de fato, estar ocorrendo.

Há também falta de consenso entre os especialistas se a consideração do potencial de renovabilidade de um recurso, em contrapartida a seu consumo, deve ser abordada no ICV, ou se pertence da avaliação de impactos.

Diante desse quadro, recomenda-se que o ICV faça a quantificação dos recursos materiais relacionados no estudo e que a avaliação de impactos, cuide de sua análise - inclusive no que concerne à renovabilidade - quer com base em conhecimento científico, quer em termos de julgamento de valores.

V.2.2.5.1.2 - Recursos energéticos

Os recursos energéticos podem ser divididos em função de seu uso, em energia de processo, energia de transporte, energia inerente e outras formas de energia.

A energia de processo refere-se à energia empregada em equipamentos como reatores, bombas, peneiras, moinhos, caldeiras, torre de destilação, entre outros, que realizam operações dentro das unidades de processo. Trata-se normalmente de energia elétrica ou energia térmica, cujos dados de consumo devem ser coletados em unidades correspondentes.

A energia de transporte corresponde a energia consumida por equipamentos ou sistemas como caminhões, trens de carga, pontes rolantes, correias transportadoras e tubulações, que se destina a deslocar recursos naturais, materiais proveniente de outros sistemas e subprodutos através das fronteiras do sistema em estudo.

Em termos de energia de transporte, a coleta de dados pode ser feita de duas formas não excludentes: na forma de energia propriamente dita, ou em termos da quantidade de combustível a que corresponda essa geração.

A energia de correntes materiais, também conhecida como energia inerente ou ainda energia latente dos materiais, leva em conta materiais produzidos em outros sistemas, produtos e subprodutos, cuja manufatura consome materiais combustíveis ou recursos energéticos.

Um exemplo de energia inerente são os materiais plásticos, cuja manufatura é feita a partir do petróleo e de gás natural. Como a decisão de produzir plástico implica na redução de reservas naturais desses combustíveis, deve-se atribuir a ele a energia equivalente às quantidades de petróleo e gás natural consumidos em sua produção.

A última forma de classificação de recurso energético corresponde à energia despendida em atividades diversas, geralmente relacionada a etapa de uso do produto do sistema. Para essa situação os dados de consumo devem, como no caso da energia de processo, ser coletados em unidades correspondentes de energia.

V.2.2.5.2. - Aspectos ambientais de saída de um ICV

Os aspectos ambientais de saída do ICV correspondem aos rejeitos por ele gerados.

Para efeito de elaboração de inventário, só serão considerados rejeitos de um sistema, as quantidades que tiverem atravessado suas fronteiras, tendo passado portanto por equipamentos de controle e tratamento contidos nas unidades de processo.

Um sistema pode dispor rejeitos no meio ambiente na forma de emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos. Em todos os casos, as quantidades de rejeito deverão ser expressas na forma de correntes mássicas, vinculadas a unidade de processo de onde foram geradas. Cada um dos diferentes tipos de rejeito será abordado separadamente a seguir.

V.2.2.5.2.1 - Emissões atmosféricas

A coleta de dados para emissões atmosféricas se estenderá por todas as substâncias classificadas como poluentes atmosféricos. Podem ser considerados poluentes atmosféricos típicos as emissões de óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, compostos orgânicos voláteis, monóxidos e dióxidos de carbono, aldeídos, amônia, material particulado e chumbo.

Algumas emissões denominadas fugitivas, provenientes de tanques de estocagem e válvulas, que não são normalmente submetidas a quaisquer formas de tratamento devem também ser consideradas. Caso a quantificação das emissões fugitivas seja dificultada pela inexistência de métodos adequados de determinação, sua existência deve ser relatada no ICV ainda que de forma qualitativa.

Emissões atmosféricas provenientes da queima de combustíveis que ocorram dentro do sistema, devem ser consideradas juntamente com as emissões da unidade de processo onde a combustão ocorreu.

V.2.2.5.2.2 - Efluentes líquidos

Os efluentes líquidos incluem as substâncias - regulamentadas ou não por organismos ambientais - que estão presentes numa corrente líquida que deixa um sistema de tratamento de efluentes a qual será descarregada em um corpo receptor.

Em situações atípicas de processo onde tenham ocorrido derramamentos ou transbordos de fluidos para o meio ambiente sem tratamento prévio, deve-se procurar determinar algumas das características dessas correntes. Assim, deve-se procurar apontar no ICV ainda que na forma de simples estimativa, parâmetros como vazão, composição aproximada, temperatura, pH, entre outros.

Assim como no caso anterior, efluentes líquidos originários de queima de combustíveis ficam vinculados para efeito de ICV às unidades de processo onde o combustão ocorreu.

V.2.2.5.2.3 - Resíduos sólidos

Os resíduos sólidos incluem todos os materiais sólidos, dispostos no meio ambiente cujo ciclo de vida tiver sido concluído; apesar dessa definição uma distinção deve ser feita entre resíduos sólidos industriais e resíduos sólidos de pós-consumo.

Entende-se como resíduo sólido industrial, aquele gerado durante as operações de produção e embalagem dos produtos e subprodutos gerados no sistema. Esses, podem ser ainda subdivididos em três categorias: resíduos sólidos de processo, resíduos sólidos relacionados a combustíveis e resíduos sólidos de outras procedências.

Definem-se resíduo sólido de pós-consumo como o produtos e embalagens que tendo cumprido as funções para as quais tenham sido produzidos, passam a ser dispostos em aterros sanitários municipais, a ser incinerados ou mesmo compostados.

A disposição clandestina ou irregular de resíduos de qualquer natureza deve ser apontados no ICV. Em situações como essa, devem ser feitas observações complementares, referentes a quantidade estimada, forma de manuseio e local de disposição dos resíduos, para posterior avaliação das conseqüências que tais práticas irregulares possam vir a trazer para o meio ambiente.

V.2.3 - Normalização de valores

Ao ser realizada a coleta de dados para um sistema, o levantamento dos aspectos ambientais é feito na forma de quantidades de massa e energia por unidade de tempo. Essa forma de apresentação é entretanto pouco conclusiva para os objetivos do estudo, uma vez que não permite relacionar a geração (ou consumo) desses aspectos ao produto em estudo. Para corrigir essa distorção e possibilitar uma adequada avaliação de impactos, essas quantidades devem ser então normalizadas à unidade funcional do sistema.

A normalização é feita em duas etapas: na primeira, todos os aspectos ambientais levantados para uma unidade de processo são convertidos para uma base de cálculo comum à própria unidade. Por convenção, determina-se que o produto da unidade de processo que venha a ser usado posteriormente para a manufatura do produto em estudo seja eleito para essa função. A normalização à unidade de processo acontece, dividindo-se todas as demais correntes relacionadas a unidade de processo por essa base comum.

Após a normalização dos aspectos ambientais a base de cálculo da unidade de processo, pode então ser construída a Tabela Bruta de Valores, que lista todos aspectos ambientais relevantes para o estudo, em suas respectivas unidades de processo.

Na segunda fase, são calculados os chamados fatores de ajuste à unidade funcional, dividindo-se as bases de cálculo de cada unidade de processo por essa última. Os fatores de ajuste são então multiplicados pelos valores das correntes já normalizadas para cada unidade de processo.

No processo de normalização de valores é importante dispensar especial atenção aos dados agregados. Para esses casos, é preferível fazer diretamente a normalização à unidade funcional do sistema; entretanto, deve-se observar se o nível de agregação dos dados irá satisfazer o objetivo e o escopo a que o estudo se propõe.

Caso sejam necessárias regras de agregação mais detalhadas, estas devem ser previstas e justificadas por ocasião da definição do escopo do sistema; outra alternativa é fazer sua definição durante a avaliação de impacto.

V.2.4 - Aplicação de critérios de alocação

A alocação de cargas ambientais entre produtos e subprodutos é cada vez mais freqüente em estudos de ACV, principalmente em trabalhos realizados junto a indústria química onde é comum que um processo gere mais de um produto. Além disso, o desenvolvimento de materiais a partir de substâncias originalmente consideradas rejeitos tem se tornado objeto de estudo de muitos pesquisadores.

Diante desse quadro, cresce em importância o uso dos critérios de alocação, principalmente para a precisão e consistência do estudo.

A escolha e a aplicação de um critério de alocação deve ser feita de maneira cuidadosa, sendo que cada caso precisa ser considerado separadamente. Segundo GUINÉE et. al., (1991) e FAVA et. al., (1991), não existe um critério de alocação que seja de uso universal; assim, sua escolha será definida em função do produto em estudo.

Para exemplificar esse fato, considere-se por exemplo o caso de uma companhia aérea comercial, onde regularmente os passageiros e a carga dividem um mesmo avião.

Se uma alocação tivesse que ser realizada entre essas duas partes e o critério de alocação escolhido fosse massa, a quase totalidade das cargas ambientais geradas por essa unidade de processo seria destinada a carga. De outra forma, se o critério escolhido fosse por exemplo valor econômico, certamente caberia aos passageiros a maior parcela.

Concluídas a normalização de valores a unidade funcional e a aplicação dos critérios de alocação, deve ser elaborada uma Tabela Consolidada de Valores.

V.3 - Realização da avaliação de impactos do ciclo de vida

A avaliação de impacto é a etapa da ACV onde os resultados do inventário são interpretados em termos de seus impactos sobre o meio ambiente. Esses impactos ambientais tem então que ser comparados de forma a permitir uma avaliação global do produto em análise.

O processo de avaliação de impactos pode ser dividido nas seguintes subetapas:

1. classificação;
2. caracterização (que pode incluir normalização) e
3. valoração.

V.3.1 - Classificação

A subetapa de classificação tem por objetivo associar os aspectos ambientais levantados na etapa de ICV, a seus respectivos impactos. Para isso, é necessário então que os impactos ambientais a serem considerados no estudo sejam selecionados.

A seleção de um impacto ambiental deve ser feita sempre que possível, com base no conhecimento de seu mecanismo ambiental.

Os mecanismos ambientais são modelos matemáticos que procuram representar os impactos causados pelo consumo de recursos naturais e pela geração de rejeitos sobre o meio ambiente. A escolha dos impactos com base em mecanismos ambientais confere à avaliação de impacto um caráter técnico-científico; entretanto, essa abordagem nem sempre é possível, já que atualmente apenas alguns dos mecanismos foram descritos.

Quando o mecanismo ambiental para determinado impacto for desconhecido, a seleção dos impactos ambientais para o estudo pode ser realizada através do julgamento de valores. Neste caso entretanto, pode-se deixar de incluir um impacto ambiental que de fato seja significativo para o estudo, apenas por desconhecimento.

Os impactos ambientais normalmente utilizados em estudos de ACV são:

- exaustão de recursos não renováveis: refere-se à extração de combustíveis fósseis e de minerais, entre outros.
- aquecimento global: a presença de quantidades crescentes de CO_2 , N_2O , CH_4 , aerossóis e outros gases na atmosfera terrestre, impede que os raios solares que atingiram a Terra se dispersem novamente para a atmosfera. Dessa forma, o aumento da radiação térmica junto a superfície do globo eleva sua temperatura, podendo trazer desequilíbrios ecológicos como o degelo das calotas polares e conseqüentemente, a diminuição da área ocupada do planeta.
- depleção da camada de ozônio: o uso de aerossóis a base haletos orgânicos como o clorofluorcarbono (CFC-11) e seus derivados tem provocado a diminuição da concentração de ozônio (O_3) na estratosfera. Sem a presença desse elemento, eleva-se a incidência de raios solares ultravioleta sobre a superfície da Terra, o que pode resultar em interferências significativas sobre o

ecossistema e aumentar a incidência de doenças como câncer de pele;

- toxicidade humana: a exposição do ser humano a substâncias tóxicas através do ar, da água ou do solo, principalmente por intermédio da cadeia alimentar, pode levar o ser humano aos mais diversos tipos de moléstias;
- ecotoxicidade: a exposição da fauna e da flora a substâncias tóxicas, pode trazer conseqüências irreversíveis, entre as quais o desbalanceamento da cadeia alimentar, que poderá resultar inclusive na extinção de espécies. A ecotoxicidade pode ser aquática ou terrestre.
- acidificação: a deposição ácida no solo ou na água - resultante da emissão de óxidos de nitrogênio e enxofre para a atmosfera - pode alterar o teor de acidez desses meios, trazendo assim efeitos sobre as culturas e espécies animais que deles se servem.
- oxidação fotoquímica: a reação entre o óxido de nitrogênio e substâncias voláteis sob a ação de raios ultravioleta provoca a formação de oxidantes fotoquímicos. Esses últimos causam nevoeiros que entre outros efeitos, podem levar a diminuição da atividade biológica fotossintética de vegetais por redução da taxa de luminescência solar;
- eutrofização: a adição de nutrientes a base de nitrogênio e fósforo a água, aumentam a produção de biomassa nesse meio. Dessa forma há uma diminuição da taxa de oxigênio livre, o que afeta outros organismos vivos como os peixes. Tanto no solo quanto na água, a eutrofização pode levar a alterações indesejáveis no número de espécie no ecossistema, trazendo por isso, problemas de biodiversidade.

Existem ainda diversos impactos ambientais passíveis de serem considerados nos estudos de ACV, como por exemplo exaustão de recursos hídricos, redução de espaço físico, poluição sonora ou odor. Esses impactos precisam entretanto, ser ainda melhor avaliada em termos de mecanismos ambientais.

Após a definição dos impactos ambientais que serão considerados no estudo, passa-se então ao processo de classificação que consiste em distribuir os aspectos ambientais pelos impactos a eles associados.

V.3.2 - Caracterização

Cada impacto ambiental selecionado para o estudo, é representado em termos algébricos por um Indicador. Assim sendo, o processo de caracterização consiste na conversão das quantidades dos aspectos ambientais distribuídos em cada impacto, às bases de referência de seu respectivo Indicador. Para essa operação, deve-se fazer uso dos chamados Fatores de Equivalência.

Fatores de Equivalência são valores que permitem estimar a contribuição de cada aspecto ambiental para o impacto a ele associado. Para a base de referência de cada Indicador, o valor do Fator de Equivalência é unitário.

Após terem sido aplicados os respectivos fatores de equivalência a cada um dos aspectos ambientais, essas quantidades podem então ser somadas para totalizar o valor do Indicador. O conjunto de Indicadores de impacto representa o Perfil Ambiental do sistema em estudo.

Em muitos casos, os diferentes Indicadores de impacto definidos pela caracterização são difíceis de serem interpretados por apresentarem unidades diferentes. Para contornar essa dificuldade, é possível se utilizar de um recurso denominado normalização.

A normalização é um processo que permite a conversão de todos os Indicadores de impacto a uma única base de referência, afim de que esses possam então ser comparados. Essa conversão é feita dividindo-se os valores dos Indicadores de impacto ambiental pelo valor da base de referência.

Após ter sido normalizado, o Perfil Ambiental do sistema poderá, por exemplo, ser útil para a hierarquização de ações de melhoria de desempenho ambiental, atividade esta, inerente ao processo de tomada de decisão.

V.3.3 - Valoração

A conclusão das subetapas de classificação e de caracterização, permite elaborar o Perfil Ambiental do sistema. Em alguns casos entretanto, em virtude da grande quantidade de dados envolvida e da complexidade em compara-los, é mais prático transformar esse perfil em um único indicador denominado de Indicador Global do sistema. A esse processo de transformação é dado o nome de valoração.

A norma ISO-14042 estabeleceu que a valoração destina-se a:

- estabelecer as prioridades ambientais de um grupo ou organização na política, objetivos e metas de seus sistemas de gestão ambiental;
- assegurar que o processo de ACV seja visível, documentado e informativo e
- estabelecer a importância relativa dos resultados da ACV com base no conhecimento disponível sobre esses mesmos aspectos.

O Indicador Global é composto atribuindo-se pesos a cada Indicador de impacto, em função de sua importância relativa e somando-se posteriormente os resultados.

Considerando que os fatores de ponderação são diferentes para cada país - e em alguns casos, até para regiões de um mesmo país - em virtude das diferenças sócio-econômicas, geográficas, climáticas e até de recursos entre eles, o processo de valoração acaba se baseando em julgamento de valores.

Por esse motivo e pela ausência de um método uniforme para a realização da valoração, a comunidade científica tem estimulado o uso desse recurso, apenas nos casos estritamente necessários, e mesmo assim, observando-se diversas restrições.

V.4 - Recomendações gerais

De maneira a sintetizar o conteúdo do capítulo de Discussões, é apresentada a seguir uma lista de recomendações gerais a serem consideradas por ocasião da elaboração de um modelo de ACV. O conteúdo dessa lista está baseado nos conceitos apresentados pela na norma ISO-14040:

- uma modelo de ACV deve ser capaz de tratar os aspectos ambientais por ele apontados, de maneira adequada e sistemática, por todas as operações contidas dentro de suas fronteiras;
- a profundidade e a estrutura de tempo estabelecidas em um modelo de ACV são determinadas pelos objetivo e escopo do estudo;
- quaisquer premissas, procedimentos e metodologias empregados em uma ACV devem ser transparentes; além disso, as fontes de dados precisam ser documentadas e apresentadas de maneira apropriada;

- um modelo de ACV deve ser capaz de absorver a inclusão de novas descobertas científicas, assim como melhorias do estado da arte da tecnologia;
- não existe um único modelo para a elaboração e a condução de um estudo de ACV. Para cada aplicação desse instrumento, são formulados requisitos específicos, baseados nos objetivos e nas condições do sistema definido pelo escopo do trabalho e
- não existe ainda, base científica para a redução dos Indicadores de impacto que compõem o Perfil Ambiental de um sistema a um Indicador Global. Isso ocorre em virtude de o processo de atribuição de pesos ser baseado em julgamento de valores, o que é amplamente dependente de fatores individuais e muitas vezes externos ao sistema em estudo.

VI - MODELO DE ACV ADEQUADA A CONDIÇÃO BRASILEIRA

Neste capítulo é apresentado o modelo de ACV adequado a condição brasileira. Os conceitos que compõe o modelo, serão ilustrados por um exemplo de caso proposto com o objetivo de facilitar o entendimento do leitor.

O estudo de caso que ilustra o modelo, tem por objetivo comparar através da aplicação da ACV, quatro tipos diferentes de óleo de soja com baixo teor de gordura, produzidos por um mesmo fabricante.

As conclusões alcançadas pelo estudo serão usados pelo cliente para o estabelecimento de um programa de ações de melhoria ambiental desses produtos.

O presente capítulo segue a mesma estruturação utilizada para o capítulo de discussões, ou seja.

1. definições;
2. realização do inventário de ciclo de vida e
3. realização da avaliação de impactos ambientais.

VI.1 - Definições

A primeira etapa de elaboração do modelo compreende as seguintes definições:

1. objetivos;
2. escopo do sistema;
3. função e da unidade funcional;
4. critérios de alocação e
5. critérios de significância ambiental.

VI.1.1 - Definição de objetivos

Como primeiro passo para a realização de uma ACV devem ser definidos os objetivos do estudo. Esse processo deverá levar em conta os seguintes critérios:

- os propósitos e expectativas do cliente com a realização do estudo e
- aspectos relacionados ao custo e o tempo de duração do estudo.

A definição dos objetivos deverá ser realizada através de reuniões conjuntas, onde a equipe designada para a realização da ACV irá apresentar ao cliente, alternativas de aplicações da ACV que possam corroborar com seus interesses.

O planejamento das demais atividades que farão parte do estudo de ACV só será possível, após os objetivos do estudo terem sido definidos de forma clara e consensada entre as partes envolvidas.

VI.1.2 - Escopo do sistema

A definição do escopo é uma etapa onde se faz o dimensionamento da extensão do sistema onde será realizada a ACV.

A elaboração do escopo genérico para um estudo de ACV compreende as seguintes atividades:

1. definição de fronteiras do sistema e
2. aplicação de critérios de exclusão de unidades de processo.

VI.1.2.1 - Definição das fronteiras do sistema

A definição das fronteiras de um sistema, consiste estabelecer os limites do sistema; ou seja, determinar que unidades de processo deverão ser estudadas através da ACV.

Para realizar essa atividade, recomenda-se que seja feito um levantamento preliminar de informações, com o intuito de identificar todos os equipamentos, formas de operação e tecnologias que sejam empregados desde a extração de recursos naturais, até a disposição final do produto.

A pesquisa prévia deve ainda indicar os pontos de interação entre o sistema em estudo e os demais sistemas com o qual este se relaciona.

VI.1.2.2 - Aplicação de critérios de exclusão de unidades de processo

Depois que o ciclo de vida do produto foi identificado, inicia-se então a operação de exclusão das unidades de processo que, por motivos bem definidos e justificados, não deverão merecer análise.

Para a exclusão das unidades de processo ditas excedentes para o estudo, deverão ser considerados os seguintes critérios:

- incompatibilidade com os objetivos a que o estudo se propõe;
- disponibilidade de recursos e de tempo para a realização do projeto e
- existência e confiabilidade de fontes de informação para quantificar as correntes de entrada e saída relacionadas à unidade de processo.

A presente etapa terá por resultado o delineamento do sistema para o qual a ACV será aplicada.

VI.1.3 - Definição da função e da unidade funcional

Definir a função de um sistema significa eleger entre os usos e aplicações possíveis para o produto em estudo, aquele para o qual a ACV será desenvolvida.

Considerando que muitas vezes os aspectos ambientais são quantificados em relação a diferentes bases, para efeito de ACV há necessidade de sua normalização. Esta, é feita através da unidade funcional, que corresponde a uma base de referência para a qual são ajustados todos os aspectos ambientais.

No exemplo para os diferentes tipos de óleo de soja, a definição da função do sistema deverá ser feita levando-se em conta, que os quatro produtos deverão apenas ser comparados para funções comuns. Nesse caso, define-se como função do sistema “fritar alimentos”.

Com base na função determinada para o sistema e considerando como uma primeira aproximação que os produtos apresentam as mesmas características físicas, esses podem ser comparados em base mássica, o que sugere que a unidade funcional conveniente para o sistema seja então “fritar 1,0 tonelada de batatas”.

Assim, para efeito de estudo, será agora estabelecida uma correlação entre a quantidade de batatas a serem fritas e a quantidade de óleo a ser empregada nessa operação. Portanto, para atender a unidade funcional proposta para o sistema, definiu-se uma quantidade de 1,0 tonelada de óleo de soja.

VI.1.4 - Definição de critérios de alocação

A alocação procura - através de fatores de proporcionalidade estabelecidos a partir de critérios adequados - atribuir ao produto e aos subprodutos de uma unidade de processo, uma parcela da carga ambiental gerada por ocasião de suas produções.

Assim, os critérios de alocação mais comumente empregados em estudos de ACV estão relacionados a massa, calor de reação, teor de sólidos secos e coeficiente estequiométrico dessas correntes.

Uma critério alternativo é o uso do valor econômico do produto e dos subproduto para realizar a alocação. Nesse caso porém, recomenda-se a realização de estudos sócio-econômicos e mercadológicos preliminares, dada a flutuação dessa variável em função de aspectos regionais, econômicos e até sazonais.

VI.1.5 - Definição de critérios de significância ambiental

Em determinados casos, uma unidade de processo do sistema pode gerar pequenas quantidades de rejeito, cujos impactos sobre o meio ambiente podem ser, no entanto, bastante relevantes. Assim sendo, critérios que avaliem a significância dos impactos gerados pelo sistema sobre o meio ambiente devem ser estabelecidos.

A formulação desses critérios será usada principalmente, por ocasião do processo de seleção de aspectos ambientais do ICV, que precede a etapa de coleta de dados.

VI.2 - Realização do inventário de ciclo de vida

O ICV é a principal etapa de um estudo de ACV. É a etapa na qual serão realizados a coleta e o tratamento do dados que quantificam as correntes de matéria e energia que atravessam as fronteiras do sistema.

A realização de um ICV pode ser dividida nas seguintes subetapas:

1. preparação para a coleta de dados;
2. coleta de dados;
3. normalização de valores e
4. alocação.

VI.2.1 - Preparação para a coleta de dados

A preparação para coleta de dados é uma subetapa de planejamento do ICV, realizada preliminarmente às atividades de levantamento de campo. Em termos estruturais, essa etapa é composta por:

1. elaboração de fluxogramas;
2. definição de critérios de exclusão de aspectos ambientais e
3. definição dos critérios de qualidade dos dados.

VI.2.1.1 Elaboração de fluxogramas

O fluxograma é a representação gráfica e qualitativa do sistema em estudo. Durante a realização de um estudo de ACV é conveniente que sejam elaborados dois tipos de fluxogramas:

- A) fluxograma geral do sistema: representa todas as unidades de processo que compõem o sistema e
- B) fluxogramas individuais: fazem o detalhamento de cada unidade de processo, representando as operações nela contidas.

Para a elaboração do fluxograma geral do sistema, devem ser usados os seguintes procedimentos:

- iniciar a construção do fluxograma pela unidade de processo da manufatura do produto em estudo;
- adicionar de maneira ordenada, as unidades de processo anteriores (como extração e processamento de recursos naturais) e posteriores (como uso e disposição final do produto) que completam o sistema;

- representar, através de setas contínuas (\longrightarrow), as correntes de fluxos elementares que atravessam as fronteiras do sistema com o meio ambiente, assim como as correntes internas, que ligam duas unidades de processo; e
- representar por setas tracejadas (\dashrightarrow), as correntes que transitam entre o sistema em estudo e outros sistemas.

A Figura VI.1, apresenta o fluxograma geral do sistema, estabelecido para a ACV do óleo de soja.

No exemplo, o sistema é composto pelas unidades de processo de produção de soja e produção de óleo de soja. As fronteiras desse sistema delimitam sua extensão, além de separá-lo do meio ambiente e dos sistemas adjacentes – que correspondem às produções de fertilizantes, inseticidas e herbicidas, vapor, energia elétrica e hexano – envolvidos no estudo.

Em termos de correntes elementares foram assinaladas as gerações de resíduos sólidos, efluentes líquidos e as emissões atmosféricas da unidade de processo de produção de soja. A etapa de produção de soja gera como subproduto a polpa de soja.

Depois que o fluxograma geral do sistema foi concluído, passa-se então à etapa de detalhamento, com a elaboração dos fluxogramas individuais para cada unidade de processo. Nesse caso, os seguintes procedimentos devem ser considerados:

- identificar todas as operações que compõem a unidade de processo em questão;
- ordenar essas operações de acordo com sua seqüência operacional, representando-as por blocos;
- traçar as fronteiras da unidade de processo, estabelecendo assim suas dimensões e

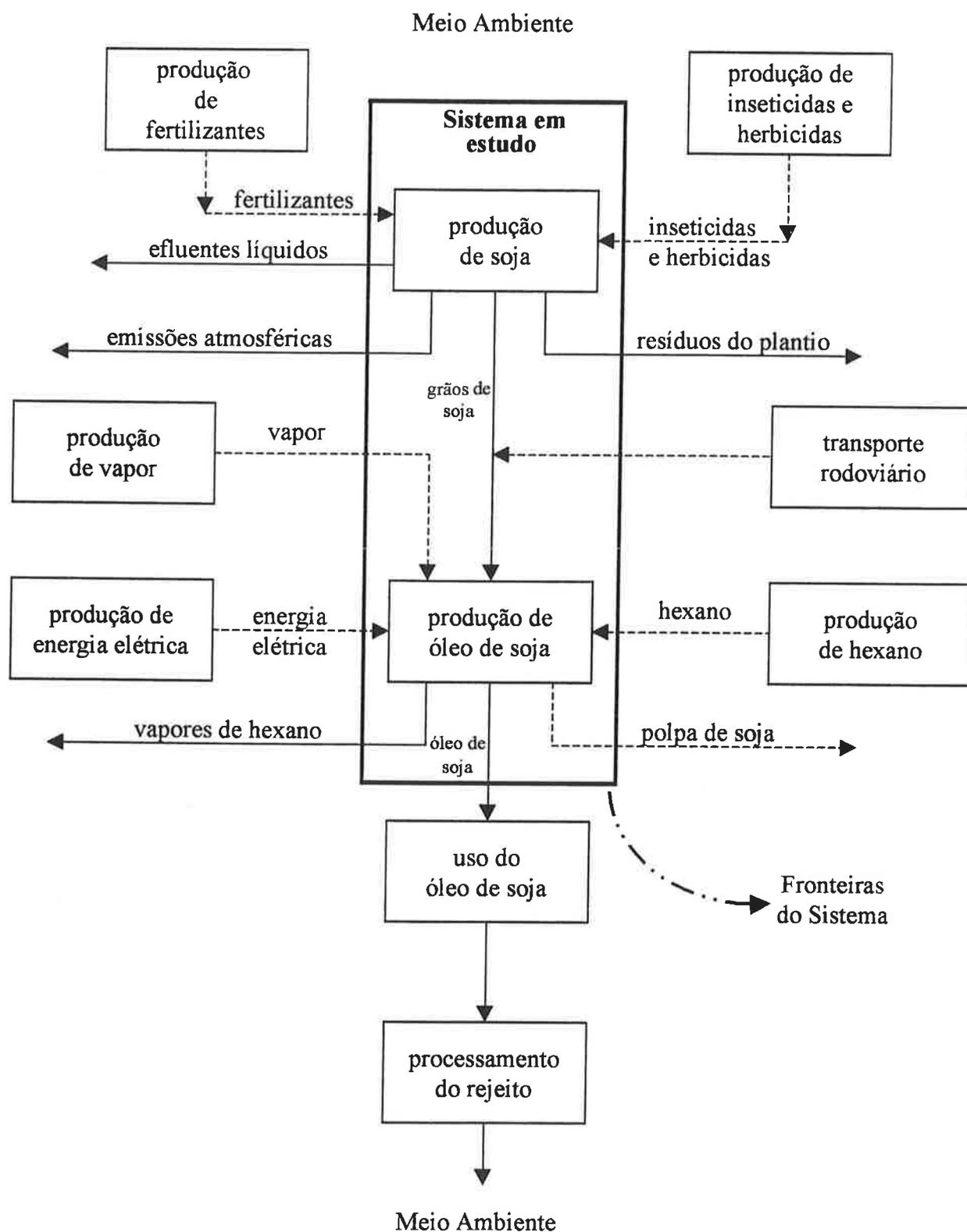


Figura VI.1: Fluxograma geral do sistema estabelecido para o óleo de soja
 Fonte: Adaptado de UNEP (1996)

- seguir as mesmas convenções usadas no fluxograma geral, para representar todas as correntes de energia que estejam relacionadas a esta unidade de processo.

A Figura VI.2 apresenta o fluxograma detalhado para a unidade de processo de produção de óleo de soja, composta pelas operações de moagem, calefação dos grãos, prensagem dos flocos e extração do óleo de soja. Além disso, são apresentadas de maneira mais detalhada que no fluxograma geral, as correntes de matéria e energia que atravessa suas fronteiras, assim como as correntes internas que ligam suas operações.

VI.2.1.2 - Definição de critério de exclusão de aspectos ambientais

Como apontado anteriormente no capítulo de Discussão, é impossível considerar todos os aspectos ambientais de um sistema. Assim, devem ser aplicados nessa fase do estudo, critérios de exclusão para o refinamento dos mesmos.

Os critérios estabelecidos para exclusão de aspectos ambientais são:

- Quantidade: um critério apropriado é a exclusão de correntes de entrada de matéria (ou energia) cuja contribuição para a massa (ou energia) total que entra no sistema seja inferior a uma determinada percentagem (usualmente adota-se 1,0%); ou seja, se

$$\frac{\text{quantidade de massa (ou energia) da corrente A de entrada} * 100,0\%}{\sum \text{quantidade de massa (ou energia) de todas as correntes de entrada}} \leq 1,0\%$$

então o aspecto ambiental representado pela corrente A será excluído do ICV; este mesmo critério pode ser usado para as correntes de saída e

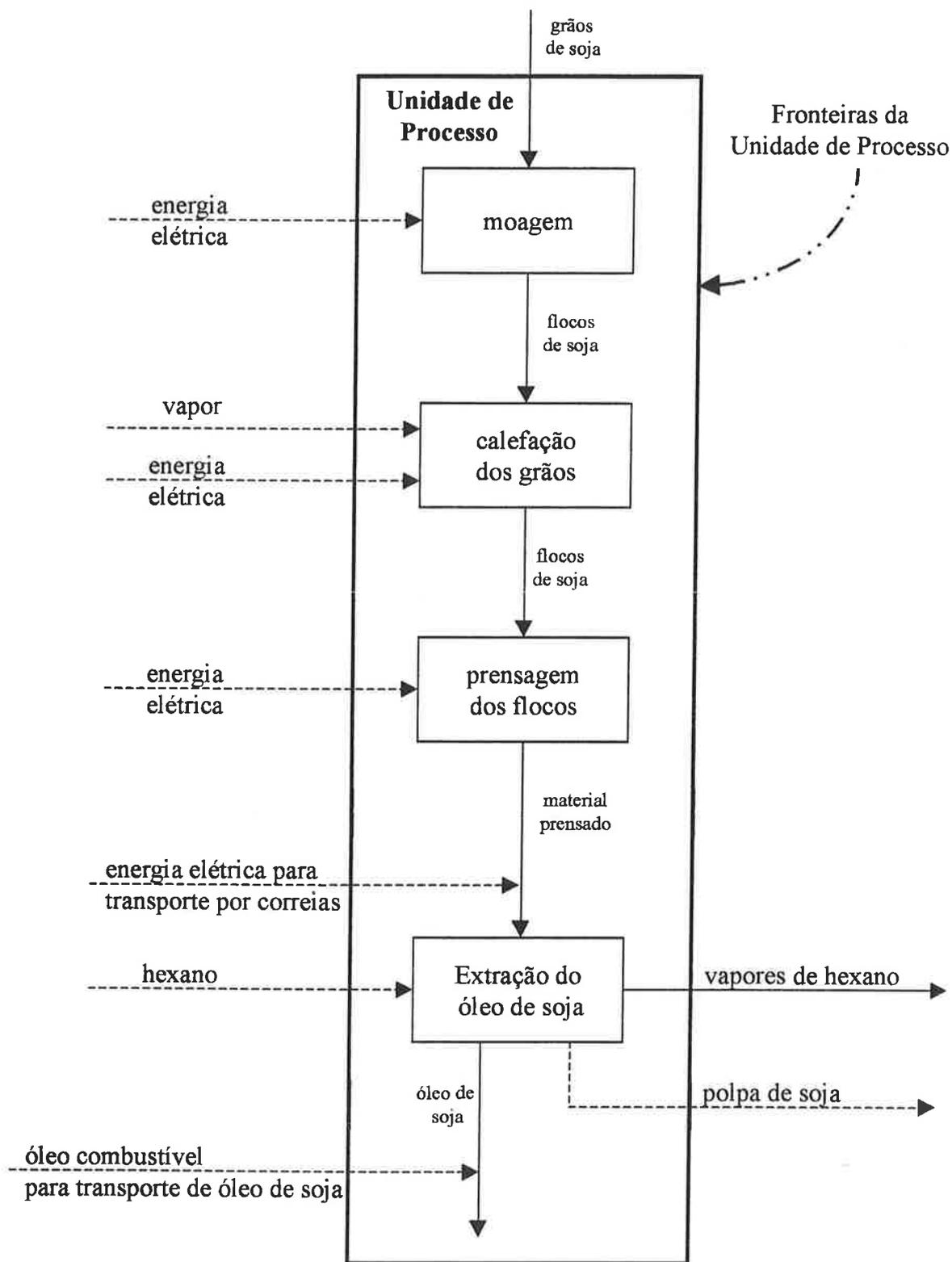


Figura.VI.2: Fluxograma detalhado da unidade de processo de produção de óleo de soja
 Fonte: Adaptado de UNEP (1996)

- Impacto sobre o meio Ambiente: outro critério importante é a significância dos impactos ambientais provocados pelos aspectos ambientais em consideração. Esta significância é determinada por critérios estabelecidos na etapa inicial do estudo.

VI.2.1.3 - Definição de critérios de qualidade dos dados

Os critérios a serem estabelecidos para determinar a qualidade dos dados a serem coletados no ICV, devem ser definidos considerando-se os objetivos e o escopo do estudo. Esses critérios deverão levar em conta:

- Tempo: quando se considera a idade desejada do dado (cerca de 5 anos), o período mínimo de coleta (normalmente 1 ano de operação) e a frequência com que o dado deve ser coletado (por exemplo: a cada 2 horas);
- Abrangência: área geográfica da qual os dados das unidades de processo devem ser coletados para satisfazer os objetivos do estudo (pode ser local, regional, nacional, continental ou global) e
- Tecnológica: quando se define a condição para a qual serão coletados os dados. A cobertura tecnológica pode considerar como condição: a médias dos dados reais coletados no campo, a melhor tecnologia disponível, ou a média do setor onde é produzido o produto em estudo.

Além dos critérios que procuram cercar os dados em termos de tempo, abrangência e tecnologia, devem ser estabelecidos ainda como requisitos complementares para coleta de dados como:

- Precisão: medida da variância dos dados em torno do valor médio da amostra;
- Integridade: porcentagem de dados primários em relação ao total de dados para uma unidade de processo; isto é

$$I = \frac{\text{Número de dados primários de uma unidade de processo}}{\text{Número total de dados de uma unidade de processo}} * 100,0\%$$

- Representatividade: variável quantitativa da capacidade que o conjunto de dados escolhidos para análise, representarem de fato a população de interesse, e
- Reprodutibilidade: variável quantitativa que permite avaliar se a partir das informações disponíveis, é possível reproduzir os resultados previamente atingidos pelo estudo.

VI.2.2 - Coleta de dados

O objetivo da coleta de dados é quantificar os recursos materiais e energéticos consumidos no sistema, assim como, os rejeitos e subprodutos por ele gerados. O processo de quantificação é realizado com o auxílio de um formulário próprio, como apresentado na Figura VI.3 .

Em complementação do formulário de coleta de dados, é conveniente elaborar um documento de apoio contendo:

- um glossário de unidades de medida que seja consistente com a unidade funcional selecionada para o estudo, e

INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA FORMULÁRIO PARA COLETA DE DADOS				
Sistema em estudo: _____		responsável pelo estudo: _____		
Nome da unidade de processo: _____		Aprovação dos requisitos de dados: _____		
Data: _____		Observações _____		
	Valor do dado ^(a)	Tipo de dado ^(b)	Característica do dado ^(c)	Aspectos de Qualidade ^(d)
CORRENTES DE ENTRADA				
Recursos Materiais				
1)				
2)				
...				
Materiais Auxiliares				
1)				
2)				
...				
Recursos Energéticos				
1)				
2)				
...				
CORRENTES DE SAÍDA				
Produto				
Subproduto - 1^(e)				
Subproduto - 2^(e)				
...				
Efluentes Líquidos				
1)				
2)				
...				
Emissões Atmosféricas				
1)				
2)				
...				
Resíduos Sólidos				
1)				
2)				
...				
Atividade de Transporte				
1)				
2)				
...				
OBSERVAÇÕES				
a) incluindo unidades; b) indicar se os dados são medidas de campo, estimativas de engenharia, valores coletados em bibliografias, processos específicos ou média industrial. Listar as fonte caso seja pertinente (por exemplo: "obtido de Relatório de Controle de Poluição Atmosférica CETESB, 1994); c) indicar se os dados correspondem a valores médios, valores selecionados ou padrões legais. Incluir aspectos relativos as coberturas geográfica, temporal e tecnológica (por exemplo: São Paulo, média mensal de janeiro de 1997, tecnologia disponível); d) listar os critérios de qualidade do dado apresentado (por exemplo: precisão; representatividade; consistência; nenhum dos anteriores) e) caso haja alocação de subproduto, indicar o critério de alocação a ser escolhido (por exemplo: massa).				

Figura VI.3: Exemplo de formulário de informações para coleta de dados do ICV

- a descrição das técnicas utilizadas para a coleta ou o cálculo dos dados, de forma a ajudar os técnicos locais a melhor entender que informações serão necessárias para o estudo.

Além disso, considerando que a coleta de dados é a subetapa mais trabalhosa do ICV, deve-se sempre considerar os seguintes aspectos:

- o tipo e a fonte de coleta de dados dependem dos objetivos do estudo;
- os métodos de coleta poderão variar em função da unidade de processo onde esteja sendo realizada a coleta;
- os dados primários, levantados junto às unidades de processo do sistema, tem preferência sobre os dados secundários, coletados em publicações técnicas ou gerados a partir de cálculos de engenharia e estimativas de projeto;
- o conhecimento das interações entre as unidades de processo é necessário para evitar omissões ou duplas contagens de informações e
- os formulários de coleta de dados deverão ser preenchidas para todas as unidades de processo que compõe o sistema; caso uma unidade de processo apresente a produção de subprodutos, requerendo portanto alocação, o critério escolhido para essa operação deve ser anotado no formulário.

Quanto às correntes de entrada do sistema, devem ser objeto da coleta de dados:

- A) recursos materiais naturais - tanto renováveis como não renováveis e
- B) recursos energéticos, os quais podem ser subdivididos em:

- energia de processo: energia empregada em equipamentos que realizam as operações dentro das unidades de processo, caso da energia elétrica;
- energia de transporte: destinada ao transporte de matéria tanto entre unidades de processo, como através das fronteiras do sistema;
- energia inerente: considerada em insumos, subprodutos e produto que para sua manufatura, consomem combustíveis fósseis ou outros recursos energéticos (caso específico de plásticos e derivados) e
- demais usos de energia: consumida em atividades periféricas como iluminação, aquecimento ou refrigeração de ar, entre outros usos.

Em termos de correntes de saída, devem ser inventariados os:

A) subprodutos; e

B) rejeitos, os quais podem também ser subdivididos em:

- emissões atmosféricas;
- efluentes líquidos e
- resíduos sólidos.

Sob o ponto de vista operacional, a coleta de dados deverá ser realizada de acordo com os seguintes procedimentos:

- identificar todos os aspectos ambientais relacionados a cada operação de uma unidade de processo;
- aplicar os critérios de exclusão, elaborando assim a lista definitiva de aspectos ambientais que serão inventariados e
- caracterizar da melhor forma possível os dados coletados, informando não apenas suas quantidades, mas também características ambientais que possam ser úteis na etapa posterior de avaliação de impactos.

VI.2.3 - Normalização de valores

Após ter sido concluída a coleta de dados, inicia-se então a subetapa de normalização de valores, com o objetivo de ajustar as quantidades das correntes de entrada e saída à unidade funcional.

O processo de normalização pode ser dividido em duas etapas: na primeira, faz-se a normalização dos valores associados às correntes a uma base de cálculo relativa à própria unidade de processo, de acordo com os procedimentos de cálculo apresentados a seguir:

- selecionar entre os produtos gerados em cada unidade de processo aquele que irá servir como base para a normalização; preferencialmente, deve-se escolher um produto que permaneça no sistema e não um subproduto;
- definir uma quantidade desse produto que sirva como base de cálculo e
- dividir os valores das correntes de entrada e saída inventariadas para essa unidade de processo, pela base de cálculo escolhida.

Considere-se como exemplo a Tabela VI.1, que apresenta os resultados da etapa de coleta de dados da unidade de processo de produção de óleo de soja.

Nesse caso, a base de cálculo escolhida foi a quantidade de óleo de soja; através dela foram normalizadas as demais quantidades de aspectos ambientais.

O valor de consumo de energia elétrica - 175,00 kwh/h – é um valor consolidado dos consumos individuais de cada operação.

Tabela VI.1:Tabela de valores normalizados para a manufatura do óleo de soja

CORRENTES DE ENTRADA		
Recursos materiais	Valor do dado coletado (t/h)	Valor normalizado (t/t óleo de soja)
grãos de soja	21,00	5,000
hexano	0,013	0,003
Recursos Energéticos	Valor do dado coletado (t/h)	Valor normalizado (t/t óleo de soja)
vapor de água	13,86	3,30
energia elétrica	2,65 ^(a)	0,63 ^(b)
CORRENTES DE SAÍDA		
Produto	Valor do dado coletado (t/h)	Valor normalizado (t/t óleo de soja)
óleo de soja	4,20	1,000
Subproduto	Valor do dado coletado (t/h)	Valor normalizado (t/t óleo de soja)
polpa de soja	16,80	4,000
Emissão Atmosférica	Valor do dado coletado (t/h)	Valor normalizado (t/t óleo de soja)
evaporação de hexano	0,013	0,003

(a) o valor do dado coletado para energia elétrica é expresso em GJ/h;

(b) o valor do dado normalizado para energia elétrica é expresso em GJ/t óleo de soja;

Fonte: Adaptado de UNEP (1996)

Após o processo de normalização de valores ser realizado para todas as unidades de processo do sistema, é possível construir uma Tabela Bruta de Valores, cuja estrutura apresenta nas linhas todos os aspectos ambientais identificados, enquanto as colunas serão preenchidas com as unidades de processo que compõe do sistema. A Tabela VI.2, traz um modelo de Tabela Bruta de Valores para o caso dos óleos de soja.

Tabela VI.2: Tabela Bruta de Aspectos Ambientais para a produção de óleo de soja

	Produção de grãos de soja (por t de grãos de soja)	Produção de vapor (por t de vapor 4 kgf/cm² e 150 °C)	Produção de energia elétrica (por kWh de energia elétrica)	Transporte Rodoviário (por 15 t de grãos x Km)	Produção de óleo de soja (por t óleo de soja)
Recursos Naturais					
Recursos Energéticos (GJ)	0,58	3,45	0,0091	0,0086	3,93
Emissões Atmosféricas (kg)					
CO₂	45,3	162,0	0,625	0,81	-
CO	0,01	0,04	0,000029	0,002	-
hidrocarbonetos	0,0046	2,0	0,000053	0,0013	-
NO_x	0,071	0,5	0,000012	0,012	-
SO₂	0,32	0,14	0,000078	0,00088	-
partículas sólidas	0,015	0,0012	-	-	-
partíc. líquidas	-	-	0,000025	0,0008	-
Efluentes Líquidos (kg)					
nitrogênio	99,0	-	-	-	-
fosfatos	28,0	-	-	-	-
óxido de potássio	56,0	-	-	-	-
óxido de cálcio	21,0	-	-	-	-
óxido de magnésio	17,0	-	-	-	-
inseticidas	12,0	-	-	-	-
herbicidas	1,65	-	-	-	-
óleo combustível	-	0,0025	-	-	-
hexano	-	-	-	-	3,0
Resíduos Sólidos (kg)					
alta periculosidade	-	-	1,7.10 ⁻⁶	-	-
industrial	-	0,24	7,0.10 ⁻⁷	-	-

Fonte: UNEP (1996)

Na segunda etapa do processo de normalização, faz-se então a adequação dos dados da Tabela Bruta de Valores à unidade funcional. Para isso devem ser observados os seguintes procedimentos:

- realiza-se o cálculo dos fatores de normalização entre as bases de cálculo eleitas para cada unidade de processo e a unidade funcional e
- faz-se o produto das correntes normalizadas em cada unidade de processo, por seu respectivo fator de normalização, o que resulta na normalização à unidade funcional.

Como exemplo ilustrativo do processo de normalização considere-se que para a produção de 1,0 t de óleo de soja – unidade funcional do sistema – sejam necessários 5,0 t de grãos de soja. Assim, o fator de normalização será

$$f = \frac{5,0 \text{ t de grãos de soja}}{1,0 \text{ t de óleo de soja}}$$

Segundo a Tabela Bruta de Valores, o consumo de recursos energéticos dessa unidade de processos é de 0,58 GJ/t de grão de soja produzido. Portanto, para que esse aspecto ambiental seja normalizado à unidade funcional deve-se realizar o seguinte cálculo:

$$0,58 \text{ GJ/t de grão de soja} * \frac{5,0 \text{ t de grãos de soja}}{1,0 \text{ t de óleo de soja}} = 2,90 \text{ GJ/t óleo de soja}$$

Assim, o consumo de recursos energéticos da unidade de processo de produção de grãos de soja corresponde a 2,90 GJ/t de óleo de soja.

VI.2.4 - Alocação

Como última subetapa da elaboração do inventário, deve ser feita a aplicação dos critérios de alocação - definidos anteriormente no escopo do estudo - aos subprodutos que tenham sido gerados pelas unidades de processo, ao longo de todo o sistema.

No exemplo do óleo de soja, o único subproduto gerado pelo sistema é a polpa de soja. Dessa forma, deve ser realizada uma alocação de cargas ambientais entre a polpa e o óleo de soja, para que a carga ambiental do sistema seja parcelada de maneira equivalente. Para esse caso, considere-se como critério ambiental adequado a alocação, o valor econômico de ambos os produtos.

De acordo com os dados apresentados na Tabela VI.1, para cada tonelada manufaturada de óleo de soja, são também produzidas 4,0 t de polpa de soja; além disso, o valor econômico da tonelada de óleo de soja é três vezes mais elevado que o da mesma quantidade de polpa.

Assim, se a receita conseguida com a comercialização de 1,0 t de óleo de soja for X, terá se conseguido $4X/3$ com a comercialização da polpa de soja gerada para a produção dessa tonelada de óleo. Logo, o montante econômico total arrecadado com os dois produtos será de $7X/3$.

Nessas proporções, o fator de alocação em termos de valor econômico para o óleo de soja será de $3/7$, valor que deverá então ser aplicado a todos os aspectos ambientais gerados pelo sistema.

Quando os critérios de alocação pertinentes ao estudo tiverem sido aplicados, pode-se então construir a Tabela Consolidada de Valores, que é o produto final da etapa de ICV.

A Tabela VI.3 apresenta o resultado dos processos de normalização de valores à unidade funcional e de aplicação do critério de alocação descrito acima para o exemplo do óleo de soja, agora no formato de uma Tabela Consolidada de Valores.

Nessa situação, as informações estarão organizadas de maneira a permitir que seja iniciada a etapa de Avaliação de Impactos.

VI.3 - Realização da avaliação de impactos do ciclo de vida

A última etapa de uma ACV, denominada de avaliação de impactos de ciclo de vida– AICV – tem por objetivo associar os aspectos ambientais levantados durante o ICV aos impactos ambientais a eles associados.

O processo de avaliação de impactos é composto pelas seguintes subetapas:

1. classificação;
2. caracterização (que pode incluir normalização) e
3. valoração ou atribuição de pesos.

VI.3.1 - Classificação

A subetapa de classificação associa os aspectos ambientais levantados no ICV aos impactos por eles causados sobre o meio ambiente.

Para a realização do processo de classificação, é necessário que os impactos a serem considerados durante o estudo sejam previamente selecionados. Dessa forma, são apresentados a seguir requisitos que permitem tal seleção:

Tabela VI.3: Tabela Consolidada de Valores para o sistema de produção de óleo de soja

	Produção de grãos de soja	Produção de Vapor	Produção de energia elétrica	Transporte rodoviário	Produção de óleo de soja	TOTAL
fator de contribuição	2,14	0,51	75,0	28,6	0,43	
recursos energéticos (GJ)	1,24	1,77	0,68	0,25	-	3,95
Emissões Atmosféricas (kg)						
CO₂	97,2	83,3	46,9	23,1	-	250,5
CO	0,021	0,021	0,0022	0,057	-	0,101
hidrocarbonetos	0,01	1,03	0,004	0,04	-	1,08
NO_x	0,15	0,26	0,0009	0,34	-	0,75
SO₂	0,71	0,07	0,0058	0,03	-	0,81
partículas sólidas	0,032	0,0006	-	-	-	0,033
partículas líquidas	-	-	0,0019	0,0019	-	0,025
Efluentes Líquidos (kg)						
nitrogênio	212,0	-	-	-	-	212,0
fosfatos	60,0	-	-	-	-	60,0
óxido de potássio	120,0	-	-	-	-	120,0
óxido de cálcio	45,0	-	-	-	-	45,0
óxido de magnésio	36,4	-	-	-	-	36,4
inseticidas	25,7	-	-	-	-	25,7
herbicidas	3,54	-	-	-	-	3,54
óleos	-	0,0013	-	-	-	0,0013
hexano	-	-	-	-	-	1,29
Resíduos Sólidos (kg)						
alta periculosidade	-	-	0,00013	-	-	0,00013
industrial	-	0,12	0,000052	-	-	0,12

Fonte : UNEP (1996)

- o processo de seleção de um impacto precisa ser consistente com os objetivos do estudo;
- os impactos devem ser preferencialmente definidas com base em conhecimento científico, e
- a definição dos impactos deve ser idônea, não negligenciando quaisquer problemas ambientais que sejam causados pelo sistema.

Após ter sido feita a seleção dos impactos a serem considerados durante a AICV, inicia-se então a classificação. Para que esse processo seja realizado de maneira organizada, sugere-se os seguintes procedimentos:

- classificar os aspectos ambientais que estejam associados exclusivamente a um único impacto, como por exemplo, o lançamento de fosfatos na corrente de efluentes líquidos que deixam um sistema cuja classificação em termos de impacto refere-se apenas a Eutrofização e
- a seguir, passar à classificação dos aspectos ambientais que estejam associados a mais de um impacto, como por exemplo a emissão de dióxido de nitrogênio (NO₂) que pode estar associada tanto a Eutrofização quanto ao Aquecimento Global.

A Figura VI.4 representa o processo de classificação de aspectos e seus impactos associados.

VI.3.2 - Caracterização

Na subetapa de caracterização é feita a conversão das quantidades dos aspectos ambientais calculadas pelo ICV, à base de referencia que representa o Indicador de Impacto na qual estes foram classificados.

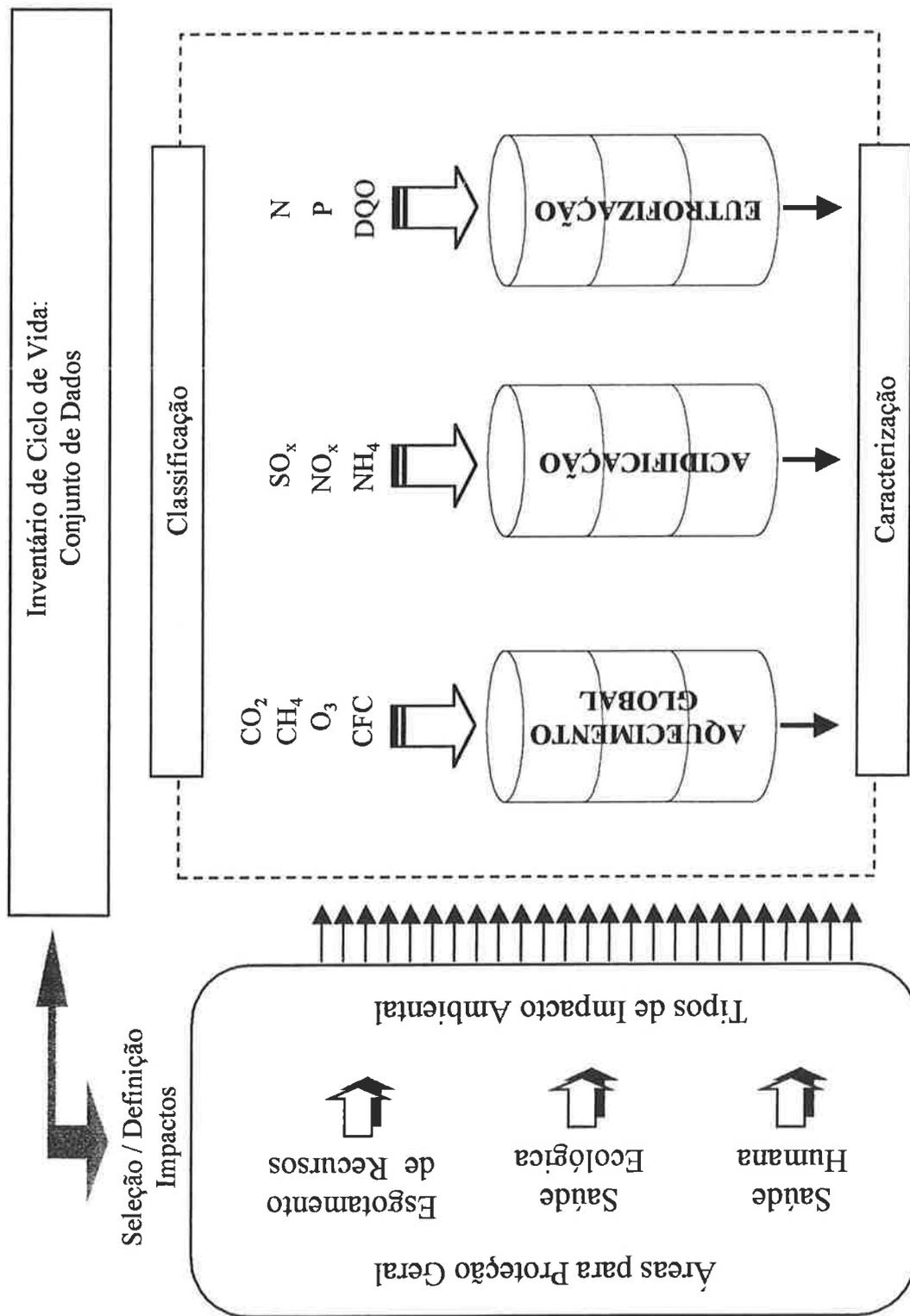


Figura VI.4: Processo de classificação de aspectos ambientais aos seus impactos associados
 Fonte: CHEHEBE (1998)

O processo de conversão é feito através de Fatores de Equivalência, com o objetivo de expressar a relação entre determinado aspecto ambiental e seu impacto. Os valores dos Fatores de Equivalência para algumas das principais categorias de impacto usadas em ACV, são apresentados no Anexos.

A Tabela VI.4 apresenta uma lista dos principais impacto ambientais, seus Indicadores e as bases de referência de referência que os representam.

Para exemplificar o processo de caracterização, é apresentado a seguir, calculo de um indicador de impacto para a geração de efluentes atmosféricos contendo NO_x e SO_2 , para o caso do óleo de soja.

Como apresentado no Anexo C, tanto o NO_x como o SO_2 contribuem para o impacto ambiental Acidificação, cujo Indicador é denominado de Potencial de Acidificação –PA - expresso em termos de kg de SO_2 equivalentes.

Observando-se a Tabela Consolidada de Valores do ICV, nota-se que para a produção de 1,0 t de óleo de soja são gerados 0,75 kg de NO_x e 0,81 kg de SO_2 . Por outro lado, segundo a Tabela A3 do Anexo C, os Fatores de Equivalência desses aspectos ambientais para a Acidificação são respectivamente $f_{\text{NO}_x} = 0,70$ e $f_{\text{SO}_2} = 1,00$, sendo inclusive este último, a própria base de referência da categoria. O valor do Indicador de impacto - PA – será então calculado da seguinte maneira:

$$\text{PA} = f_{\text{NO}_x} \times D_{\text{NO}_x} + f_{\text{SO}_2} \times D_{\text{SO}}$$

então,

$$\text{PA} = 0,70 \times 0,75 + 1,00 \times 0,81 = 1,34 \text{ Kg } \text{SO}_2 \text{ equivalentes}$$

Tabela VI.4: Principais Impactos, Indicadores e Bases de Referência

Impactos Ambientais	Indicadores	Bases de Referência
Exaustão de Recursos Naturais	Potencial de Exaustão de Recursos Naturais	Medida em relação à oferta global de recursos
Aquecimento Global	Potencial de Aquecimento Global	Medida em relação ao efeito de 1,0 kg CO ₂ equivalente
Oxidação Fotoquímica	Potencial de Oxidação Fotoquímica	Medida em relação ao efeito de 1,0 kg C ₂ H ₄ equivalente
Acidificação	Potencial de Acidificação	Medida em relação ao efeito de 1,0 kg SO ₂ equivalente
Toxicidade Humana	Potencial de Toxicidade Humana	Massa corpórea que estaria exposta ao limite aceitável de 1,0 kg de substância
Ecotoxicidade Aquática	Potencial de Ecotoxicidade Aquática	Volume de água que estaria poluída ao nível crítico por 1,0 kg de substância
Ecotoxicidade Terrestre	Potencial de Ecotoxicidade Terrestre	Massa de solo que estaria poluída ao nível crítico por 1,0 kg de substância
Eutrofização	Potencial de Eutrofização	Medida em relação ao efeito de 1,0 kg fósforo
Destruição da Camada de Ozônio	Potencial de Depleção da Camada de Ozônio	Medida em relação ao efeito de 1,0 kg CFC-11 equivalente

Assim, a contribuição do sistema para o impacto ambiental Acidificação corresponde a 1,34 kg de SO₂ equivalentes.

Para garantir a transparência do processo de caracterização, alguns cuidados devem ser tomados:

- indicar se o modelo de elaboração do Fator de Equivalência é amparado por consenso entre organizações científicas internacionais, ou se houve a necessidade de inclusão de julgamento de valores, e
- para os casos em que não houver qualquer embasamento científico descrever – caso seja possível - os efeitos do julgamento de valores sobre os resultados alcançados.

A etapa de caracterização resulta em uma lista de Indicadores de impacto, que compõem o Perfil Ambiental do sistema em estudo, como o apresentado na Tabela VI.5 para um dos tipos de óleo de soja do exemplo.

Os Indicadores de impacto podem não ser facilmente comparáveis entre si. Dessa forma, a AICV pode se valer de um recurso adicional para facilitar a interpretação do Perfil Ambiental do sistema. A esse recurso dá-se o nome de normalização.

A normalização converte todos os Indicadores de impacto a uma base de referência comum. Para a escolha dessa base podem ser eleitos:

- um determinado produto ou substância;
- uma determinada condição de processo, como por exemplo a média industrial de um setor produtivo;
- um padrão legal, ou
- uma expressão econômica, por exemplo o custo de prevenção ambiental.

Tabela VI.5: Perfil Ambiental de um óleo de soja

Indicador	Recursos		Emissões Atmosféricas							Emissões para a água				TOTAL
	Energético	CO ₂	CO	C _x H _y	NO _x	SO ₂	C ₆ H ₁₄	Herbicida	Inseticida	N	Óleo	PO ₄ ³⁻		
PERE	3,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,95	
PAG	-	250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	250,0	
POF	-	-	-	0,407	-	-	0,541	-	-	-	-	-	0,95	
PA	-	-	-	-	0,53	0,81	-	-	-	-	-	-	1,34	
TH	-	-	0,012	-	0,59	0,97	-	-	30-300	-	-	0,031	30-300	
PEA	-	-	-	-	-	-	-	-	200-2000	-	64	-	200-2000	
PE	-	-	-	-	0,098	-	-	-	-	89,0	-	60,0	149	

Legenda:

PERN: Potencial de Exaustão de Recursos Energéticos (GJ)

PAG: Potencial de Aquecimento Global (kg CO₂ equivalente)

POF: Potencial de Oxidação Fotoquímica (kg C₂H₄ equivalente)

PA: Potencial de Acidificação (kg SO₂ equivalente)

TH: Toxicidade Humana (massa corpórea exposta a 1,0 kg de substância)

PEA: Potencial de Ecotoxicidade Aquática (volume de água poluído por 1,0 kg de substância)

PET: Potencial de Ecotoxicidade Terrestre (massa de terra poluída por 1,0 kg de substância)

PE: Potencial de Eutrofização (kg de fosfato equivalente)

Fonte: Adaptado de UNEP (1996)

O processo de normalização ocorre, dividindo-se o valor de cada Indicador de impacto pela base de referência estabelecida, o que por permite que o Perfil Ambiental de um sistema seja apresentado em uma unidade comum, passível portanto de comparação.

A Tabela VI.6 apresenta um exemplo de normalização para o Perfil Ambiental do óleo de soja. Como parâmetro de referência para a normalização, foi utilizada a geração anual de impactos ambientais no globo terrestre, proposta por GUINÉE (1993).

Tabela VI.6: Normalização para a produção de óleo de soja

Indicadores de impacto	Geração de impactos fabricação de 1,0 t de óleo de soja		Geração anual de Impactos no Globo Terrestre		Valor Normalizado (s x 10 ⁻⁴)
	Valor	Unidade	Valor	Unidade	
P. Depleção de Energia	3,95	GJ	235,0	GJ x (ano ⁻¹) x 10 ⁹	5,3
P. Aquecimento Global	250,0	kg	37,7	kg x (ano ⁻¹) x 10 ¹²	2,1
P. Oxidação Fotoquímica	0,95	kg	3,74	kg x (ano ⁻¹) x 10 ⁹	80,0
Potencial de Acidificação	1,34	kg	286,0	kg x (ano ⁻¹) x 10 ⁹	1,5
P. Toxicidade Humana	30-300	kg	576,0	kg x (ano ⁻¹) x 10 ⁹	16,4 - 164,0
P. Ecotoxicidade Aquática	200-2000	m ³	1160,0	kg x (ano ⁻¹) x 10 ¹²	0,07 - 0,7
Potencial de Eutrofização	149,0	kg	74,8	kg x (ano ⁻¹) x 10 ⁹	628,2

Fonte: Adaptado de GUINÉE (1993)

De acordo com os resultados apontados pela Tabela VI.6, pode-se notar por exemplo que a produção de 1,0 t de óleo de soja tem, em termos de Eutrofização, uma contribuição equivalente a 628,2 x 10⁻⁴ segundos do total anual gerado desse impacto sobre a Terra.

De outra forma, o menor impacto ambiental causado por esse sistema, refere-se à Ecotoxicidade Aquática, cuja contribuição que varia entre 0,0007 - 0,07 segundos para as mesmas condições.

VI.3.3 - Atribuição de pesos

Em muitos casos a dificuldade de comparação dos Indicadores de impacto que compõe o Perfil Ambiental do sistema faz com que seja elaborado um indicador único, chamado de Indicador Global. Ao processo de formulação desse Indicador Global de um sistema, dá-se o nome de valoração.

Dada a falta de consenso por parte da comunidade científica, quanto a um procedimento unificado para a elaboração do Indicador Global do sistema, principalmente em virtude do carácter subjetivo dessa atividade, sugere-se uma estrutura conceitual para a condução desse processo:

- hierarquizar os Indicadores de impacto após ter sido aplicado um método preliminar de avaliação, como análise de sensibilidade ou normalização;
- fazer o julgamento de valores para cada Indicadores de impacto, atribuindo a pesos que variem entre 1 e 100. Para isso, devem ser considerados fatores sócio-econômico, geográficos, climáticos, tecnológicos entre outros, que sejam representativos do ambiente onde o sistema está inserido, e
- fazer a agregação dos resultados obtidos em torno de um Indicador Global.

A Figura VI.5 ilustra o método de atribuição de pesos para a composição do Índice Global. Um exemplo do resultado da valoração é apresentado na Tabela VI.7 para a produção de óleo de soja.

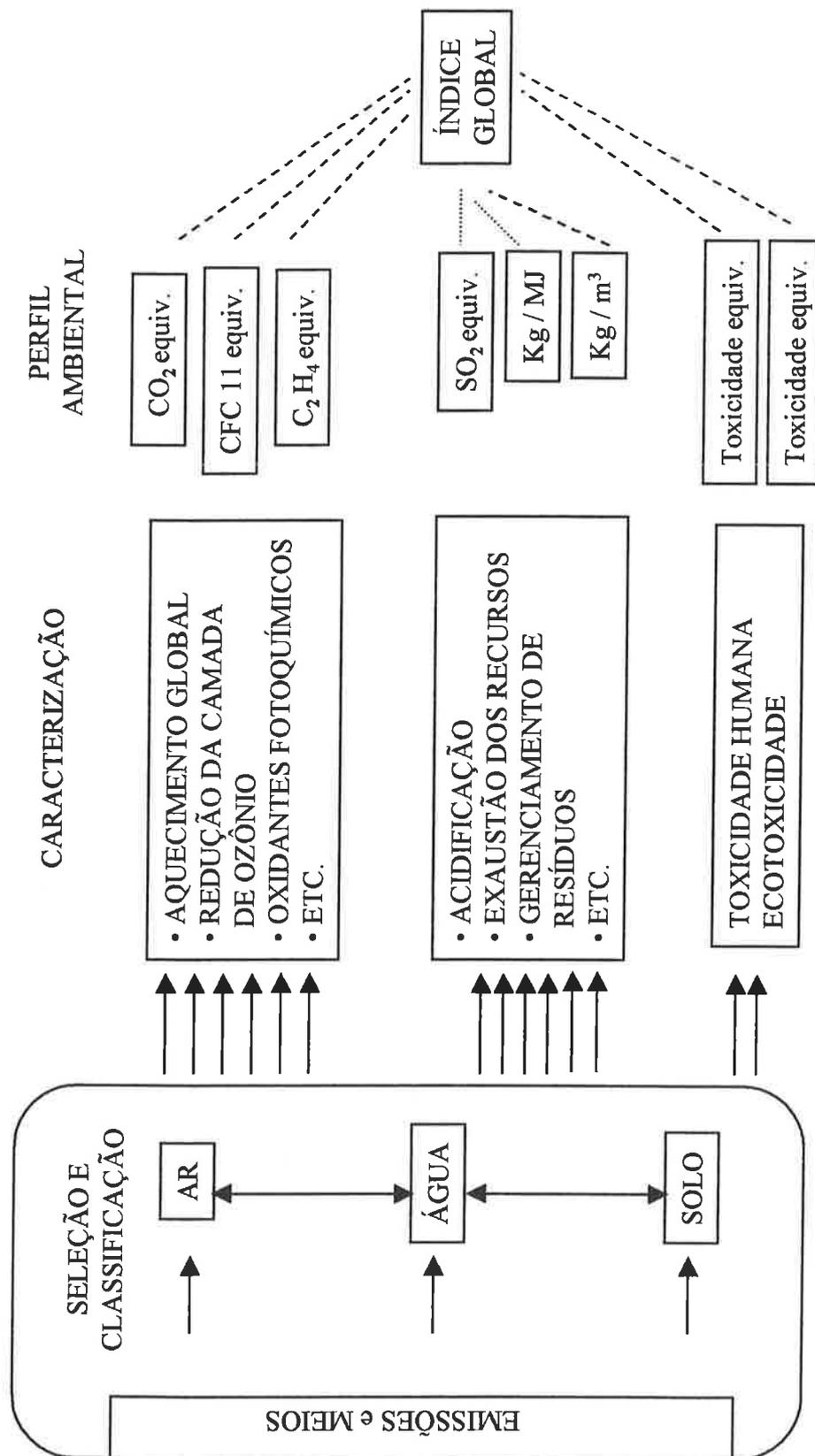


Figura VI.5: Formação do Indicador Global
 Fonte: CHEHEBE (1998)

Tabela VI.7: Tipos de fatores de peso

Ponderação de Impactos Ambientais		
Indicadores de impacto	Método 1	Método 2
Potencial de Depleção de Energia	1/7	0,361
Potencial de Aquecimento Global	1/7	0,240
Oxidação Fotoquímica	1/7	0,113
Potencial de Acidificação	1/7	0,039
Potencial de Toxicidade Humana	1/7	0,039
Ecotoxicidade Aquática	1/7	0,106
Potencial de Eutrofização	1/7	0,102
TOTAL	1,0	1,0

Fonte: UNEP (1996)

No primeiro método, todos os Indicadores que compõem o Perfil Ambiental do sistema recebem igualmente o mesmo peso. Assim, depreende-se que todos os impactos ambientais devem merecer a mesma atenção.

O segundo método apresenta uma ponderação diferente entre os Indicadores, baseada em um estudo complementar onde foram considerados fatores como disponibilidade de recursos naturais materiais e energéticos, capacidade de absorção dos corpos coletores de efluentes líquidos, áreas para disposição de resíduos sólidos, entre outros fatores.

VII - ESTUDO DE CASO: ANÁLISE DE CICLO DE VIDA DO SUPERFOSFATO SIMPLES (SSP)

Introdução

Como apresentado anteriormente, o presente trabalho de dissertação faz parte de um projeto maior que visa comparar em termos ambientais as rotas úmida e térmica de produção de fertilizantes fosfatados.

Dessa forma, para comprovar a aplicabilidade do modelo anteriormente proposto, o mesmo será utilizado para identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental para o ciclo de vida da produção do SSP.

Os resultados desse trabalho serão, em um momento futuro, comparados aos obtidos para estudos equivalentes de ACV a serem realizados para o superfosfato triplo (TSP) e termofosfato, a fim de estabelecer a referida comparação.

O caso

O estudo ora apresentado foi realizado com dados relativos a diferentes empresas atuantes nos setores de lavra e beneficiamento da rocha fosfática, fabricação de ácido sulfúrico e fabricação de SSP.

VII.1 - Definições

Estabeleceu-se que as fronteiras compreenderão as etapas de Lavra da Rocha Fosfática, Beneficiamento (ou transformação em concentrado fosfático), Fabricação de H_2SO_4 e Manufatura do SSP, dentro do ciclo de vida do SSP.

Esta abordagem, conhecida como do berço ao portão da fábrica, exclui o a extração do enxofre elementar e o consumo dos recursos naturais bem como a geração

de rejeitos das etapas de uso e disposição final do produto em estudo, que fogem dos objetivos a se propõe o projeto, ao qual essa dissertação está vinculada.

A unidade funcional para o desenvolvimento do estudo foi fixada em 1000 kg de SSP produzido. Este valor irá balizar a normalização dos dados na etapa de Elaboração do inventário de Ciclo de Vida e Avaliação de Impactos.

Como critério de exclusão de aspectos ambientais, decidiu-se considerar que correntes cuja percentagem de contribuição fosse inferior a 1,0% das correntes totais de entrada e saída seria excluídas do estudo, salvo casos em que o material fosse reconhecidamente impactante para o meio ambiente. Para a alocação de cargas ambientais foi eleito o critério de massa.

VII.2 - Realização do inventário de ciclo de vida

O ICV para o SSP, compreendeu as etapas de elaboração de fluxogramas e identificação de aspectos, para as etapas de lavra e beneficiamento da rocha fosfática e de produção de ácido sulfúrico e manufatura do SSP que compõem o sistema em estudo.

Além disso, para facilitar o entendimento do processo por parte do leitor, é apresentada também uma descrição dos aspectos ambientais significativos relacionados o sistema em estudo, extraída de bibliografias especializadas.

VII.2.1 - Elaboração dos fluxogramas de processo

A figura VII.1 apresenta o fluxograma geral do sistema em estudo, indicando suas fronteiras com o meio ambiente, assim como delimitando as unidades de processo a serem consideradas.

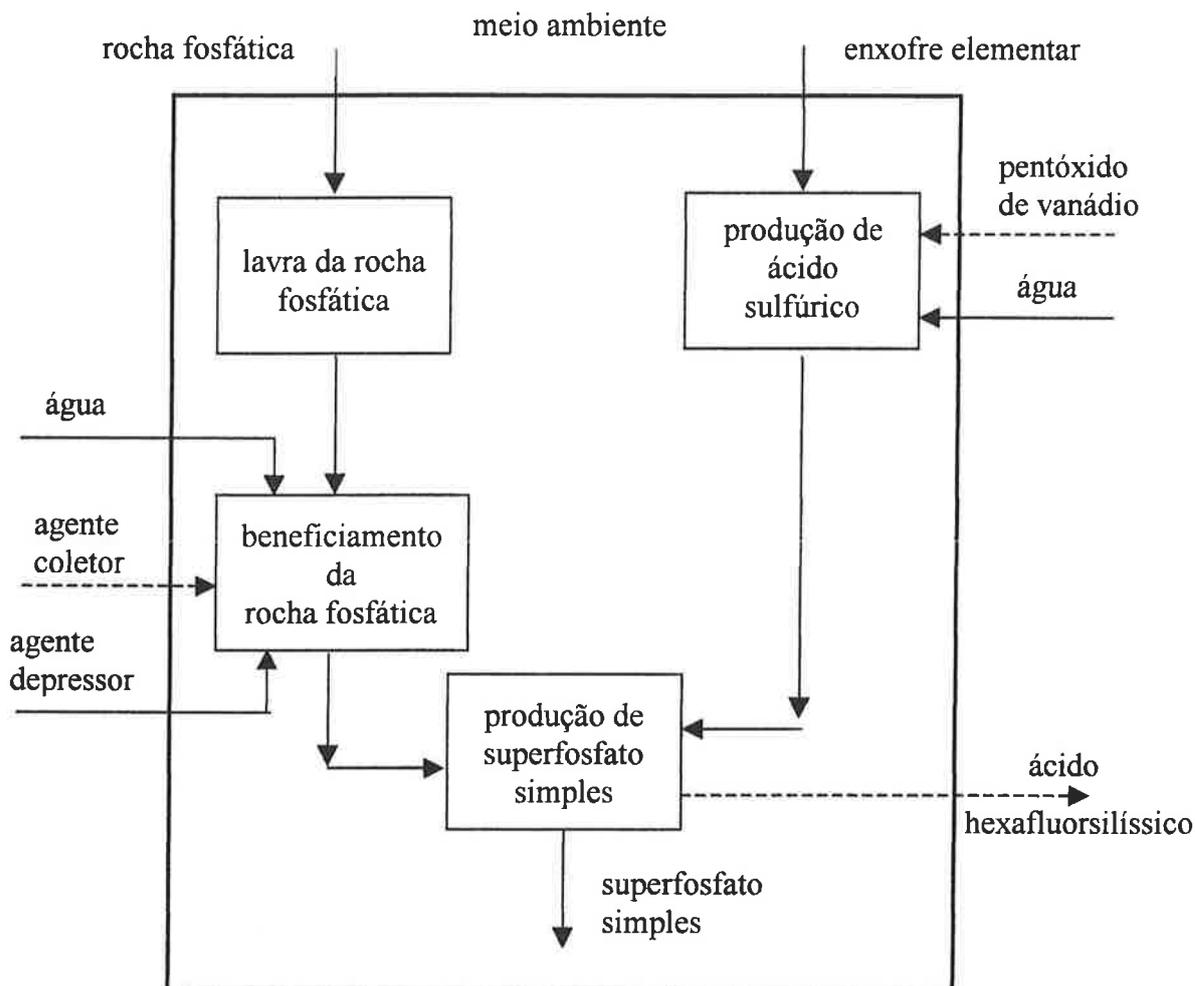


Figura VII.1: Fluxograma geral do sistema em estudo

Além disso, são indicadas as principais correntes de matéria que atravessam as fronteiras do sistema, tanto na forma de correntes elementares, como de materiais auxiliares e de subprodutos. As convenções utilizadas são as mesmas indicadas no manual de aplicação da ACV.

As figuras VII.2, VII.3, VII.4 e VII.5 apresentam os fluxogramas individuais respectivamente das unidades de processo de lavra da rocha fosfática, beneficiamento, produção de ácido sulfúrico e manufatura do SSP.

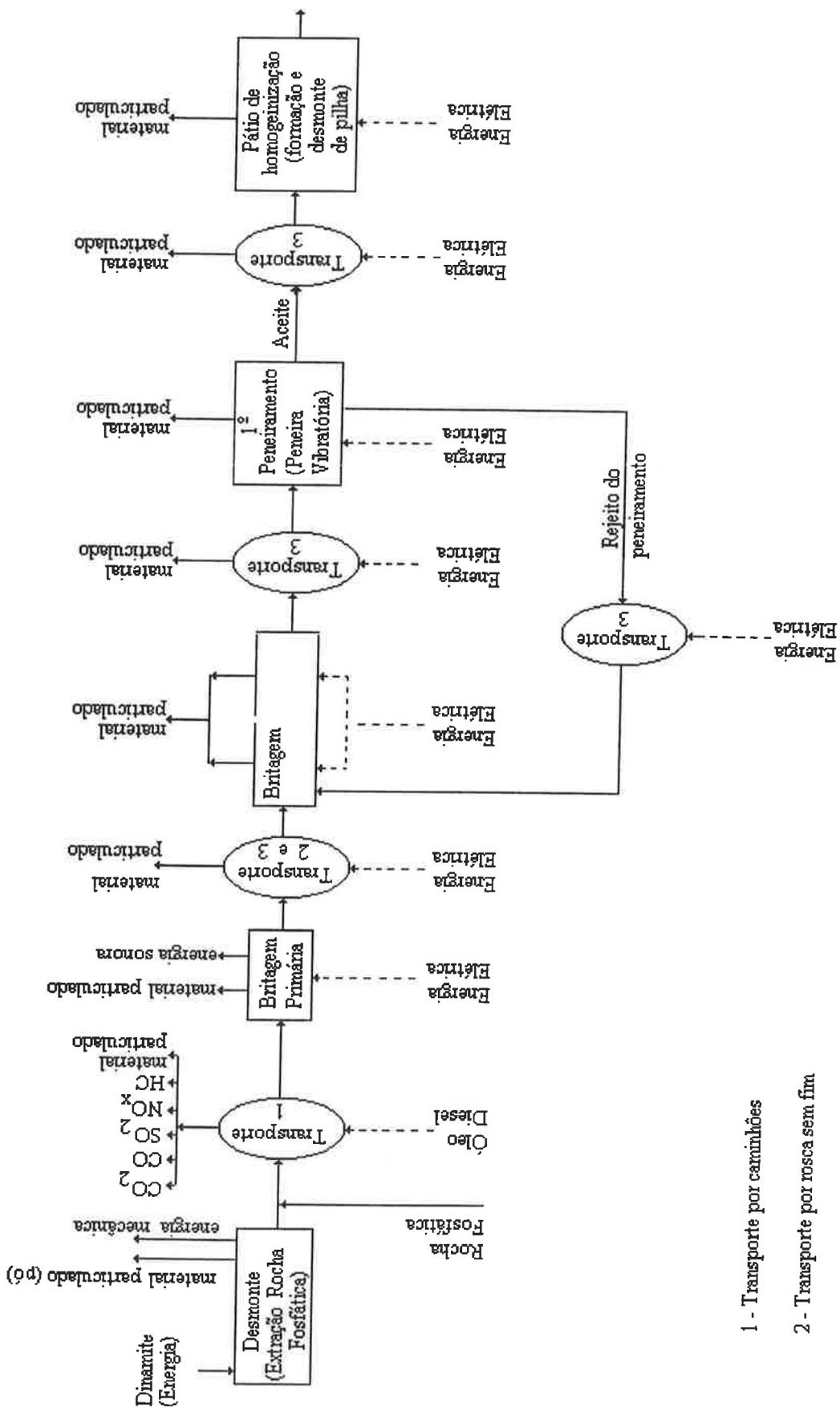


Figura VII.2: Fluxograma da unidade de processo de lavra da rocha fosfática

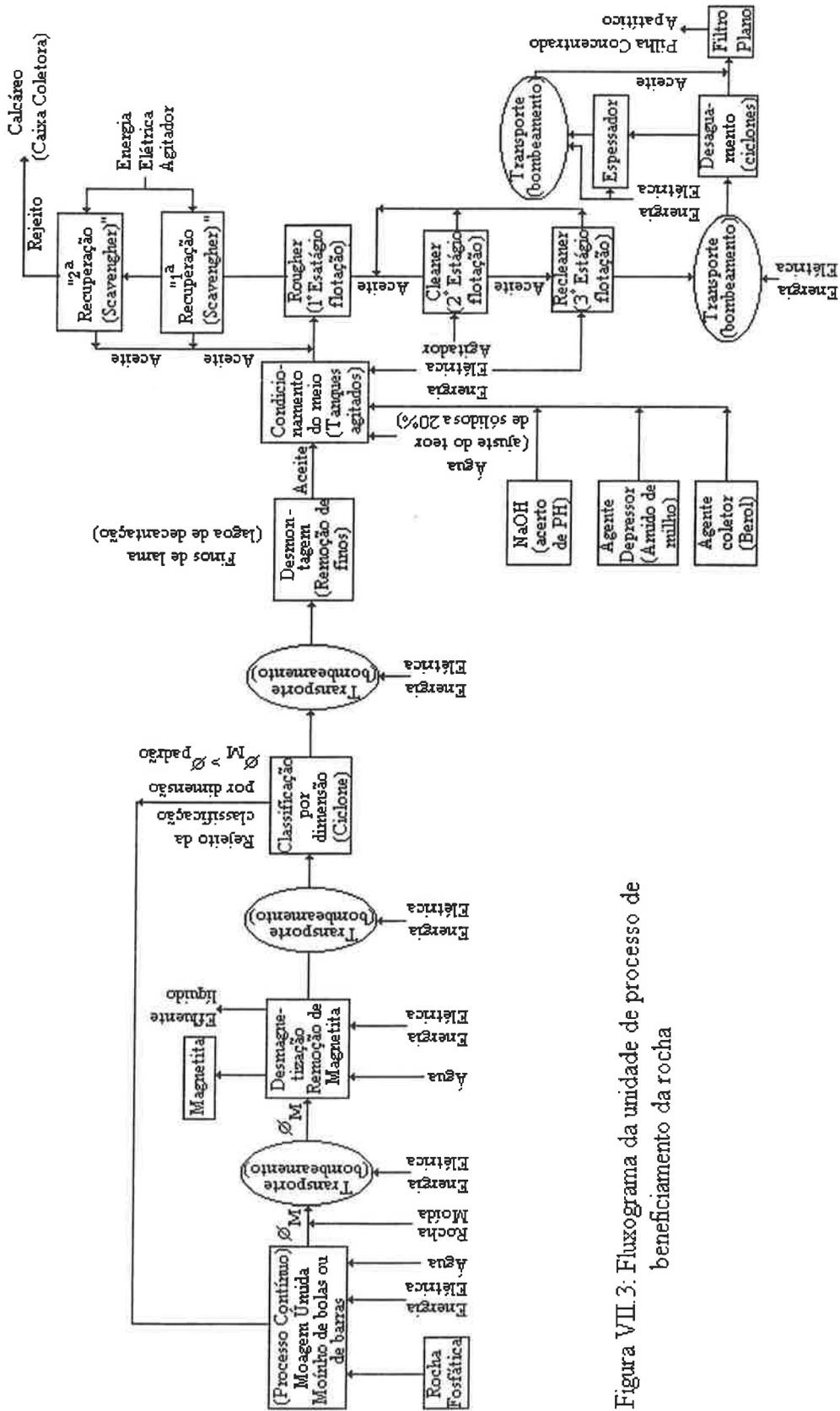


Figura VII.3: Fluxograma da unidade de processo de beneficiamento da rocha

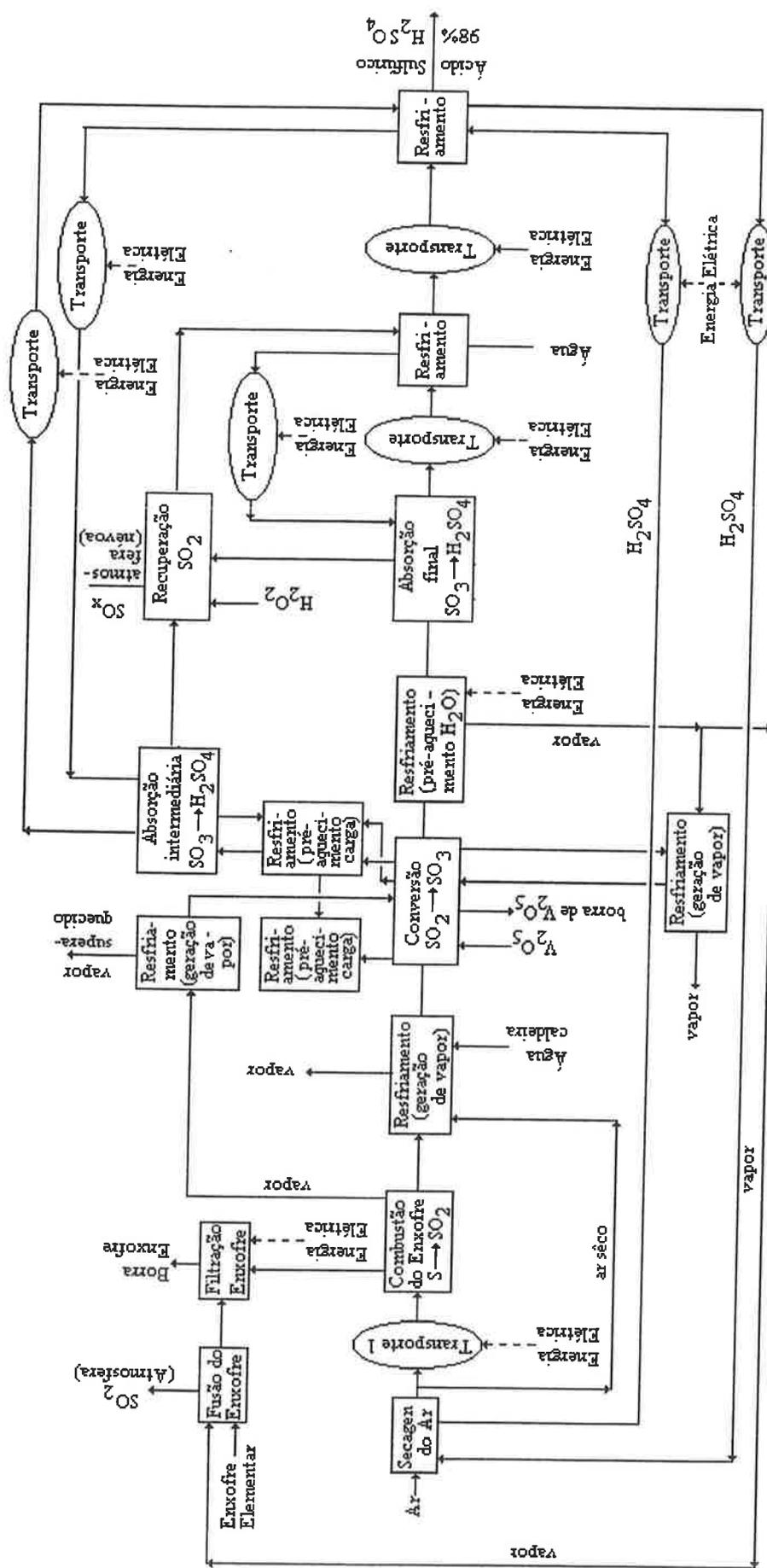


Figura VII.4: Fluxograma da unidade de processo de ácido sulfúrico

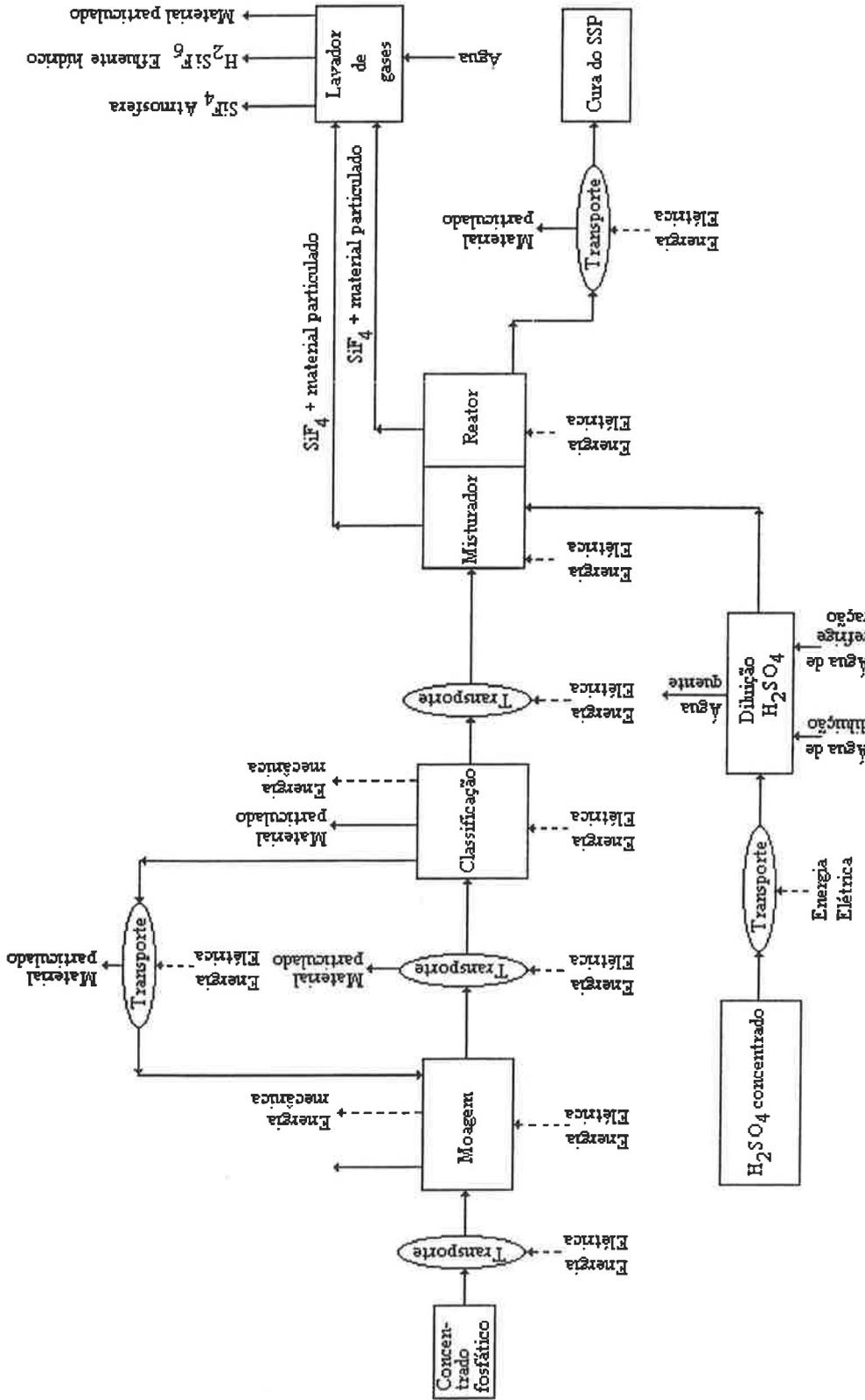


Figura VII.5: Fluxograma da unidade de processo de manufatura de superfosfato simples

VII.2.2 - Descrição de aspectos ambientais

VII.2.2.1 Consumo de recursos energéticos

O consumo de recursos energéticos da produção de SSP pode ser observado ao longo das sucessivas etapas de processamento do concentrado fosfático, produção de ácido sulfúrico, até a manufatura propriamente dita do superfosfato simples.

A mineração da rocha fosfática é realizada através das etapas de lavra, britagem e homogeneização da rocha. Em termos energéticos, há gasto de energia elétrica para o funcionamento de máquinas e equipamentos. Além disso, há consumo de combustíveis fósseis, tanto no transporte de rocha fosfática para a usina de beneficiamento, como de concentrado fosfático da usina para a planta de manufatura de SSP.

No caso da produção de ácido sulfúrico via enxofre elementar, o consumo específico de energia é negativo (BRUNO, 1985); isto significa que a parcela de energia recuperada é maior que aquela requerida para o processo produtivo. Essa recuperação de energia é feita sob forma de geração de vapor, que é parcialmente utilizado na própria unidade de produção de ácido sulfúrico; o excedente, pode ser exportado para usos diversos em outras unidades de processo.

Para a produção de SSP, o consumo de energia corresponde principalmente a energia elétrica destinada ao acionamento dos equipamentos de moagem e a classificação do produto, assim como para o transporte de materiais durante este processamento.

VII.2.2.2 - Emissões atmosféricas

Segundo SILVA (1995), as principais emissões atmosféricas de um sistema como o estudo são:

- anidrido sulfuroso (SO_2): gerado na etapa de combustão do enxofre para fabricação de ácido sulfúrico; ou através da queima de combustíveis fósseis para produção de vapor;
- névoa de SO_3 : também proveniente da planta de ácido sulfúrico, nas torres de absorção de anidrido sulfúrico em solução de H_2SO_4 ;
- fluoretos: quando a apatita é atacada por ácido sulfúrico no misturador e na correia de reação da etapa de produção do SSP, o flúor nela contido passa a ácido fluorídrico (HF), que reage com sílica - também proveniente do concentrado fosfático - formando tetracloreto de silício (SiF_4). O SiF_4 transforma-se em ácido hexafluorsilícico (H_2SiF_6) ao reagir com água no sistema de lavagem dos gases do processo, instalado para reduzir as emissões atmosféricas (CEKINSKI, 1990).
- material particulado: é gerado em diversas etapas do ciclo de vida do superfosfato simples. Na etapa de mineração, durante a britagem e peneiramento, aparece na forma de particulado de rocha; na fabricação do SSP, é encontrado no misturador, na correia de reação e nos sistemas de transporte do produto. Nesta última etapa, são tratados juntamente com os fluoretos pelos lavadores de gases.

VII.2.2.3 - Efluentes líquidos

No ciclo de vida SSP, os efluentes líquidos são gerados nas etapas de beneficiamento da rocha fosfática e produção de SSP.

Embora grande parte da água consumida no beneficiamento da rocha seja

recuperada, há geração de efluentes líquidos nas operações de remoção de magnetita e de deslamagem, principalmente na forma de sólidos dissolvidos.

Já na produção de SSP, o principal efluente líquido gerado é o ácido hexafluorsilícico, produzido nos lavadores de gases.

Este produto pode ser entretanto concentrado e comercializado nesta forma, ou retornar ao processo como fluido de lavagem no controle de emissões de tetrafluoreto de silício e de pó de fosfatos.

Caso isso não ocorra - em função do elevado teor de contaminação por P_2O_5 - o ácido fluorsilícico pode ser ainda neutralizado com lama de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) gerando fluoreto de cálcio (CaF_2) como subproduto, ou ser transformado em um sal de sódio - hexafluoreto de sódio (Na_2SiF_6) - encontrando também, mercado consumidor (HODGE & POPOVICI, 1994).

VII.2.2.4 - Resíduos sólidos

A principal geração de resíduos sólidos acontece na etapa de beneficiamento, proveniente de magnetita e de não apatita, extraídas por ocasião da produção do concentrado fosfático; esses materiais são, via de regra, estocados a céu aberto

Também se caracterizam como resíduos sólidos, a borra de enxofre e o pentóxido de vanádio da unidade de processo de produção de ácido sulfúrico. Esse último, é inclusive classificado como resíduo perigoso, tendo portanto diversas restrições quanto ao seu manuseio, acondicionamento e disposição final.

VII.2.3 - Coleta de dados

A coleta de dados procurou restringir-se a dados primários; nas situações em que isso não foi possível, optou-se pelo uso de dados secundários extraídos de referências bibliográficas especializadas.

A apresentação dos resultados obtidos pela coleta de dados será feita de maneira individualizada, para cada unidade de processo.

VII.2.3.1 - Lavra da rocha fosfática

A Tabela VII.1 apresenta o resultado coleta de dados para a unidade de processo de lavra da rocha, em valores já normalizados a base de cálculo da unidade de processo, definida como 1,0 t de rocha fosfática.

Tabela VII.1: Aspectos ambientais da lavra da rocha fosfática

Unidade de processo de lavra da rocha fosfática	
Correntes de Entrada	
Recursos Materiais	(kg/t rocha fosfática)
rocha fosfática bruta	1.176,47
água	1.891,75
Materiais de outros sistemas	(kg/t rocha fosfática)
dinamite	0,12 – 0,131
Recursos Energéticos	(MJ/t rocha fosfática)
energia elétrica	7,14
Correntes de Saída	
Produto	(kg/t rocha fosfática)
rocha fosfática a 8,5% de P ₂ O ₅	1.000,00
Subproduto	(kg/t rocha fosfática)
-	-
Emissão Atmosférica	(kg/t rocha fosfática)
material particulado	8,22
Outros	(MJ/t rocha fosfática)
energia mecânica liberada pela dinamite	0,52

No que se refere aos aspectos ambientais de entrada da unidade de processo de lavra cabem os seguintes comentários:

- consumo de água é referente a duas parcelas: 136,23 kg/t rocha fosfática incorporados pela rocha por ocasião da própria extração do minério, elevando o teor de umidade deste de 0,22% para cerca de 12,16%; e 1.755,52 kg/t rocha fosfática consumidas na rebitagem do material.
- o consumo de dinamite foi desconsiderado uma vez que corresponde apenas a 0,006 – 0,007 % do total de entrada;
- valor de consumo de energia elétrica é um valor consolidado a partir dos consumos de todas as operações envolvidas nessa unidade de processo. Em termos de valores parciais, os consumos individualizados seria respectivamente:
A. lavra (propriamente dita): 1,804 MJ/t rocha fosfática;
B. britagem primária e homogeneização: 1,808 MJ/t rocha fosfática; e
C. rebitagem e peneiramento: 4,244 MJ/t rocha fosfática.

Quanto aos aspectos ambientais de saída deve-se considerar que:

- a emissão de material particulado refere-se a um valor consolidado das emissões individuais dos seguintes pontos de perda: britagem primária, homogeneização, rebitagem e transporte de rocha fosfática interno a unidade de processo, que é realizado por correias transportadoras. Entretanto, novamente o valor dessa corrente – 0,82% - é inferior ao percentual mínimo para a exclusão de aspectos ambientais, sendo portanto desconsiderado;

- a energia liberada pela explosão da dinamite foi calculada a partir de informações levantadas em BOILEAU (1987), supondo que a dinamite empregada fosse do tipo gelatinosa, a base de nitroglicerina, própria para mineração e cuja energia liberada é da ordem de 3.970,5 KJ/kg de dinamite. Esse valor foi entretanto, também desconsiderado, em virtude da exclusão da dinamite;
- a operação de transporte que aparece no fluxograma, correspondente ao percurso entre a frente de lavra e as demais operações da unidades de processo – cerca de 5 km e será considerada posteriormente em separado, como uma unidade de processo própria;
- a unidade de processo de lavra da rocha fosfática não gera subprodutos e portanto não precisarão ser aplicados para essa situação quaisquer critérios de alocação.

VII.2.3.2 - Beneficiamento da rocha fosfática

A Tabela VII.2 traz o resultado da coleta de dados para a unidade de processo de beneficiamento da rocha. Assim como no caso anterior, os dados apresentados estão normalizados à base de cálculo da unidade de processo, que nesse caso corresponde a 1,0 t de concentrado fosfático a 32,2% de P_2O_5 .

Tabela VII.2: Aspectos do beneficiamento da rocha fosfática

Unidade de processo de beneficiamento da rocha fosfática	
Correntes de Entrada	
Recursos Materiais	(kg/t concentrado fosfático)
rocha fosfática 8,5% de P ₂ O ₅	6.313,73
Água	7.863,39
Materiais de outros sistemas	(kg/t concentrado fosfático)
hidróxido de sódio	1,093 – 1,366
agente coletor	1,967
agente depressor	2,732
Recursos Energéticos	(MJ/t concentrado fosfático)
energia elétrica	579,31
Correntes de Saída	
Produto	(kg/t concentrado fosfático)
concentrado fosfática a 32,2% P ₂ O ₅	1.000,00
Subproduto	(kg/t concentrado fosfático)
-	-
Efluente líquido	(kg/t concentrado fosfático)
Magnetita	4.103,83
Lama	35.885,25
rejeito (não apatita)	7.021,86
Resíduo sólido	(kg/t concentrado fosfático)
Magnetita	1.229,51
Lama	1.087,43
rejeito (não apatita)	4.103,83

Para que seja produzida 1,0 t de concentrado fosfático com 32,2% P₂O₅ devem ser considerados, em termos ambientais as seguintes correntes de entrada:

- para que seja produzido 1,0 t de concentrado fosfático, serão necessários 6.313,73 kg de rocha fosfática já que, segundo BARBOSA (1980), o rendimento da etapa de beneficiamento em termos de P₂O₅ é da ordem de 60%;

- a unidade de processo de beneficiamento é a maior consumidora de água de todo o sistema; o consumo de água nessa unidade é de $7,86 \text{ m}^3/\text{t}$ de concentrado fosfático, na forma de água nova. Trata-se de um valor bastante aceitável, considerando que, segundo SILVA (1995), para cada tonelada de concentrado fosfático produzido, o consumo de água nova no beneficiamento pode variar entre $6,0 - 12,0 \text{ m}^3$ para as plantas brasileiras. A recuperação de água no beneficiamento é de 54,1%;

- em termos de materiais auxiliares, os consumos específicos são os seguintes:

A. hidróxido de sódio: $1,093 - 1,366 \text{ kg/t}$ concentrado fosfático;

B. agente coletor $1,967 \text{ kg/t}$ concentrado fosfático; e

C. agente dispersos: $2,732 \text{ kg/t}$ concentrado fosfático.

Todos esses valores estão entretanto, abaixo do limite mínimo estabelecido como critério de inclusão de aspectos ambientais, já que suas participações na corrente de entrada são respectivamente de 0,008% - 0,010% para o hidróxido de sódio, 0,014% para o agente coletor e 0,019% para o agente depressor;

- consumo de energia elétrica do beneficiamento é de $579,31 \text{ MJ/t}$ para cada tonelada de concentrado fosfático produzida; esse, é um valor consolidado, originário das seguintes operações:

A. concentração da rocha: $494,48 \text{ MJ/t}$ de concentrado fosfático;

B. captação de água recuperada : $24,26 \text{ MJ/t}$ de concentrado fosfático;

C. captação de água nova : $34,27 \text{ MJ/t}$ de concentrado fosfático; e

D. concentração final: $26,30 \text{ MJ/t}$ de concentrado fosfático;

Quanto as correntes de saída, cabem as seguintes observações:

- como no caso anterior, a unidade de processo de beneficiamento do concentrado fosfático também não gera subprodutos;
- a parcela referente aos efluentes líquidos, corresponde às quantidades de água retidas com os resíduos sólidos de processo que não puderam ser recuperadas e acabaram carreando sólidos. Para melhor compreensão desse fato apresenta-se a seguir, na Tabela VII.3, o balanço de água do beneficiamento da unidade em estudo.

Tabela VII.3: Balanço de água do beneficiamento

Entrada		Saída	
Corrente	<u>kg de água</u> t conc. fosfático	Corrente	<u>kg de água</u> t conc. fosfático
Água na Rocha Fosfática 8,5% P ₂ O ₅	14.054,62	Água com Magnetita	4.103,825
Água Nova	7.863,39	Água com Lama	35.388,25
Água Recuperada	25.825,14	Água com Rejeito (não apatita)	7.021,86
		Água com Conc. Fosfático 32,2% P ₂ O ₅	732,21
Total	47.743,14	Total	47.743,14

Considerou-se que, como a água que não foi recuperada continha sólidos dissolvidos de magnetita, lama e rejeito, essas correntes se caracterizavam como efluentes líquidos;

- como resíduos sólidos, foram contabilizadas as quantidades de minerais acessórios separados da rocha fosfática durante o processo de concentração;
- nessa etapa, há uma operação de transporte, que compreende o deslocamento do concentrado fosfático entre a mina e a planta de produção de SSP. Como no caso anterior, os aspectos ambientais relativos a esse deslocamento de cerca de 1.100 km serão avaliados em uma unidade de processo própria;

VII.2.3.3 - Produção de ácido sulfúrico

Os aspectos ambientais relativos a unidade de processo de produção de ácido sulfúrico estão apresentados na Tabela VII.4. A base de cálculo para essa unidade foi estabelecida em 1,0 t de H_2SO_4 (100%).

No que diz respeito as correntes de entrada deve-se considerar:

- os 334,00 kg de enxofre que entram no sistema, são assim distribuídas na saída: 1,30 kg contidos nos 2,607 kg de SO_2 ; 0,02 kg contidos no SO_3 e 6,22 kg contidos na borra (suposta como contendo 70% de enxofres);

Tabela VII.4: Aspectos ambientais para produção de H₂SO₄ (100%)

Unidade de processo de produção de H ₂ SO ₄ (100%)	
Correntes de Entrada	
Recursos Materiais	(kg/t H₂SO₄)
enxofre elementar	334,00
Água	1.000,00 – 1.200,00
Recursos Energéticos	(MJ/t H₂SO₄)
energia térmica: S → H ₂ SO ₄	4.665,00 – 5.598,00
energia elétrica	139,95 – 167,94
Correntes de Saída	
Produto	(kg/t H₂SO₄)
ácido sulfúrico (100%)	1.000,00
Subproduto	(kg/t H₂SO₄)
vapor de água a 40kgf/cm ² e 400° C sat.	1.000,00 – 1.200,00
Energia associada	(MJ/t H₂SO₄)
vapor de água a 40kgf/cm ² e 400° C sat.	2.799,00 – 3.359,00
Emissões atmosféricas	(kg/t H₂SO₄)
fumos de SO ₂	2,607
névoa de SO ₃	0,047
Resíduos Sólidos	(kg/t H₂SO₄)
borra de Enxofre	8,81
pentóxido de vanádio	48,951
Dissipação de energia	(MJ/t H₂SO₄)
Radiação	1.866,00 – 2.239,00

- a água consumida na unidade de processo é usada na produção de vapor saturado a 40 kgf/cm² e 400°C visando a recuperação do calor gerado no processo de transformação de enxofre em H₂SO₄. O valor apontado é citado por SANDER (1984) e por BRUNO (1985) e refere-se a quantidade de água que entra em uma caldeira existente no processo especialmente para a recuperação de energia.

- a planta de produção de ácido sulfúrico é auto suficiente em termos de energia elétrica; isso quer dizer que o vapor gerado é suficiente para atender toda a demanda de energia do processo sem a necessidade de fontes complementares. A Tabela VII.5 apresenta a Distribuição de Fluxos de Energia proposta por SANDER (1984), expresso em termos percentuais, para uma unidade equivalente à referida no presente estudo.

Tabela VII.5: Distribuição de Fluxo de Energia

Balanco de Energia			
Energia que entra na unidade de processo		Energia que sai da unidade de processo	
Origem	(%)	Origem	(%)
Reação Exotérmica:			
S → H₂SO₄	97,0	Vapor de Alta Pressão (40kgf/cm² e 400° C sat.)	60,0
Energia Elétrica	3,0	Energia perdida no Circuito de refrigeração	37,0
		Emissões Atmosféricas	2,5
		Ácido Sulfúrico (100%)	0,5

Fonte : Adaptado de SANDER (1984)

Considerando que a entalpia do vapor saturado com 40kgf/cm² e 400° C vale 2.799,00 MJ/t vapor, a energia gerada para cada tonelada de ácido sulfúrico variará entre 2.799,00 – 3.359,00 MJ/t .

Pelos dados apresentados na Tabela VII.5, isso corresponde a 60% da energia total gerada, o que perfaz um total de 4.665,00 – 5.598,00 MJ/t H₂SO₄ 100% em termos de energia de reação.

A diferença entre a energia gerada pela reação e a parcela transformada em vapor - cerca de 40% - foi considerada como energia dissipada, e totalizou um valor variável entre 1.866,00 – 2.239,00 MJ/t H₂SO₄ 100%. Os valores apontados para consumo de energia elétrica também saem da balanço apresentado na Tabela VII.5.

Quanto às correntes de saída, a unidade de processo de produção de ácido sulfúrico apresenta:

- como subproduto de processo a própria geração de vapor de alta pressão.

Assim, deverá ser realizada uma alocação de cargas ambientais para essa unidade de processo. Como o critério de alocação escolhido foi escolhido foi o de massa de produto e subproduto a alocação é feita da seguinte forma:

Massa de ácido sulfúrico produzida na unidade de processo: 1.000,00 kg

Massa de vapor de 40 kgf/cm² a 400°C (valor médio da faixa): 1.100, 00 kg

Fator de alocação para o ácido sulfúrico: $F_1 = \frac{1.000,00 * 100\%}{1.000,00 + 1.100,00} = 47,62\%$

Dessa forma, todos os aspectos ambientais deverão ser multiplicados por 47,62%, que representa a parcela de contribuição do ácido sulfúrico para essa geração. Os valores relativos a alocação de cargas ambientais da unidade de processo de produção de ácido sulfúrico serão apresentados posteriormente na Tabela VII.9 - Tabela Consolidada de Valores do sistema.

- a unidade de processo de H_2SO_4 tem como rejeitos atmosféricos, as emissões de SO_2 e de névoa de SO_3 . Os valores das correntes correspondentes a estes dois aspectos ambientais foram, respectivamente, 2,607 kg/t H_2SO_4 e 0,047 kg/t H_2SO_4 . Embora estes valores sejam passíveis de exclusão pelo critério de quantidade, sua importância em termos de impacto sobre o meio ambiente faz com que esse aspectos ambientais sejam considerados pelo estudo.
- a contribuição percentual da borra de enxofre para a correntes de saída é de apenas 0,41%; entretanto, dado o impacto desse rejeito sobre o meio ambiente, ele será também considerado no estudo;
- a contribuição do pentóxido de vanádio para as correntes de entrada da unidade de processo é de 0,67%; entretanto, o fato de ser esse um resíduo perigoso – portanto com elevado impacto sobre o meio ambiente - faz com o mesmo seja também considerado no estudo

VII.2.3.4 - Manufatura de SSP

Os aspectos ambientais relacionados a unidade de processo de manufatura de SSP estão apresentados na Tabela VII.6. A base de cálculo para essa unidade foi estabelecida em 1,0 t de SSP. Em termos de correntes de entrada, o ICV para o SSP levou em conta os seguintes aspectos ambientais:

- os valores das correntes de concentrado fosfático (623,68 kg/t SSP) e de ácido sulfúrico (390,00 kg/t SSP) adotados neste estudo foram extraídos de UNIDO (1980);

Tabela VII.6: Aspectos ambientais para manufatura de SSP (18,2% P₂O₅)

Unidade de processo de manufatura de SSP	
Correntes de Entrada	
Recursos Materiais	(kg/t SSP 18,2%)
concentrado fosfático 32,2%	623,68
ácido sulfúrico 100%	390,00
água a 21,1°C	1.437,36 – 1.442,92
Recursos Energéticos	(MJ/t SSP 18,2%)
energia elétrica	410,00
Correntes de Saída	
Produto	(kg/t SSP 18,2%)
superfosfato simples	1.000,00
Subproduto	(kg/t SSP 18,2%)
ácido hexafluorsilícico	9,26 – 11,58
Energia Associada	(MJ/t SSP 18,2%)
água aquecida a 51,1°C	156,49
Emissões Atmosféricas	(kg/t SSP 18,2%)
ácido fluorídrico	0,011
material particulado	0,056
Efluentes Líquidos	(kg/t SSP 18,2%)
fosfatos (na forma de PO ₄ ⁻)	2,02

• a quantidade de água utilizada na unidade de processo, que varia entre 1.437,36 – 1.442,92 kg/t SSP, corresponde a um valor consolidado proveniente das seguintes parcelas:

- A. água de diluição do ácido sulfúrico: 167,14 kg/t SSP, correspondente a diluição do ácido sulfúrico de 100% para 70%, concentração na qual esse será usado no processo;
- B. água para lavagem dos gases: o consumo de água do lavador de gases da unidade de produção de SSP, varia entre 22,22 – 27,78 kg/t de SSP;

C. água para resfriamento do ácido sulfúrico: cerca de 1.248,00 kg/t SSP a 21,1°C, são necessários para absorver 156,49 MJ/t de SSP gerados no processo de diluição do ácido sulfúrico dado o caráter exotérmico da reação. Esses valores foram calculados através de um balanço energético para a operação de diluição do ácido sulfúrico, com base em valores de entalpia coletados em HOUGEN, WATSON & RAGATZ (1954). A temperatura final da água de refrigeração é de 51,1°C.

- dada a indisponibilidade de conseguir dados primários confiáveis para o consumo de energia da produção, optou-se por considerar o valor consolidado de 410,00 MJ/t SSP proposto por IFDC (1982), para plantas com processo equivalente ao utilizado na unidade em estudo, localizadas nos EUA.

Em termos de correntes de saída, a coleta de dados para a manufatura de SSP mereceu as seguintes observações:

- a manufatura de SSP gera como subproduto o ácido hexafluorsilícico (H_2SiF_6), produzido no lavador de gases para controle de emissões atmosféricas. Trata-se de uma solução a 23% em volume de H_2SiF_6 , cuja produção oscila entre 9,26 – 11,57 kg de ácido hexafluorsilícico para cada tonelada de SSP produzida. Por se tratar de um subproduto do processo, cabe nesse caso uma alocação de cargas ambientais. Assim, o fator de alocação foi calculado da seguinte maneira:

Massa de SSP produzida na unidade de processo: 1.000,00 kg

Massa de H_2SiF_6 a 23% em volume (valor médio da faixa): 10,42 kg

Fator de alocação para o ácido sulfúrico: $F_2 = \frac{1.000,00 * 100\%}{1.000,00 + 10,42} = 98,97\%$

O resultado da alocação por massa revela que a quase totalidade de cargas ambientais geradas na unidade de processo deverá ser alocada para o SSP;

- a emissão de ácido fluorídrico (HF) corresponde a parcela que passa pelo sistema de controle de emissões atmosféricas e é disposto no ambiente. Embora o valor da contribuição dessa corrente seja inferior ao valor mínimo estabelecido como critério de exclusão de aspectos ambientais, a corrente de HF será considerada no estudo, em virtude do impacto ambiental por essa substância;
- o valor apontado para emissão de material particulado corresponde a um valor consolidado das seguintes emissões medidas na unidade de processo:

A. moagem do concentrado fosfático: 0,018 kg/t SSP;

B. descarga do concentrado moído: 0,0035 kg/t SSP;

C. emissões do tanque de mistura e do reator de produção de SSP, após a passagem pelo sistema de controle de emissões atmosféricas: 0,0206 kg/t SSP;

D. transporte do SSP produzido através de correias transportadoras para armazenamento: 0,01369 kg/t SSP;

A contribuição percentual do material particulado para o total de correntes de saída da unidade de processo é de 0,055%, estando abaixo do limite estabelecido pelo critério de exclusão por quantidade; além disso observou-se que o impacto causado por esse material sobre o meio ambiente não é muito significativo. Dessa forma, o aspecto ambiental material particulado na produção de SSP não será considerado no estudo.

- a concentração média de PO_4^- medida na saída da estação de tratamento de efluentes da planta de SSP, foi de 581,15 mg/l. Considerando que no mesmo período a vazão média do tratamento foi de 125,00 m³/h, a corrente de fosfatos

que deixa o sistema é de 2,02 kg/t SSP. Embora a contribuição dessa corrente sobre a quantidade total de matéria que deixa o sistema seja também inferior ao limite mínimo de exclusão de aspectos ambientais, esse valor será também considerado dado seu impacto ambiental.

VII 2.3.5 - Unidade de processo de transporte

A unidade de processo de transporte compreende dois deslocamentos:

- A. da mina para a usina de beneficiamento, faz-se o transporte de rocha fosfática num total de 5,0 km de distância e
- B. da usina de até a planta de produção de SSP transporta-se o concentrado fosfático por um trajeto de 1.100 km.

O transporte é realizado em caminhões com capacidade de 27,2 t de material carregado e consumo de 2,20 km/l de óleo diesel. A base de cálculo para essa operação deve levar em conta a distância percorrida pelo veículo; assim, estabeleceu-se para esse caso, 1,0 km x 27,2 t de material transportado.

Caso A: deslocamento da mina para a usina de beneficiamento

Os valores calculados para os aspectos ambientais do transporte de exatos 4.628,34 kg de rocha fosfática a 8,5% de P_2O_5 – quantidade necessária para a produção de 1,0 t de SSP – por 5,0 km entre a mina e a usina de beneficiamento, estão apresentados na Tabela VII.7.

Tabela VII.7: Aspectos ambientais do transporte da rocha fosfática

Unidade de processo de transporte	
Correntes de Entrada	
Recursos Materiais	(kg/t SSP 18,2%)
óleo combustível	0,31
Recursos Energéticos	(MJ/t SSP)
consumo de energia	12,69
Correntes de Saída	
Emissões Atmosféricas	(kg/t SSP 18,2%)
SO _x	0,001277
CO	0,010893
hidrocarbonetos (C _x H _y)	0,001787
NO _x	0,018041
material particulado	0,000638
CO ₂	1,24766

Os valores apresentados pela Tabela VII.7 relativos as emissões atmosféricas foram retirados de SENDLEIN (1983) que realizou estudos relativos a máquinas e equipamentos de transporte para a mineração. Apresenta-se a seguir um exemplo de cálculo para melhor entendimento do leitor.

Um veículo próprio para mineração, cuja capacidade de transporte é 27,2 t, e o desempenho é de 2,20 km/l de óleo diesel emite, segundo SENDLEIN, 0,0212 kg de NO_x para cada quilômetro rodado. Considerando que para esse caso são transportados 4.628,34 kg de rocha fosfática a 8,5% de P₂O₅ por 5,0 km, é conveniente então calcular um fator de ajuste a base de cálculo da unidade de processo:

$$\text{Fator de ajuste} = \frac{5,0 \text{ km} * 4.628,34 \text{ kg rocha fosfática (8,5\%)}}{1,0 \text{ t de SSP (18,2\%)} * 27.200 \text{ kg de rocha fosfática (8,5\%)} * \text{km}}$$

$$\text{Fator de ajuste} = 0,851 \text{ km/ t SSP (18,2\%)}$$

Assim, se o fator de ajuste for multiplicado pelo valor apresentado, por SANDLEIN o valor de emissão de NO_x a unidade de processo já será diretamente normalizada a unidade funcional do sistema:

$$\text{Emissão de NO}_x = 0,0212 \text{ kg de NO}_x/\text{km} * 0,851 \text{ km/ t SSP (18,2\%)}$$

$$\text{Emissão de NO}_x = 0,018041 \text{ kg de NO}_x/\text{ t SSP (18,2\%)}$$

Os valores de consumo de óleo de consumo de combustível foram também calculados através do mesmo fator de ajuste; porém, nesses casos considerou-se ainda que a densidade média para o óleo diesel fosse de 0,8 g/cm³ e seu Poder Calorífico da ordem de 40.964 KJ/ kg de óleo.

Caso B: deslocamento da usina de beneficiamento para a planta de produção de SSP

Os cálculos realizados no caso B são idênticos aos do caso anterior, considerando apenas que a quantidade de material transportado agora é de 623,68 kg de concentrado fosfático (32,2% de P₂O₅) para a produção de 1,0 t de SSP (18,2% de P₂O₅) e que o trajeto compreende 1.100 km. A Tabela VII.8 apresenta os resultados para essa operação.

Tabela VII.8: Aspectos ambientais do transporte do concentrado fosfático

Unidade de processo de transporte	
Correntes de Entrada	
Recursos Materiais	(kg/t SSP 18,2%)
óleo combustível	9,38
Recursos Energéticos	(MJ/t SSP 18,2%)
consumo de energia	384,10
Correntes de Saída	
Emissões Atmosféricas	(kg/t SSP 18,2%)
SO _x	0,04025
CO	0,009147
Hidrocarbonetos (C _x H _y)	0,05946
NO _x	0,54884
material particulado	0,03659
CO ₂	37,0470

VII.2.4 - Normalização de valores

Após ter sido concluída a coleta de dados para o sistema de produção do SSP, passa-se agora a etapa de normalização de valores, cujo produto final será a Tabela Consolidada de Valores que orientará a avaliação de impactos.

Como apresentado anteriormente, a elaboração da tabela consolidada, consiste no ajuste de todos os aspectos ambientais que de fato farão parte do sistema, a unidade funcional do mesmo, e que aqui foi estabelecida em 1,0 t de SSP (18,2%).

Além disso, devem ser aplicados os fatores de alocação de cargas ambientais, calculados para as unidades de processo de produção de ácido sulfúrico e manufatura de SSP.

Como o conteúdo técnico dessas operações já foi apresentado no capítulo de Discussão e sua execução foi detalhada no capítulo Modelo de execução, os valores consolidados estão apresentados na Tabela VII.9.

Tabela VII.9: tabela Consolidada de Valores para a produção de 1,0 t de SSP

U.P. aspecto ambiental	Lavra da rocha fosfática	Beneficiamento do conc. Fosfático (32,2% P ₂ O ₅)	Produção de H ₂ SO ₄ (100%)	Produção de SSP (18,2% P ₂ O ₅)	Transporte
Consumo de energia (MJ)					
energia elétrica	33,03	361,30	-	-	-
comb. fósseis	-	-	-	-	298,29
Consumo de água (kg)					
moagem	8.755,68	-	-	-	-
diluição	-	4.909,27	-	165,42	-
caldeira	-	-	185,72 – 222,86	-	-
troca térmica	-	-	-	1.235,15	-
lavador gases	-	-	-	21,99 – 27,49	-
Emissões atmosféricas					
CO	-	-	-	-	0,0200
hidrocarbonetos	-	-	-	-	0,0613
NO _x	-	-	-	-	0,5669
SO ₂	-	-	0,484	-	0,0415
mat. particulado	-	-	-	0,055	0,0372
CO ₂	-	-	-	-	38,2946
névoa de SO ₃	-	-	0,009	-	-
HF	-	-	-	0,011	-
Resíduo sólidos					
magnetita	-	766,82	-	-	-
lama	-	678,21	-	-	-
não apatita	-	2.559,49	-	-	-
borra de S	-	-	1,636	-	-
borra de V ₂ O ₅	-	-	9,091	-	-
Efluente líquidos					
deslamagem	-	10.086,17	-	-	-
desmagnetização	-	1.153,45	-	-	-
flotação	-	1.973,61	-	-	-
PO ₄ ⁻	-	-	-	1,99	-

VII.3 - Realização da avaliação de Impactos

A avaliação de impactos para a sistema de produção de 1,0 t de SSP (18,2% P₂O₅) será apresentada tanto de maneira quantitativa, como de maneira qualitativa. Essa abordagem se deve a indisponibilidade de Fatores de Equivalência para alguns dos aspectos ambientais levantados na etapa de inventário. Entretanto, não realizar a avaliação de impactos apenas pela ausência desses valores é negligenciar os impactos causados por essas mesma substâncias sobre o meio ambiente.

VII.3.1 - Classificação

Antes da realização do processo de classificação, deve ser feita a escolha dos impactos a serem considerados pelo estudo. Assim, para o presente estudo, cujo objetivo é identificar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental da produção de SSP, optou-se por eleger o maior número de impactos aos quais os aspectos ambientais levantados pelo inventário pudessem estar relacionados.

Esses aspectos ambientais são os descritos a seguir:

- A. Aquecimento Global;
- B. Oxidação Fotoquímica;
- C. Acidificação;
- D. Toxicidade Humana;
- E. Eutrofização;
- F. Ecotoxicidade Terrestre;
- G. Exaustão de Recursos Energéticos;
- H. Redução de espaço físico; e
- I. Contaminação de lençóis freáticos.

A Tabela VII.10 apresenta a distribuição de aspectos ambientais distribuído pelos impactos a eles associados.

Tabela VII.10: Associação de aspectos ambientais a seus respectivos impactos

Impacto Ambiental	Aspecto Ambiental
Aquecimento Global	CO ₂
Oxidação Fotoquímica;	hidrocarbonetos
Acidificação	NO _x , SO ₂ , névoa de SO ₃ , HF
Toxicidade Humana	NO _x , SO ₂ , CO
Eutrofização	PO ₄ ⁻
Ecotoxicidade Terrestre	borras de S e de V ₂ O ₅
Exaustão de Recursos Energéticos	energia elétrica e combustíveis fósseis
Redução de Espaço Físico	magnetita, lama e rejeito não apatita
Contaminação de Lençóis Freáticos	efluentes líquidos da deslamagem, desmagnetização e flotação

O aspecto ambiental consumo de água no processos será comentado a parte.

VII.3.2 - Caracterização

No presente estudo, será feita uma caracterização baseada nos Fatores de Equivalência apresentados nos Anexos.

Para os casos onde não houverem Fatores de Equivalência disponíveis, será feita, como anteriormente apresentado, uma avaliação qualitativa. Em virtude disso, não serão realizados os processos de normalização ou valoração também inerentes a uma avaliação de impactos convencional.

A Tabela VII.11 apresenta o resultado da aplicação dos Fatores de Equivalência aos aspectos ambientais selecionados para cada impacto. A ordem de apresentação da tabela, foi elaborada em função das recomendações existentes no Modelo de execução de ACV em iniciar a caracterização pelos aspectos que estejam associados a um único impacto.

Tabela VII.11: Caracterização de aspectos ambientais

Indicador de Impacto Ambiental	Valor expresso na base do indicador
Potencial de Aquecimento Global	38,29 kg de CO ₂ equivalente
Potencial de Oxidação Fotoquímica	0,0231 kg de C ₂ H ₄ equivalentes
Potencial de Eutrofização	20,80 kg NO ₃ ⁻ equivalentes
Potencial de Acidificação	0,947 kg de SO ₂ equivalente

O Fator de Equivalência do Potencial de Oxidação Fotoquímica, foi composto por uma média de valores da Tabela A5 dos Anexos, dada a composição variada do óleo diesel. O valor aplicado foi de 0,377 kg C₂H₄/kg material emitido.

O Potencial de Toxicidade Humana do sistema não pode ser calculado em função da inexistência de Fatores de Equivalência para NO_x, SO₂ e CO relativos a esses impacto.

VIII - CONCLUSÕES

Dentro das limitações existentes para a realização do presente trabalho de dissertação foi desenvolvido um modelo que, se por um lado ainda necessita de ajuste, por outro mostrou-se capaz de ser aplicado na prática.

Esse fato pode ser comprovado pela avaliação conclusiva feita quanto ao ciclo de vida do superfosfato simples. A partir do modelo, foi possível perceber que:

- o perfil ambiental do SSP, revela ser esse um produto não agressivo ao meio ambiente. As maiores contribuições quantificadas referem-se respectivamente ao Aquecimento Global com 38,29 kg de CO₂ equivalente e à Eutrofização, com 20,80 kg de NO₃⁻ equivalentes. No caso do Aquecimento Global, o transporte rodoviário através de grandes distâncias entre a usina de beneficiamento e a planta de produção contribuem decisivamente para essa emissão. No caso da Eutrofização, as perdas de processo em termos de fosfatos determinam esse valor mais elevado. Já os valores para Oxidação Fotoquímica e para Acidificação são bastante aceitáveis;
- em termos de Redução do Espaço Físico, uma conclusão relevante é que para cada tonelada de SSP produzida, são geradas cerca de 4,04 t. de rejeitos, divididos em magnetita, lama e rejeito de não apatita. Esse material é estocado a céu aberto, ocupando portanto muito espaço físico no entorno da mina.
- o consumo de recursos energético do ciclo de vida do SSP, para a produção de 1,0t. desse produto corresponde a cerca de 693 MJ. Desse total, 394 MJ – ou seja, cerca de 57% - corresponde a energia elétrica, ou nesse caso, hidrelétrica, correspondendo os demais 43% a energia gerada a custo da queima de combustíveis fósseis por ocasião do transporte de materiais;

- em termos de Ecotoxicidade Terrestre, deve-se ressaltar as gerações de borra de enxofre elementar e de pentóxido de vanádio; principalmente esse último, por ser classificado como resíduo perigoso;
- por fim merece destaque a possível contaminação de lençóis freáticos pelo volume de água não recuperada no beneficiamento, cerca de 13,2 t. para cada tonelada de SSP produzido; esse efluente líquido apresenta em sua composição parte dos sólidos de magnetita, lama e rejeito na forma solubilizada.

ANEXOS

ANEXOS – Fatores de Equivalência para Indicadores impacto ambiental

No Apêndice são apresentados fatores de conversão que permitem quantificar a contribuição de cada aspecto ambiental levantado na etapa de Inventário da ACV, para cada impacto ambiental a ele associado. Para cada impacto ambiental será apresentada uma lista dos principais aspectos ambientais com seus respectivos fatores de equivalência.

ANEXO A - Depleção da Camada de Ozônio

A contribuição dos aspectos levantados no ICV para a Depleção da Camada de Ozônio, pode ser medida através do Indicador de impacto conhecido como Potencial de Depleção da Camada de Ozônio - PDCO. O cálculo do PDCO é feito através da multiplicação da quantidade total do aspecto pelo fator de equivalência dessa categoria - apresentado na Tabela A.1 - expresso em kg CFC-11 equivalentes.

Tabela A1: fatores de equivalência para Depleção da Camada de Ozônio

Composto	Fator de Equivalência
CFC-11	1,000
CFC-12	0,900
CFC-113	0,900
CFC-114	0,800
CFC-115	0,400
HCFC-22	0,060
HCFC-123	0,022
HCFC-124	0,024
HFC-125	0,000
HFC-134 ^a	0,000
HCFC-141b	0,110
HCFC-142b	0,060
HFC-143 ^a	0,000
HFC-152b	0,000
CCl ₄	1,200
CH ₃ CCl ₃	0,160

(Fonte: World Meteorological Organization, 1989)

ANEXO B - Aquecimento Global

O impacto ambiental Aquecimento Global tem como indicador o Potencial de Aquecimento Global (PAG), cuja composição é feita através da somatória dos produtos entre as quantidades de aspectos ambientais geradas pelo sistema em estudo que contribuem para o Aquecimento Global e seus respectivos fatores de equivalência, apresentados na Tabela A.2 . A base de referência para esse impacto é expressa por kg de CO₂ equivalentes.

Tabela A.2: fatores de equivalência para Efeito Estufa

Composto	Fator de Equivalência kg CO₂ equivalentes / kg gás
CO ₂	1
CH ₄	21
NO ₂	290
CFC-11	3.500
CFC-12	7.300
CFC-113	4.200
CFC-114	6.900
CFC-115	6.900
HCFC-22	1.500
HCFC-123	85
HCFC-124	430
HFC-125	2.500
HFC-134 ^a	1.200
HCFC-141b	440
HCFC-142b	1.600
HFC-143 ^a	2.900
HFC-152 ^a	140
CCl ₄	1.300
CH ₃ CCl ₃	100
CF ₃ Br	5.800

(Fonte: HOUGHTON et. al., 1990)

ANEXO C - Acidificação

O aspectos ambientais que contribuem para a Acidificação, correspondem a substâncias de caráter ácido, ou que liberem prótons durante sua degradação ambiental. Para casos como esse, o número $n(H)$, de prótons de suas molécula liberados no meio ambiente deve ser determinado.

O Indicador de impacto é o Potencial de Acidificação – PA, cuja base de referência é expressa em termos de kg de SO_2 equivalentes. O modelo para o cálculo do fator de equivalência apresentado por PETTS & EDULJEE (1994) é dado pela relação

$$FE = \frac{n(H) * 64,06}{2M_w}$$

onde: FE = fator de equivalência;

$n(H)$: número de prótons liberados durante a degradação ambiental causada pelo composto ácido;

M_w : peso molecular do composto ácido;

64,06 g/mol: peso molecular do H_2SO_4 .

A Tabela A.3, apresenta os fatores de equivalência calculados pela relação acima, para os principais composto de caráter ácido que contribuem para a Acidificação.

Tabela A.3: Fatores de equivalência para Acidificação

Composto	Fator de Equivalência kg SO_2 / kg de composto
SO_2	1,00
SO_3	0,80
NO_2	0,70
$NO_x^{(*)}$	0,70
NO	1,07
NH_3	1,88
HCl	0,88
HNO_3	0,51
H_2SO_4	0,65
H_3PO_4	0,98
HF	1,60

(*): considere-se que a valência x tenha em média um valor igual a 2 para o NO_x ;

Fonte: ANNEMA (1991)

ANEXO D - Eutrofização

Todos os aspectos ambientais identificados no ICV que apresentarem átomos de nitrogênio e de fósforo biologicamente disponíveis em suas moléculas, devem ser considerados como agentes contribuintes para o impacto ambiental Eutrofização; seu Indicador– Potencial de Eutrofização (PE) – é expresso em kg de NO_3^- equivalentes.

O cálculo dos fatores de equivalência desse indicador é dado pela expressão

$$FE = \frac{66,02 * n}{M_i}$$

onde:

FE = fator de equivalência;

M_i = massa molecular do aspecto ambiental causador de Eutrofização;

n = número de mols de nitrogênio ou fósforo no aspecto ambiental;

66,02 g/mol = peso molecular do NO_3^- .

As quantidades de N e P presentes nos aspectos, são convertidas em um fator de equivalência que represente a Eutrofização, considerando-se uma relação de 1,0:10,0 entre os átomos de P e de N nos organismos vivos, respectivamente.

A Tabela A.4, apresenta os fatores de equivalência calculados pela relação acima, para os principais composto de N e P que contribuem para a Acidificação.

Tabela A.4: fatores de equivalência para Eutrofização

Composto	Fator de Equivalência kg NO_3^- / kg de composto
NO_3^-	1,00
NO_2^-	1,35
NO_2	1,35
$\text{NO}_x^{(*)}$	1,35
N_2O	2,82
NO	2,07
NH_3	3,64
PO_4^{3-}	10,45
$\text{P}_2\text{O}_7^{2-}$	11,41

(*): considera-se que a valência x tenha em média um valor igual a 2 para o NO_x ;

Fonte: WHO (1982)

ANEXO E - Oxidação Fotoquímica

O impacto ambiental denominado de Oxidação Fotoquímica tem como Indicador o Potencial de Formação de Ozônio Fotoquímico – PFOF - cuja unidade de referência é expressa em termos de kg C₂H₄ equivalentes é denominado. O valor de PFOF é calculado pelo produto entre os aspectos ambientais classificados nessa categoria e seus respectivos fatores de equivalência, apresentados aqui pela Tabela A.5 .

Tabela A5: fatores de equivalência para Oxidação Fotoquímica

Composto	Fator de Equivalência Kg C ₂ H ₄ / kg composto	Composto	Fator de Equivalência Kg C ₂ H ₄ / kg composto
metano	0,03	n-nonano	0,10
etano	0,02	2-metiloctano	0,12
propano	0,16	n-decano	0,08
n-butano	0,15	2-metilnonano	0,08
i-butano	0,19	n-undecano	0,08
n-pentano	0,09	n-doudecano	0,07
i-pentano	0,12	etileno	1,00
n-hexano	0,10	propileno	0,75
2-metilpentano	0,19	1-buteno	0,57
3-metilpentano	0,11	2-buteno	0,82
2,2-dimetilbutano	0,12	1-penteno	0,40
2,3-dimetilbutano	0,25	2-penteno	0,65
n-heptano	0,13	2-metil,1-buteno	0,52
2-metilhexano	0,12	3-metil,1-buteno	0,60
3-metilhexano	0,11	2-metil-2-buteno	0,71
n-octano	0,12	butileno	0,62
2-metilheptano	0,11	acetileno	0,11

Tabela A5: fatores de equivalência para Oxidação Fotoquímica (continuação)

Composto	Fator de Equivalência Kg C₂H₄ / kg composto	Composto	Fator de Equivalência Kg C₂H₄ / kg composto
benzeno	0,13	butiraldeído	0,17
tolueno	0,41	i-butiraldeído	0,43
o-xileno	0,41	valeraldeído	0,00
m-xileno	0,78	acetona	0,09
p-xileno	0,63	metiletilcetona	0,17
etilbenzeno	0,35	metil i-butilcetona	0,26
n-propilbenzeno	0,25	metanol	0,09
i-propilbenzeno	0,35	etanol	0,04
1,2,3- trimetilbenzeno	0,75	metilacetato	0,02
1,2,4- trimetilbenzeno	0,86	etilacetato	0,11
1,3,5- trimetilbenzeno	0,74	i-propilacetato	0,17
o-etiltolueno	0,31	n-butilacetato	0,14
m-etiltolueno	0,41	i-butilacetato	0,21
p-etiltolueno	0,36	cloreto de metileno	0,01
formaldeído	0,49	metilclorofórmio	0,00
acetaldeído	0,33	tetracloroetileno	0,00
propionaldeído	0,28	triclouroetileno	0,06

(Fonte: DERWENT & JENKINS, 1990)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANNEMA, J.A. Methodology for evaluation of potential action to reduce the environmental impact of chemical substances. In: STATE OF THE ART, WORKSHOP REPORT, CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION, Montreal, 1991. **Anais**. Montreal, Nordic Gas technology Centre, 1991.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**. São Paulo, ANDA, 1997. 154 p.

BARBOSA, D.A. Fertilizantes fosfatados solúveis. In: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE POLÍTICA DE FERTILIZANTES, São Paulo, 1980. **Anais**. São Paulo, ANDA, 1980. 244 p.

BOILEAU, J. **Explosive production**. In: ULMANN'S ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY, Weinheim, Graphischer Betrieb Konrad Tritsch, 1987. p. 143 - 162. (volume A 10).

BOUSTEAD, Y. **Ecobalance methodology for commodity thermoplastics**. Brussels, The European Centre for Plastics in the Environment, 1992. 48 p.

BRUNO, M.A.C., ed. **Conservação de energia na indústria de fertilizantes: manual de recomendações**. São Paulo, IPT, 1985. 487 p. (Publicações IPT, n. 1632).

CEKINSKI, E. Fertilizantes fosfatados. In: Tecnologia de produção de fertilizantes. São Paulo, IPT, 1990. p.95 – 129. (Publicações IPT, n.1816).

CHEHEBE, J.R.B. **Análise de ciclo de vida de produto: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro, Qualitymark, 1998. 104p.

CHRISTIANSEN, K. Life cycle assessment in a historical perspective. In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE ANÁLISE DE CICLO DE VIDA, Rio de Janeiro, 1996. **Anais**. Rio de Janeiro, ABNT / GANA / ISO, 1996. p. 121 – 35.

CONSOLI, F., ed. **Guidelines for life cycle assessment: a code of practice**. Pensacola, Society of Environmental Toxicology and Chemistry: SETAC Foundation for Environmental Education, 1993. 73 p.

CURRAN, M.A., ed. **Environment life-cycle assessment**. New York, McGraw-Hill, 1996. 363p.

DERWENT, R.G.; JENKIN, M.E., ed. **Hydrocarbon involvement in photochemical ozone formation in Europe**. Oxfordshire, AEA Environment and Energy, Harwell Laboratory, 1990. [Report AERE R 13736].

DWECK, J. **Reciclagem de rejeitos sólidos industriais: desenvolvimento de uma rota, em escala de laboratório para a recuperação de compostos a partir de um rejeito da produção de ácido sulfúrico.** São Paulo, 1990. 187 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FAVA, J.A., ed. **A technical framework for life-cycle assessments.** Washington, D.C., Society of Environmental Toxicology and Chemistry: SETAC Foundation for Environmental Education, 1991. 134 p.

GUINÉE, J.B.; UDO DE HAES, H.A., **Life cycle analysis of product,** Leiden, Journal of Clean Production, 1991. p. 44 - 9.

GUINÉE, J.B., **Data for normalization step within life cycle assesement of products,** Leiden, CML, 1993.(CML paper n.º 14).

HIGGINS, T.E., ed. **Pollution prevention handbook.** Boca Raton, Lewis Publishers, 1995. p. 70 - 7.

HILL, W.L. Raw Materials. In: United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service / Tennessee Valley Authority. Office of Agricultural and Chemical Development. **Superphosphate: its history, chemistry, and manufacture.** Washington, D.C., 1964. p. 95 – 115.

HODGE, C.A.; POPOVICI, N.N., ed. **Pollution control in fertilizer production.** New York, M. Dekker, 1994. 502 p. (Environmental Science and Pollution Control Series, n. 10).

HOUGEN, O.A.; WATSON, K.M.; RAGATZ, R.A., **Chemical process principles. I. Material and Energy Balance.** 2. ed. London, John Wiley & Sons, Inc. 1954. p. 325.

HOUGHTON, J.T.; JENKINS, G.J. ; EPHRAUMS, J.J., ed. **Climate change.** The IPCC scientific assesement. London. Cambridge University Press. 1990.

IFDC. **Energy and fertilizer: policy implications and options for developing counties.** Alabama, 1982. 291 p. (technical bulletins: T - 20)

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. **Environmental management - life cycle assessment: principles and framework:** ISO 14040. Genève, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. **Environmental management, life cycle assessment, goal and scoping definition and inventory analysis:** ISO 14041. Genève, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. **Environmental management, life cycle assessment, life cycle impact:** ISO 14042. Genève, 1997.

JORGENSEN, M.S. ; PEDERSEN, B. **Quality concepts for processed organic food.** Lyngby, Letter attachment to Timothy Mohin, US Environmental Protection Agency from Bo Pedersen, Interdisciplinary Technical University of Denmark,, 1990.

LEAL FILHO, L.S. **Aspectos relevantes na separação apatita/minerais de ganga via processo serrana.** São Paulo, 1991. 266 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LIFE-CYCLE assessment. In: MALAYSIA. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **Selected topics in environmental management.** Jakarta, UNESCO, 1995.

cap. 4, p. 1 – 35. (UNESCO Series of Learning Materilas in Engeneering Sciences) [Apresentado ao Multimedia Postgraduate Course in Environmental Engeneering, 1995.]

LOBO, M.G.; SILVA, R.M. Produção de fertilizantes fosfatados. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, Brasília, 1984. **Anais.** Brasília, EMBRAPA – DEP, 1984. p. 73-102.

LUNDHOLM, M. P.; SUNDSTRÖM, G. **Resource and environmental impact of Tetra Brick and refillable and non-refillable glass bottles.** Malmö, Tetra Brik Aseptic environmental profile, 1985. 174 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação.** 2. ed. São Paulo, Biblioteca Agrônômica CERES, 1967. p. 73 – 9.

MELLANBY, K., ed. **Air pollution, acid rain, and the environment.** London; New York, Watt Committee on Energy / Elseviwer Applied Science, 1988. 129 p. (Watt Committee report; n. 8).

RÜGER, K.F. **Alternativas para a destinação final do fosfogenso.** São Paulo, 1996. 262 pp. Dissertação (Mestrado) – Universidade Mackenzie.

SANDER, U.H.F., ROTHE, U., KOLA, R. Sulphuric acid. In: SANDER, U.H.F. et. al. **Sulphur, Sulphur Dioxide and Sulphuric Acid: an introduction to their industrial chemistry and technology.** London, The British Sulfur / Deerfield Beach, Verlag Chemie International, c1984. p. 257 - 392.

SENDLEIN, L.V.A, ed. **Surfaco minig environmental monitoring and reclamation handbook.** New York, Elsevier, 1983.

SILVA, G.A. Tecnologia de fertilizantes. São Paulo, 1982. [Apresentado à Disciplina Tecnologia de Fertilizantes, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Apostila datilografada].

SILVA, G.A. Indústria de fertilizantes e a qualidade do ar. In: SCIENTIFIC AND LEGISLATIVE ASPECTS OF AIR QUALITY MANAGEMENT, São Paulo, 1995. **Proceedings.** São Paulo, 1995. p.60 - 7.

SILVA, G. A. Aspectos técnicos da geração e disposição, e alternativas de usos do fosfógeno. [Apresentado à Palestra - Resíduos: uma oportunidade de negócio ?, 1997].

SILVA, G.A. **Propriedades físicas de fertilizantes**. [Apresentado à Disciplina de Propriedades Físicas de Fertilizantes, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1998 - Notas de aula].

SILVA, R.M. **Minerais associados às apatitas: análise de sua influência na produção de ácido fosfórico e fertilizantes fosfatados**. São Paulo, 1994. 136 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION (UNIDO). **Fertilizer manual**. 2. ed. New York, United Nations, 1980. (Development and Transfer of Technology, v. 13).

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - Industry and Environment. **Life cycle assessment: what it is and how to do it**. Paris, UNEP, 1996. 92 p.

VIGON, B.W.; et. al., coord. **Life-cycle assessment: inventory guidelines and principles**. Cincinnati, RREL / USEPA, 1993. 108 p. (EPA 1600 / R-92 / 245).

WORLD HEALTH ORGANIZATION, **Rapid assessment of air, water and land pollution**. Geneva, WMO, 1982. [Offset Publication n.º 62].

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, **Scientific assessment of stratospheric ozone: global ozone research and monitoring project**. Geneva, WMO, 1989. [Appendix: AFEAS Report no. 20].