

**LUIZ ALEXANDRE KULAY**

**USO DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA PARA A  
COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DAS  
ROTAS ÚMIDA E TÉRMICA DE PRODUÇÃO DE  
FERTILIZANTES FOSFATADOS**

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

São Paulo  
2004

**LUIZ ALEXANDRE KULAY**

**USO DA ANÁLISE DE CICLO DE VIDA PARA A  
COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DAS  
ROTAS ÚMIDA E TÉRMICA DE PRODUÇÃO DE  
FERTILIZANTES FOSFATADOS**

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

Área de Concentração:  
Engenharia Química

Orientador:  
Prof. Dr. Gil Anderi da Silva

São Paulo  
2004

Kulay, Luiz Alexandre

Uso da análise de ciclo de vida para a  
comparação do desempenho ambiental das rotas  
úmida e térmica de produção de fertilizantes  
fosfatados. São Paulo, 2004  
314p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo. Departamento de  
Engenharia Química.

1. Fertilizantes fosfatados I. Universidade  
de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento  
de Engenharia Química II.t.

## **DEDICATÓRIA**

**Ao Dr. Luiz Kulay**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Gil Anderi da Silva, não apenas pelo esforço e pela dedicação sem os quais esse trabalho de pesquisa não teria sido realizado, mas também, por ter sido o responsável maior pela formação de meu perfil acadêmico.

Aos colegas Fúlvia, Alexandre, Flávio, Guilherme, Paulo e Wady, todos membros do Grupo de Prevenção da Poluição – GP2 do Departamento de Engenharia Química da EPUSP pelas contribuições e pelo incentivo, manifestados ao longo da realização do presente estudo.

Ao amigo Yuki pelo companheirismo e dedicação inestimáveis, tanto no que se refere à discussão de temas técnicos, quanto na elaboração deste documento.

Aos professores Francesc Castells e Marta Shuhmacher, bem como aos colegas Israel Herrera, Haydeé Yrigoyen, Antonio Martinez e Amgad Mousa, todos pesquisadores do Grupo de Análisis y Gestión Ambiental da Universitat Rovira i Virgili (URV) de Tarragona – Espanha, pela receptividade e pela contribuição ao longo da execução do estudo.

Ao Prof. Dr. Wilson Miguel Salvagnini, pelo suporte logístico e constante incentivo durante a realização do trabalho.

Ao Engenheiro Moacir F. da Silva da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, Regional de Cubatão (SP), pela valiosa contribuição na coleta de dados e no levantamento de informações.

À Maria Elisete Alves Monteiro, Graça e Alexandre pelo carinho e pela atenção incondicionais, dispensados em quaisquer circunstâncias.

À Maria Lúcia Adamo, Maria e Fátima pela gentileza, prestatividade e incentivo permanentes.

À Sueli A. Romaniw pelo auxilio com a elaboração da versão em idioma espanhol desse documento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela disponibilização dos recursos que propiciaram o estágio de treinamento no exterior.

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

A DEUS por ter estado sempre junto a mim, amparando-me nos momentos de maior angústia e desolação.

# **SUMÁRIO**

## **LISTA DE TABELAS**

## **LISTA DE FIGURAS**

I. Introdução	01
II. Objetivos	10
III. Estruturação das atividades de pesquisa	11
III.1 Revisão da Literatura	11
III.2 Realização dos estudos de Análise de Ciclo de Vida do TSP e do FMP	12
III.3 Avaliação de desempenho ambiental	13
IV. Revisão da Literatura	15
IV.1 Análise de Ciclo de Vida	15
IV.1.1 Introdução ao tema	15
IV.1.2 Breve histórico	18
IV.1.3 Usos e aplicações	21
IV.1.4 Metodologia de ACV	23
IV.1.4.1 Definição de objetivos e de escopo	25
IV.1.4.2 Inventário de Ciclo de Vida	32
IV.1.4.3 Avaliação de Impactos Ambientais	41
IV.1.4.4 Interpretação	45
IV.2 Fertilizantes Fosfatados	48
IV.2.1 Superfosfato Triplo (TSP)	55
IV.2.1.1 Características do TSP	55
IV.2.1.2 Produção de TSP no Brasil	57

IV.2.2 Cadeia produtiva do TSP	63
IV.2.2.1 Mineração da rocha fosfática	63
IV.2.2.2 Beneficiamento da rocha fosfática	64
IV.2.2.3 Produção de ácido sulfúrico	67
IV.2.2.4 Produção de ácido fosfórico grau fertilizante	76
IV.2.2.5 Manufatura de superfosfato triplo (TSP)	92
IV.2.3 Termofosfatos	98
IV.2.3.1 Características dos Termofosfatos	98
IV.2.3.2 Termofosfatos Calcinados	99
IV.2.3.2.1 Termofosfato desfluorizado	100
IV.2.3.2.2 Termofosfato Rhenânia	101
IV.2.3.2.3 Termofosfato calcinado japonês	103
IV.2.3.3 Termofosfatos Fundidos	103
IV.2.3.3.1 Aspectos estruturais dos termofosfatos magnesianos fundidos	105
IV.2.3.4 Produção de termofosfatos no Brasil	107
IV.2.4 Cadeia produtiva do FMP	110
IV.2.4.1 Mineração e tratamento preliminar da rocha Fosfática	112
IV.2.4.2 Obtenção e tratamento das fontes de sílica e de magnésio	112
IV.2.4.3 Manufatura do termofosfato magnesiano fundido (FMP)	113
V. Método de análise e desenho ambiental de processos	116
V.1 Introdução	116
V.2 Aplicação do método de Eco-Vetores para a elaboração do ICV	117
V.3 Metodologia MADAP	122
V.3.1 Modelagem do sistema de produto	122

V.3.2 Preparação da planilha de dados	123
V.3.3 Construção da interface de transferência	125
V.3.4 Elaboração do Eco-vetor de processo	126
<b>VI. Realização dos estudos de ACV para o TSP e para o FMP</b>	<b>127</b>
<b>VI.1 Definição de objetivos e escopo</b>	<b>127</b>
<b>VI.1.1 Definição dos objetivos do estudo</b>	<b>127</b>
<b>VI.1.2 Definição de escopo</b>	<b>127</b>
<b>VI.1.2.1 Função dos produtos</b>	<b>128</b>
<b>VI.1.2.2 Unidade funcional e fluxo de referência</b>	<b>128</b>
<b>VI.1.2.3 Sistemas de produto</b>	<b>129</b>
<b>VI.1.2.3.1 Sistema de produto do TSP</b>	<b>129</b>
<b>VI.1.2.3.2 Sistema de produto para o FMP</b>	<b>132</b>
<b>VI.1.2.4 Fronteiras</b>	<b>134</b>
<b>VI.1.2.4.1. Fronteiras do sistema de produto do TSP</b>	<b>134</b>
<b>VI.1.2.4.2. Fronteiras do sistema de produto do FMP</b>	<b>134</b>
<b>VI.1.2.5. Critérios de qualidade dos dados</b>	<b>135</b>
<b>VI.1.2.6 Procedimentos para a alocação de cargas ambientais</b>	<b>136</b>
<b>VI.1.2.7 Categorias de impacto e sua metodologia de avaliação</b>	<b>137</b>
<b>VI.1.2.8 Análise crítica dos resultados obtidos</b>	<b>138</b>
<b>VI.1.2.9. Tipo e formato do relatório final dos estudos</b>	<b>139</b>
<b>VI.2. Elaboração dos Inventários de Ciclo de Vida do TSP e do FMP</b>	<b>139</b>
<b>VI.2.1 Modelos simuladores</b>	<b>139</b>
<b>VI.2.2 Coleta de dados</b>	<b>141</b>
<b>VI.2.2.1 Subsistema – lavra da rocha fosfatada</b>	<b>141</b>
<b>VI.2.2.2 Subsistema – beneficiamento da rocha fosfatada</b>	<b>143</b>
<b>VI.2.2.3 Subsistema – produção de ácido sulfúrico</b>	<b>145</b>
<b>VI.2.2.4 Subsistema – produção de ácido fosfórico</b>	<b>147</b>
<b>VI.2.2.5 Subsistema – manufatura do TSP</b>	<b>152</b>

VI.2.3 Sistema de produto do FMP	154
VI.2.3.1 Subsistema – lavra e britagem da rocha fosfatada	154
VI.2.3.2 Subsistema – produção do FMP	156
VI.2.4 Subsistema – geração de gás natural	158
VI.2.5 Subsistema – geração de energia elétrica	160
VI.2.5.1 Geração de energia de origem hidrelétrica	162
VI.2.5.2 Produção de eletricidade pela queima de óleo combustível	163
VI.2.6 Subsistema – transporte	166
VI.2.6.1 Transporte da rocha fosfática - mina ao britador	168
VI.2.6.2 Transporte do concentrado fosfático – usina à fábrica de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> /TSP	168
VI.2.6.3 Transporte de rocha fosfática – mina à fábrica de FMP	169
VI.2.6.4 Transporte de serpentinito – mina à fábrica de FMP	169
VI.3 Avaliação de Impactos Ambientais	170
VII. Avaliação de desempenho ambiental	175
VII.1 Avaliação de desempenho ambiental do sistema de TSP	175
VII.1.1. Potencial de Aquecimento Global (PAG)	178
VII.1.2. Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO)	181
VII.1.3. Potencial de Toxicidade Humana (PTH)	184
VII.1.4. Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa)	187
VII.1.5. Potencial de Acidificação (PAc)	190
VII.1.6. Potencial de Eutrofização (PEu)	193
VII.2. Avaliação de desempenho ambiental do sistema de FMP	196
VII.2.1. Potencial de Aquecimento Global (PAG)	198
VII.2.2. Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO)	200
VII.2.3. Potencial de Toxicidade Humana (PTH)	203
VII.2.4. Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa)	206
VII.2.5. Potencial de Acidificação (PAc)	209

VII.2.6. Potencial de Eutrofização (PEu)	211
VIII. Conclusões	214
IX. Anexos	217
X. Referências Bibliográficas	304

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura IV.1. Estrutura metodológica da Análise de Ciclo de Vida	25
Figura IV.2. Elementos obrigatórios e facultativos da Avaliação de Impactos	42
Figura IV.3. Processos utilizados no Brasil para a produção industrial de fertilizantes fosfatados	52
Figura IV.4. Diagrama do processo de produção de concentrado fosfático	65
Figura IV.5. Diagrama esquemático do processo de Dupla Absorção (DA) para a produção de ácido sulfúrico	69
Figura IV.6. Dependência do grau de cristalização do sulfato de cálcio com a temperatura e o teor de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> presentes no reator	78
Figura IV.7. Diagrama esquemático do processo Dihidrato (DH) usado para a produção de ácido fosfórico	80
Figura IV.8. Representação esquemática do estágio de evaporação para a produção de ácido fosfórico	89
Figura IV.9. Tecnologia Broadfield de produção contínua de TSP em pó	94
Figura IV.10. Estrutura da fase vítreia assumida pelo termofosfato magnesiano fundido pós-resfriamento	106
Figura IV.11. Representação esquemática do processo de produção de FMP praticado pela MITSUI FERTILIZANTES S.A.	111
Figura V.1. Exemplo de representação de um Eco-vetor mássico ( $V_M$ )	116

Figura V.2. Representação de um Eco-vetor energético ( $V_E$ )	119
Figura V.3. Unidade de processo de um sistema de produto	120
Figura V.4. Simulação do módulo de processo de geração de energia da Central Termelétrica de Tula - México	123
Figura V.5. Exemplo de planilha de dados para controle de informações	124
Figura VI.1. Diagrama do sistema de produto de TSP	130
Figura VI.2. Diagrama do sistema de produto de FMP	133
Figura VII.1. Distribuição de consumos materiais e energéticos para o sistema de produto de TSP	177
Figura VII.2. Perfil de distribuição de Potencial de Aquecimento Global (PAG) para o sistema de produto de TSP	180
Figura VII.3. Perfil de distribuição de Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO) para o sistema de produto de TSP	183
Figura VII.4. Perfil de distribuição de Potencial de Toxicidade Humana (PTH) para o sistema de produto de TSP	186
Figura VII.5. Perfil de distribuição de Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa) para o sistema de produto de TSP	189
Figura VII.6. Perfil de distribuição de Potencial de Acidificação (PAc) para o sistema de produto de TSP	192
Figura VII.7. Perfil de distribuição de Potencial de Eutrofização (PEu) para o sistema de produto de TSP	195
Figura VII.8. Distribuição de consumos materiais e energéticos para o sistema de produto de FMP	197
Figura VII.9. Perfil de distribuição de Potencial de Aquecimento Global (PAG) para o sistema de produto de FMP	199
Figura VII.10. Perfil de distribuição de Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO) para o sistema de produto de FMP	202
Figura VII.11. Perfil de distribuição de Potencial de Toxicidade Humana (PTH) para o sistema de produto de FMP	205

Figura VII.12. Perfil de distribuição de Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa) para o sistema de produto de FMP	208
Figura VII.13. Perfil de distribuição de Potencial de Acidificação (PAc) para o sistema de produto de FMP	210
Figura VII.14. Perfil de distribuição de Potencial de Eutrofização (PEu) para o sistema de produto de FMP	213

## LISTA DE TABELAS

Tabela IV.1. Dados anuais de produção de fertilizantes fosfatados e de superfosfato triplo (TSP) entre 1992 e 2002	57
Tabela IV.2. Principais produtores nacionais de superfosfato simples (SSP) e superfosfato triplo (TSP)	60
Tabela IV.3. Valor médio de preços de rocha fosfática, ácido fosfórico, superfosfato triplo produzidos no Brasil e nos EUA em 2001	62
Tabela IV.4. Perfis de temperatura e eficiência dentro do conversor	72
Tabela IV.5. Balanço Energético para a produção industrial de $\text{H}_2\text{SO}_4$ (98%)	75
Tabela IV.6. Vantagens e desvantagens do uso da tecnologia Dihidrato (DH) na fabricação de ácido fosfórico	79
Tabela IV.7. Efeito da presença de impurezas provenientes do concentrado fosfático na produção de $\text{H}_3\text{PO}_4$	85
Tabela IV.8. Perdas de $\text{P}_2\text{O}_5$ ocorridas durante o estágio de reação do processo de manufatura de ácido fosfórico	87
Tabela IV.9. Análises típicas de fosfogessos gerados respectivamente pelas tecnologias DH, HH e HH-DH de produção de $\text{H}_3\text{PO}_4$	91
Tabela IV.10. Efeito do teor de $\text{P}_2\text{O}_5$ e da relação $\text{CaO}:\text{P}_2\text{O}_5$ sobre as proporções de concentrado fosfático e $\text{H}_3\text{PO}_4$ e sobre o teor de $\text{P}_2\text{O}_5$ do TSP	96
Tabela IV.11. Dados anuais de produção de fertilizantes fosfatados e de termofosfato magnesiano fundido (FMP) entre 1992 e 2002	107
Tabela IV.12. Consumos energéticos específicos despendidos respectivamente pelos processos de produção de SSP, TSP e FMP	109

Tabela VI.1. Composição da Matriz energética brasileira em 1996	162
Tabela VI.2. Composição dos óleos combustíveis leve e pesado, empregados na geração de energia elétrica	166
Tabela VI.3. Avaliação dos Impactos Ambientais provocados pelos sistemas de produto de TSP e FMP	175
Tabela VII.1. Correlação entre as unidades do sistema de produto de TSP e o diagrama gerado por SimaPro 5	177
Tabela VII.2. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de TSP para o PAG	179
Tabela VII.3. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de TSP para o PDCO	182
Tabela VII.4. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de TSP para o PTH	186
Tabela VII.5. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de TSP para o PEa	189
Tabela VII.6. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de TSP para o PAc	192
Tabela VII.7. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de TSP para o PEu	195
Tabela VII.8. Correlação entre as unidades do sistema de produto de FMP e o diagrama gerado por SimaPro 5	197
Tabela VII.9. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de FMP para o PAG	199
Tabela VII.10. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de FMP para o PDCO	202
Tabela VII.11. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de FMP para o PTH	205
Tabela VII.12. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de FMP para o PEa	208

Tabela VII.13. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de FMP para o PAc	210
Tabela VII.14. Contribuições individuais por subsistema do sistema de produto de FMP para o PEu	213

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

- ABCV – Associação Brasileiro de Ciclo de Vida  
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACV – Análise de Ciclo de Vida  
AGA – *Analisis y Gestión Ambiental*  
ANDA – Associação Nacional para a Difusão de Adubos  
CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental  
CML – *Centre of Environmental Science*  
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento  
DA/DC – Processo de Dupla Absorção e Duplo Contato  
DAP – Fosfato de diamônio  
DH – Processo Dihidrato  
FAO – Food Agriculture Organization  
FMP – Termofosfato Magnesiano Fundido  
FR – Fluxo de Referência  
GP2 – Grupo de Prevenção da Poluição  
HH – Processo Hemihidrato  
HH-DH – Processo Hemi-Dihidrato  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
INDI – Instituto de Desenvolvimento Industrial de Minas Gerais  
ISO – International Organization of Standardization  
MADAP – *Metodología de Análisis y Diseño Ambiental de Procesos*  
MAP – Fosfato de monoamônio  
MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento  
ONU – Organização das Nações Unidas

PIB – Porduto Interno Bruto  
REPA – Resource Environmental Profile Analysis  
SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry  
SI – Sistema Internacional de Unidades  
SSP – Superfosfato Simples  
TEAM – Tool for Environmental Analysis and Management  
TSP – Superfosfato Triplo  
TVA – Tennessee Valley Authority  
UF – Unidade Funcional

## **LISTA DE SÍMBOLOS**

- M – Fluxo mássico  
 $V_M$  – Eco-vetor mássicos associado a uma corrente  
P – Fluxo de Poluentes  
E – Fluxo energético  
 $V_E$  – Eco-vetor energético associado a uma corrente  
 $EM_i$  – Corrente mássica “i” de entrada  
 $IE_i$  – Corrente energética “i” de entrada  
 $P_i$  – Corrente de produtos (ou subprodutos) “i” de saída  
 $R_i$  – Corrente de rejeitos “i” de saída  
 $\Phi_a$  – Diâmetro aparente  
 $\Theta_e$  – Temperatura de entrada  
 $\Theta_s$  – Temperatura de saída  
 $\Delta\Theta$  – Variação de temperatura  
 $H_a$  – Rendimento acumulado  
 $K_c$  – Constante de co-cristalização  
 $\delta$  – Desvio padrão de uma amostra  
 $(\sigma/m)$  – Desvio padrão da média de uma amostra

## RESUMO

Dada sua importância para o crescimento de diversas culturas, o fósforo encontra uso regular na produção de fertilizantes. Entretanto, o fato desse elemento apresentar-se na natureza em uma forma não assimilável pelos vegetais, fez com que a indústria de fertilizantes fosse forçada a desenvolver processos para sua dissolução. Esses processos costumam, em geral, ser agrupados segundo duas grandes rotas: a rota úmida e a rota térmica.

Os processos que constituem a rota úmida caracterizam-se por promover a digestão do mineral de fósforo por meio de ácidos minerais tais como o sulfúrico e o fosfórico. Por conta desse tratamento são obtidos os superfosfatos simples e triplo. Já os processos compreendidos pela rota térmica valem-se, por sua parte, de energia térmica para modificar a estrutura da rocha fosfatada, a partir do que serão gerados os chamados termofosfatos.

As rotas úmida e térmica já foram comparadas em diversas ocasiões, em geral segundo critérios de cunho técnico e econômico. O presente trabalho realiza também a referida comparação, agora porém sob o ponto de vista de desempenho ambiental, empregando, para tanto, a técnica de Análise de Ciclo de Vida (ACV).

Selecionou-se como representante da rota úmida o superfosfato triplo (TSP), enquanto que o termofosfato magnesiano fundido (FMP) foi usado para retratar a rota térmica. Para efeito da execução de ambos os estudos de ACV, tomou-se por função para o TSP e para o FMP, a capacidade desses produtos em fornecer fósforo às plantas.

No que se refere à definição dos sistemas de produto, decidiu-se adotar uma abordagem do tipo “*cradle to gate*” para a aplicação da ACV. Em razão desse fato, o sistema de produto de TSP passou a contemplar as etapas de lavra e concentração da rocha fosfática, as produções de ácido sulfúrico e ácido fosfórico e a manufatura em si desse fertilizante fosfatado. Os subsistemas auxiliares de transporte, e das gerações de energia elétrica e de gás natural foram também considerados no estabelecimento do referido sistema de produto.

O sistema de produto do FMP foi estruturado segundo a mesma abordagem, passando por conta disso a ser composto pelos subsistemas de lavra e de britagem da rocha fosfática, pelo transporte de serpentinito, pelas gerações de energia elétrica e de gás natural, e pela produção em si do fertilizante.

Por fim, para que fosse possível fornecer um quadro preciso do desempenho ambiental dos sistemas sob avaliação, houve-se por bem selecionar as categorias de impacto de Aquecimento Global (PAG), Depleção de Camada de Ozônio (PDCO), Toxicidade Humana (PTH), Ecotoxicidade Aquática (PEa), Acidificação (PAc) e Eutrofização (PEu).

A realização de estudos de ACV segundo essas e outras premissas mostrou que o desempenho do sistema de produto de TSP foi superior ao do FMP para todas as categorias de impacto selecionadas, excetuando-se os potenciais de Acidificação e de Eutrofização.

Em termos do Potencial de Aquecimento Global, o FMP mostrou-se quatro vezes mais agressivo ao meio ambiente que seu homólogo fosfatado. Esse quadro se repete também para a Ecotoxicidade Aquática; desde o ponto de vista dessa categoria de impactos, a produção de TSP traz efeitos lesivos sobre o meio ambiente com uma magnitude 3,3 vezes menor que se o mesmo elemento fosse disponibilizado como FMP.

Por outro lado, no que se refere à Eutrofização, por meio da qual são de fato medidos os impactos ambientais gerados pelas perdas de fósforo ao longo de ambos os processamentos, o FMP apresentou melhor desempenho ambiental que o TSP.

## ABSTRACT

Given its importance to the growth of several crops, the element phosphorous is regularly used for the production of fertilizers. Nevertheless, the fact that this element is found in Nature in a non-assimilable form has forced the fertilizer industry to develop processes for its dissolution. These processes are usually divided in two major groups: the wet route and the thermal route.

The processes that constitute the wet route characteristically digest the phosphate rock using mineral acids such as the sulfuric acid and the phosphoric acid. In this treatment are produced, respectively, the single superphosphate and the triple superphosphate. On the other hand, the processes belonging to the thermal route use thermal energy to modify the structure of the phosphate rock generating the so-called thermophosphates.

The wet and thermal routes have been compared in several occasions, usually according to technical and economic criteria. This study also performs such a comparison, but now on an environmental performance approach, using for this the Life Cycle Assessment methodology (LCA).

The triple superphosphate (TSP) was chosen to represent the wet route whereas the fused magnesium thermophosphate (FMP) was chosen to reflex the thermal route. In both LCA studies the function of the products was deemed to be to supply phosphorous to crops.

The product systems were defined using a “cradle-to-gate” approach. Therefore the TSP product system contemplates: the mining and concentration of the phosphate rock, the production of sulfuric and phosphoric acids and the TSP manufacture itself. The auxiliary subsystems of transportation and the electricity and natural gas generation subsystems were also considered in the above-mentioned system.

The FMP product system was structured in a similar way and contemplates: the mining and crushing of the phosphate rock, the serpentinite transportation, the electricity and natural gas generation and the FMP manufacture itself.

Finally, in order to give a picture as accurate as possible of the environmental performance of the systems under evaluation, the following impact categories were chosen: Global Warming (GWP), Ozone Layer Depletion (OLDP), Human Toxicity (HTP), Aquatic Ecotoxicity (AETP), Acidification (AP) and Eutrophication (EP).

The LCA studies have shown that the TSP product system performed better than the FMP product system in all the selected impact categories but Acidification and Eutrophication.

In terms of Global Warming Potential, the FMP was shown to be four times more aggressive to the environment than TSP. This scenario repeats itself also for Aquatic Ecotoxicity. In this category, the TSP has an effect 3.3 times lower than the effect of the FMP.

On the other hand, regarding Eutrophication, through which are in fact measured the environmental impacts generated by phosphorous losses during both product systems, FMP has presented a better performance.

## I. INTRODUÇÃO

Muito embora o Brasil tenha, há muito, deixado de ser visto apenas como um país predominantemente rural, os produtos de origem agropecuária permanecem exercendo papel de vital importância para a economia nacional. Tanto isso é verdade, que os registros do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) apontam um desempenho para o setor primário em 2002, correspondente a cerca de R\$ 80,5 bilhões, ou seja, pouco mais de 7% do Produto Interno Bruto (PIB) do país (MAPA, 2003).

Ainda que esse percentual seja bastante inferior àqueles alcançados por seus homólogos secundário e terciário – cujas participações para o mesmo período foram, respectivamente de 35,4% e 57,2% de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – as expectativas futuras para a agropecuária nacional podem ser consideradas bastante favoráveis (IBGE, 2003).

Segundo os estudos realizados pela Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, a safra de grãos referente ao período 2002/2003 atingiu a expressiva marca de 126 milhões de toneladas, o maior volume de produção visto nos últimos dez anos (CONAB, 2003). Esse resultado, permitiu que o país mantivesse, também em 2002, seu desempenho junto ao cenário internacional, sustentando uma taxa de exportações superior a 12,8US\$ milhões, segundo relato de *Food and Agriculture Organization* (FAO) (FAO, 2003). Deve-se destacar que esse percentual – que monta perto de 3% do total comercializado no período – coloca o Brasil entre os dez do planeta de maior potencial de exportação de produtos agrícolas.

A trajetória do setor agrícola brasileiro foi balizada em quase todos seus momentos, pelas oscilações do mercado internacional. Segundo KAGEYAMA & SILVA (1987), no período compreendido entre 1850 e 1945, um vínculo econômico quase formal unia a agricultura e a manufatura. Para que certo produto pudesse ser gerado, as “fazendas” existentes à época eram forçadas a produzir todos os bens intermediários e meios necessários à sua manufatura, além de assegurar a renovação da força de trabalho envolvida nessa atividade.

No período de pós-guerra, ocorrem as primeiras iniciativas no sentido de aumentar a produtividade do setor agrícola, manifestadas por meio da importação de tratores e fertilizantes. Muito embora esse fato marque o início de um novo ciclo, o

vínculo de dependência, inevitavelmente criado entre a agricultura brasileira e o mercado internacional, fez com que o desenvolvimento da mesma ficasse atrelado à capacidade de endividamento externo e às políticas comerciais e cambiais vigentes à época.

Em meados da década de 60 o ciclo de modernização mencionado antes atinge seu ápice, fazendo com que um novo padrão agrícola constituído a partir da consolidação de um complexo industrial brasileiro fosse estabelecido (MUELER, 1987). Nesse contexto, a produção agrícola passa a ser apenas um dos estágios de uma cadeia de produção bastante mais ampla que inclui em sua estrutura entre outros elementos, a geração interna de insumos e a fabricação de máquinas agrícolas.

Se ao longo dos anos 40 o grau da modernização era medido pela capacidade de importar, coube ao setor agrícola, mais de vinte anos depois, o estabelecimento de um novo paradigma, regido principalmente pelo binômio agricultura-agroindústria, o qual remete ao domínio do capital industrial e financeiro e ao sistema global de acumulação (KAGEYAMA & SILVA, 1987). Como decorrência disso, a manufatura de adubos minerais foi forçada a acompanhar o ciclo desenvolvimentista vigente. Entre 1950 e 1974, a produção interna de compostos do tipo N-P-K sofreu um aumento superior a oitenta vezes e seu consumo aparente cresceu cerca de vinte vezes. Esses resultados se deveram essencialmente a dois aspectos: a ampliação das capacidades de mistura, de armazenamento e de distribuição de fertilizantes e ao início da produção de fertilizantes simples no Brasil, mesmo que ainda com matérias-primas importadas (ANDA, 1987).

O período compreendido entre 1974 e 1980 caracterizou-se por sua vez, pelo aumento acentuado da oferta interna de fertilizantes. Uma vez mais, imputa-se a duas causas principais tal desempenho: o aumento de preços dos produtos importados, em virtude da primeira crise do petróleo, e a descoberta de reservas de rocha fosfatada no Brasil-Central, fato que fez crescer o suprimento nacional de alguns insumos.

Nos quatro anos seguintes, o setor de fertilizantes passou provavelmente por seu momento mais difícil. Entre 1980 e 1983, as empresas estatais ocupavam uma parcela considerável desse segmento produtivo, chegando a suprir a totalidade dos fertilizantes nitrogenados, bem como grande porcentagem dos fertilizantes fosfatados consumidos no país (cabe dizer nesse momento, que os chamados fertilizantes

potássicos passaram a ser produzidos internamente apenas a partir de 1986). Um quadro internacional desfavorável, criado graças ao segundo choque de preços do petróleo, aliado à crise econômico-financeira vivida então pelo Brasil, trouxe como consequências diretas tanto a limitação do crédito rural quanto a deterioração da relação de preços de fertilizantes e produtos agrícolas. Em decorrência desse fato, o setor de fertilizantes assistiu, no mesmo período, uma queda da ordem de 18% ao ano no consumo aparente de seus produtos. Essa tendência negativa pôde apenas ser revertida em 1984 após a queda dos preços dos derivados de petróleo e das taxas de juros, as quais resultaram na recuperação da economia internacional. Assim, o período entre 1985 e 1989 é marcado por uma reversão da taxa de crescimento de demanda, que passa a ser novamente positiva, a uma razão média de crescimento de cerca de 13% ao ano.

Cumprindo as previsões dos especialistas em economia, o início da década de 90 caracteriza-se por um desaquecimento quase natural da demanda de fertilizantes. A ausência de investimentos para a ampliação do parque industrial, em virtude da crise vivida por quase uma década, não deixou ao setor outra alternativa além da importação, para suprir as necessidades do setor agrícola.

Ainda que várias plantas tenham aumentado suas capacidades produtivas, a importação de adubos minerais segue ainda hoje, sendo uma prática regular do setor. O discreto, porém constante, crescimento do consumo aparente de fertilizantes observado nos últimos anos, contrariado apenas nos anos de 1995 e 1998, fez com que em 2000, fosse atingida uma demanda da ordem de 17,5 milhões de toneladas, correspondente ao dobro daquela medida em 1991 (MAPA, 2002).

Muito embora a cronologia antes apresentada faça um diagnóstico puramente econômico-mercadológico, não foi apenas esse o único agente contribuidor para o desenvolvimento do setor brasileiro de fertilizantes. No campo técnico, determinados avanços bastante significativos foram também realizados, particularmente no que se refere à fertilização de solos e à carência de nutrientes essenciais nas áreas de cultivo. Esse tema aliás, constitui-se, até hoje, em um dos objetos de maior interesse por parte do meio acadêmico especializado.

Os elementos químicos considerados essenciais para o desenvolvimento das plantas podem ser classificados genericamente em dois grandes grupos: não-minerais e minerais (MALAVOLTA, 1980).

Dá-se o nome de não-minerais aos nutrientes cujas fontes de provimento são a água e a atmosfera. Fazem parte desse grupo o Carbono (C), o Hidrogênio (H) e o Oxigênio (O), os quais têm por função principal participar diretamente do processo de fotossíntese vegetal.

Os nutrientes minerais são fornecidos pelo solo e podem ser classificados, de acordo com as quantidades com que deles se servem os vegetais, em macronutrientes primários, macronutrientes secundários e micronutrientes. Segundo MALAVOLTA (1980), são chamados de macronutrientes primários o Nitrogênio (N), o Fósforo (P) e o Potássio (K), os quais, ao serem extraídos em grandes quantidades pela maioria das culturas, tornam-se deficitários no solo antes de quaisquer outros.

Sob o mesmo enfoque, são denominados de macronutrientes secundários os elementos que, muito embora do ponto de vista de fertilização sejam tão importantes quanto seus homólogos primários, apresentam taxas de consumo consideradas como discretas ao serem comparadas às desses últimos. O subgrupo dos macronutrientes secundários é constituído por Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S).

Finalmente, são conhecidos como micronutrientes, os elementos essenciais que apresentam as menores taxas de consumo dentre os três subgrupos dos nutrientes minerais. Nessa categoria podem ser enquadrados o Boro (B), o Cloro (Cl), o Cobre (Cu), o Ferro (Fe), o Manganês (Mn), o Molibdênio (Mo) e o Zinco (Zn).

Segundo LOPES (1998), alguns autores vêm por bem incluir na categoria de nutrientes minerais elementos como Sódio (Na), Cobalto (Co), Vanádio (V), Níquel (Ni) e Silício (Si) que, muito embora apresentem taxas de consumo inferiores às dos micronutrientes, são igualmente decisivos para o crescimento de diversas espécies.

Dentro do universo dos nutrientes, o fósforo (P) faz por merecer papel de especial destaque em virtude de sua participação direta em um grande número de funções orgânicas realizadas pelas mesmas.

De maneira geral, o fósforo atua nos processos de fotossíntese, respiração, armazenamento e transferência de energia, bem como, no crescimento e na divisão celular de muitas espécies, desempenhando funções para as quais inclusive, este não encontra substituto.

O fósforo contribui para que o desenvolvimento das raízes e das plântulas ocorra mais rapidamente, aumenta a resistência de diversas espécies aos rigores do inverno e mesmo a algumas doenças. Além disso, tem papel decisivo na formação de sementes e auxilia na transferência do código genético de uma geração para outra.

Por fim, esse macronutriente primário tem papel importante na melhoria da eficiência do uso da água e na absorção de nitrogênio pelo vegetal, bem como no ganho de qualidade de frutas, verduras e culturas graníferas (RAIJ, 1981).

O fósforo elementar não se encontra disponível na natureza em estado puro, apresentando-se sempre combinado com outros elementos em virtude de seu elevado grau de reatividade. Suas maiores reservas são provenientes da intemperização da apatita, um mineral que além do fósforo, é também constituído por cálcio, flúor e cloro. À medida que a apatita se desintegra, o fósforo presente em sua estrutura passa a ser liberado, permanecendo no solo tanto na forma solúvel quanto insolúvel. A fração solúvel tende a combinar-se com certos metais presentes no meio, tais como cálcio, ferro, alumínio e manganês, originando sais que juntamente com o produto da decomposição dos resíduos gerados pelas próprias plantas darão origem à chamada reserva de fósforo do solo (LOPES, 1998).

Muito embora as reservas de fósforo do solo disponham de uma ampla gama de compostos, as plantas costumam absorver tão somente os ortofosfatos para suprir suas necessidades. Segundo MALAVOLTA (1968), esse comportamento cria uma situação um tanto paradoxal, ao menos no que se refere aos cultivos realizados nas terras brasileiras: se por um lado a quantidade de fósforo presente no solo é bastante superior àquela necessária ao crescimento de qualquer cultura; por outro, a carência desse nutriente pode também ser apontada como principal agente limitador da produção agrícola, trazendo impactos mais danosos inclusive, que aqueles causados por qualquer outra deficiência nutritional, por toxicidade ou por doenças. A solução desse impasse passa forçosamente pela complementação dos teores de ortofosfatos do solo por meio da aplicação de fertilizantes fosfatados.

Os fertilizantes fosfatados podem ser subdivididos quanto à sua produção em duas rotas de processamento: a rota úmida e a rota térmica. Por meio da rota úmida são produzidos atualmente no Brasil o superfosfato simples (também conhecido como superfosfato normal), o superfosfato triplo, os ortofosfatos de amônio, os fosfatos parcialmente acidulados e os fosfatos naturais de aplicação direta. De outra forma, o país produz em escala econômica por meio da rota térmica, apenas o termofosfato magnesiano fundido.

Como no caso de tantos outros processos de transformação, aqueles que irão compor as rotas úmida e térmica de produção de fertilizantes fosfatados foram já avaliados em diversas ocasiões, tendo quase sempre por critérios de análise variáveis de cunho técnico e econômico.

No entanto, o despertar do ser humano para o fato de os danos originados da manufatura e do consumo de bens, assim como do uso de serviços, trazerem reflexos negativos importantes sobre as reservas de recursos naturais e a qualidade do meio ambiente veio alterar um pouco esse quadro. Ao dar-se conta que tal relação de causa e efeito é em verdade de natureza sistêmica, e que portanto, sua abrangência não está restrita apenas à manufatura propriamente dita dos produtos, o mercado consumidor passou a exigir medidas mais eficazes que visassem a preservação da natureza.

Ao ver-se pressionado a reduzir custos para seguir mantendo-se competitivo, sujeito a políticas altamente restritivas estabelecidas pelos organismos ambientais e vislumbrando a possibilidade de obter vantagens comerciais com um forte apelo de “marketing”, o setor empresarial foi conduzido a uma mudança de postura. Assim, os grandes conglomerados forçaram-se a incluir a variável ambiental como fator de tomada de decisão em seus processos gerenciais, no projeto de novos produtos, na instalação de novas unidades fabris ou na remodelação das já existentes.

Para que isso fosse possível, essas empresas passaram a valer-se das diversas técnicas de identificação e avaliação dos efeitos adversos causados pelas atividades antrópicas sobre o meio ambiente propostas ao longo dos últimos vinte e cinco anos. Dentre estas, mereceu especial destaque, graças à sua versatilidade, uma metodologia denominada Análise de Ciclo de Vida – ACV.

## **O grupo de Prevenção de Perdas e a ACV**

Os benefícios ambientais proporcionados pela ACV chamaram a atenção do Grupo de Prevenção da Poluição - GP2, um grupo constituído junto ao Departamento de Engenharia Química da EPUSP que tem se dedicado ao longo dos últimos oito anos à geração e difusão de conhecimentos, bem como à formação de competências nos campos da prevenção da poluição e da gestão ambiental.

Como resultado desse interesse, o GP2 decidiu agregar a ACV ao escopo de suas atividades, transformando-a, em 1997, em sua primeira linha de pesquisa. As razões que motivaram essa iniciativa deveram-se em grande parte ao já mencionado caráter estratégico assumido pela ACV, bem como ao então ineditismo dessa técnica no Brasil.

Ao aprofundar-se no tema, o GP2 percebeu que por meio da ACV torna-se possível a priorização de ações de melhoria no sentido da prevenção da poluição que permitem alocar de maneira adequada recursos materiais, humanos e econômicos, estimulando assim o aumento da competência e favorecendo a inovação tecnológica. Para que tal objetivo fosse alcançado, a linha de pesquisa de ACV foi estruturada sob duas vertentes. A primeira delas visava estabelecer bancos de dados nacionais para os produtos, processos e atividades desenvolvidos no Brasil.

Os bancos de dados detêm informações de cunho ambiental sobre a produção de bens de consumo (caso de celulose, aço, polímeros e materiais combustíveis), a disponibilização de recursos energéticos (tais como a geração das energias térmica e elétrica), ou ainda a realização de serviços (o tratamento dos esgotos domésticos de certa localidade ou o transporte rodoviário de carga) que poderiam ser aproveitados em outros estudos de ACV por fazerem parte dos ciclos de vida de diversos produtos.

Encontram-se atualmente em desenvolvimento no GP2 três projetos voltados à elaboração de bancos de dados, cujos temas tratam respectivamente da geração, distribuição e transmissão de energia de origem hidrelétrica, da produção de policloreto de vinila (PVC) e da produção de papel a partir de fibras de celulose.

A segunda vertente da linha de pesquisa dedica-se em essência, a estudar os usos e aplicações da ACV. Por meio de estudos científico-tecnológicos voltados para a identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental de processos

ou à comparação ambiental de produtos, o GP2 busca contribuir para que a variável ambiental possa ser também item de análise em processos gerenciais de decisão.

Aproveitando a experiência adquirida ao longo de mais de trinta anos junto ao setor de fertilizantes, o grupo decidiu estabelecer como primeiro projeto nessa área, a comparação ambiental, por meio da referida metodologia, das rotas úmida e térmica de produção de fertilizantes fosfatados. Além de verificar qual das rotas de processo impõe maior impacto sobre o meio ambiente durante sua execução, esse estudo pretende ainda identificar oportunidades para a melhoria de desempenho ambiental ao longo dessas vias de processamento.

A fim de representar adequadamente a rota úmida foram selecionados como produtos de referência o Superfosfato Simples – SSP e o Superfosfato Triplo – TSP.

O SSP apresenta teor mínimo de fósforo, medido em termos de  $P_2O_5$ , de 18%. Obtido por meio da digestão do concentrado de rocha fosfática por ácido sulfúrico, tal produto corresponde, já há algum tempo, ao fertilizante fosfatado mais produzido no país.

Da mesma forma que com seu homólogo, a produção de TSP ocorre também pelo ataque químico do concentrado fosfático; nesse caso entretanto, como a função de agente solubilizador é desempenhada pelo ácido fosfórico, o conteúdo de fósforo esperado para esse adubo deve ser superior a 41% de  $P_2O_5$ .

Por empregar  $H_3PO_4$  em seu processamento, o ciclo produtivo do TSP acaba por apresentar determinados problemas ambientais de relevante magnitude. Durante a manufatura desse ácido mineral são geradas grandes quantidades de fosfogesso, um rejeito composto principalmente por sulfato de cálcio. Dada sua pequena aceitação de mercado, o fosfogesso é disposto em sua quase totalidade como resíduo sólido, trazendo consequências negativas, sobretudo no que se refere à ocupação de área e à contaminação do lençol freático.

Para avaliar ambientalmente a rota térmica, decidiu-se pela realização de uma ACV do Termofosfato Magnesiano Fundido – FMP, um produto cujo teor de fósforo assemelha-se bastante ao encontrado no SSP. Ainda que sua produção esteja bastante aquém daquelas alcançadas por seus homólogos no grupo dos fosfatados, esse produto é considerado pelos especialistas em adubação mineral como um dos fertilizantes de melhor adaptabilidade às condições agrícolas nacionais.

Em contra partida, também sob o enfoque ambiental, o FMP se consagra pelo elevado consumo de energia elétrica dispendido durante seu processo produtivo.

Buscando adquirir experiência quanto ao manuseio da ACV, o projeto antes mencionado foi subdividido em duas etapas. Na primeira etapa, realizada por ocasião do programa de mestrado do autor e concluída em 2000, desenvolveu-se um modelo para realização de ACV adaptado às condições brasileiras, o qual foi posteriormente aplicado a título de comprovação ao processo de produção de SSP. A opção por avaliar esse fertilizante fosfatado, deveu-se ao fato do SSP ser, segundo um enfoque estritamente ambiental, o menos polêmico dos três produtos em estudo.

A segunda etapa do projeto, na qual estão compreendidas respectivamente, a realização das ACVs dos fertilizantes fosfatados restantes e a análise comparativa dos resultados delas decorrentes, é objeto de estudo da presente tese de doutorado.

## **II. OBJETIVOS**

Como já mencionado, esta tese de doutorado é parte de um projeto iniciado em 1998, cujo objetivo consiste na comparação do desempenho ambiental das rotas úmida e térmica de produção de fertilizantes fosfatados.

Para o presente trabalho a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) proposta por ocasião do mestrado do autor, agora remodelada em função dos desenvolvimentos decorrentes de novas pesquisas, foi aplicada para os casos de dois outros fertilizantes fosfatados: o Superfosfato Triplo e o Termofosfato Magnesiano Fundido.

Nessas condições, são objetivos específicos desta tese de doutorado:

- a avaliação do desempenho ambiental do ciclo de vida do TSP e do FMP, desde a extração de recursos naturais até a manufatura de cada um desses produtos e
- a identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental ao longo das etapas que constituem a cadeia produtiva desses mesmos fertilizantes, segundo a forma como estas são praticadas pelas indústrias brasileiras do setor.

Este estudo pretende contribuir para o desenvolvimento do setor brasileiro de fertilizantes, fornecendo elementos que permitam a inclusão da variável ambiental no escopo de critérios gerenciais para tomada de decisão em projetos voltados à ampliação e remodelação do parque industrial existente.

### **III. ESTRUTURAÇÃO DAS ATIVIDADES DE PESQUISA**

A comparação do desempenho ambiental dos ciclos de vida do Superfosfato Triplo e do Termofosfato Magnesiano Fundido foi realizada pelo cotejamento dos resultados obtidos por ocasião da aplicação da metodologia de ACV para ambos os fertilizantes. Para que esse objetivo fosse alcançado, o presente trabalho científico teve suas atividades estruturadas de acordo com as seguintes etapas:

- realização de uma Revisão Bibliográfica a fim de levantar o estado da arte em que se encontram no momento tanto a técnica de Análise de Ciclo de Vida, quanto as tecnologias e condições de operação utilizadas nas cadeias produtivas do TSP e do FMP e
- realização de estudos de Avaliação de Ciclo de Vida para os fertilizantes fosfatados mencionados.

Apresenta-se a seguir um relato sumarizado de cada uma das atividades antes enunciadas.

#### **III.1. Revisão da Literatura**

A Revisão da Literatura apresentada no Capítulo IV deste documento deve ser entendida como o produto de um levantamento de informações realizado junto a diversas fontes, a fim de fornecer a fundamentação teórica necessária à elaboração do presente trabalho acadêmico.

Revestida desse espírito, tal atividade foi conduzida segundo dois enfoques: levantamento do estado da arte da metodologia de Análise de Ciclo de Vida – ACV; e apresentação de um panorama atualizado sobre o setor brasileiro de fertilizantes no que se refere ao Superfosfato Triplo e ao Termofosfato Magnesiano Fundido.

Ao levantamento do estado da arte da ACV foram também dispensadas duas abordagens distintas: a primeira delas, consta de um breve histórico da metodologia a que se segue um resumo dos usos e aplicações para os quais esta se destina.

A segunda abordagem, de cunho essencialmente conceitual, traz a descrição dos elementos que constituem a ACV. O conteúdo deste tópico fundamenta-se tanto nas normas e nos procedimentos que orientam sua aplicação, quanto em relatos de

especialistas na matéria. O mesmo texto é complementado por um glossário com os principais termos compreendidos pelo vocabulário técnico da ACV.

Tratamento bastante semelhante a este foi empregado na segunda etapa da Revisão Bibliográfica, cujo conteúdo apresenta um panorama atualizado da indústria nacional de fertilizantes fosfatados no que se refere às produções de TSP e FMP.

No intuito exclusivo de situar o leitor quanto à problemática que permeia tal segmento produtivo, esta etapa do levantamento bibliográfico foi também dividida em dois momentos: de início, são feitas considerações sobre as fontes convencionais de obtenção de fósforo, de seus principais produtores em escala mundial e da posição ocupada pelo Brasil em tal mercado. Essa exposição é concluída com um diagnóstico da estruturação do mercado interno de produção de fertilizantes fosfatados.

Segue-se à elaboração deste quadro introdutório, uma descrição pouco mais aprofundada dos produtos em avaliação. Por ocasião do segundo momento da revisão bibliográfica dos fertilizantes em estudo são abordados aspectos de ordem técnico-econômica relacionados às manufaturas propriamente ditas do TSP e do FMP, como também da fabricação de alguns dos principais produtos intermediários empregados por seus processos produtivos.

A fim de torná-la mais completa e atraente, a presente discussão conta ainda com dados sobre os efeitos ambientais gerados ao longo das cadeias produtivas em avaliação e tece comentários complementares de ordem econômica sobre a matéria.

Para que se fosse possível oferecer um cabedal razoável de informações, a atividade de Revisão da Literatura foi conduzida a partir de depoimentos e dados das mais diversas origens, dentre os quais se incluem artigos científicos, normas técnicas, relatórios de agências e de organismos ambientais, manuais descritivos de processo, publicações decorrentes de eventos correlatos aos temas e comunicações pessoais de especialistas nos assuntos abordados.

### **III.2. Realização dos estudos de Análise de Ciclo de Vida do TSP e do FMP**

Como será visto em detalhes mais adiante, a metodologia de ACV compõe-se das seguintes etapas de execução: definição dos objetivos e do escopo, análise de inventário de ciclo de vida (ICV), avaliação de impactos ambientais e interpretação.

O Capítulo VI deste documento descreve a realização das ACVs para o TSP e para o FMP pelo detalhamento de cada uma das etapas já mencionadas. Na etapa de “*Definição de objetivos e escopo*” foram determinados inicialmente os propósitos e o público alvo a que o estudo se destina.

Na etapa que a ela se segue, referente à “*Elaboração dos Inventários de Ciclo de Vida*”, são apresentadas em princípio, as fontes de informação consultadas para o cumprimento do procedimento de coleta de dados, bem como as variáveis e demais condicionantes utilizadas na construção dos modelos representativos para os ciclos de vida do TSP e do FMP. Esse conteúdo é completado com os resultados da etapa de inventário – alocados nos Anexos deste documento – que consistem: da planilha de dados para operação da unidade de processamento de ácido sulfúrico; do código de programação que realiza a conexão entre essa última e o simulador de processos utilizado para a modelagem desse mesmo processo; dos inventários individualizados de aspectos ambientais dos subsistemas que constituem o universo de aplicação da Análise de Ciclo de Vida para o TSP e o FMP, e finalmente, das tabelas consolidadas de valores para esses mesmos fertilizantes fosfatados.

A etapa de “*Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida*” compreende, por sua vez, de uma breve descrição do modelo utilizado para a transformação dos resultados obtidos no ICV em efeitos potenciais sobre o meio ambiente e sobre a saúde humana, e da apresentação dos resultados decorrentes desse procedimento.

É importante observar que os estudos de ACV efetuados para este trabalho de pesquisa observaram ao longo de sua realização, os procedimentos e recomendações firmados pelas normas que perfazem a conhecida série ISO 14040 da *International Standardization Organization*. (ISO, 2002)

### **III.3. Avaliação de desempenho ambiental**

A avaliação do desempenho ambiental do TSP e do FMP corresponde em essência ao objetivo principal a que o presente trabalho acadêmico se propõe.

Assim, após terem sido cumpridos todos os passos necessários à realização da referida pesquisa, tem lugar no Capítulo VII uma discussão construída em torno dos resultados obtidos pela etapa de Avaliação de Impactos Ambientais, na qual são

avaliados de maneira analítica os efeitos, tanto sobre o meio ambiente quanto sobre a saúde humana, gerados em decorrência das produções desses fertilizantes fosfatados.

Ainda na mesma abordagem, são também apontados ao longo dessa atividade os subsistemas para os quais são atribuídas contribuições potenciais expressivas aos impactos ambientais selecionados para a realização do estudo. Por outro lado, se observada sob um enfoque essencialmente gerencial, a forma como foram descritas as avaliações ambientais do TSP e do FMP permite também que sejam identificadas oportunidades de melhoria de desempenho em ambos os sistemas.

A discussão realizada para o presente estudo corresponde, em termos gerais, à etapa de “*Interpretação*” prevista na estrutura de execução da metodologia de ACV.

## **IV. REVISÃO DA LITERATURA**

Como anteriormente mencionado, serão objetos dessa Revisão da Literatura aspectos relacionados tanto à metodologia de Análise de Ciclo de Vida quanto aos processamentos do Superfosfato Triplo e do Termofosfato Magnesiano Fundido.

O cabedal de informações gerado a partir dessa atividade é considerado como suficiente para a condução do projeto de comparação entre as rotas úmida e térmica de produção de fertilizantes fosfatados.

### **IV. 1 ANÁLISE DE CICLO DE VIDA**

#### **IV.1.1. INTRODUÇÃO AO TEMA**

O Movimento Desenvolvimentista, originado na Europa a meados do século XIX como consequência da Revolução Industrial, influenciou de maneira decisiva a civilização moderna ocidental. Tanto isso é verdade que algumas das descobertas realizadas a partir de seu surgimento, tais como os fertilizantes minerais e defensivos agrícolas, diversos medicamentos e certas vacinas, foram decisivos para o aumento da população mundial e para a melhoria de suas condições de vida.

Se por um lado o Desenvolvimentismo trouxe benefícios que facilitaram em muito a vida do homem moderno, por outro, este provou-se também bastante lesivo à natureza. Essa afirmação se justifica pelo estabelecimento de premissas, no mínimo equivocadas, que fundamentavam o referido modelo de crescimento.

De acordo com SILVA (2001), à ótica desenvolvimentista, o meio ambiente era visto tanto como uma fonte inesgotável de recursos naturais, quanto como um sorvedouro com capacidade infinita, capaz de absorver as mais variadas classes de rejeitos materiais e energéticos. Esse fato é capaz de explicar o motivo pelo qual a qualidade de vida do ser humano foi diminuindo paulatinamente, ao mesmo tempo em que este buscava satisfazer suas necessidades de consumo por meio da aplicação do referido modelo.

Os primeiros movimentos organizados no sentido de alertar a sociedade quanto aos riscos potenciais que a prática descontrolada do Desenvolvimentismo poderia acarretar ao planeta começam a surgir apenas a partir da segunda metade dos anos 60.

Nesse contexto, merecem especial destaque, iniciativas como a publicação do relatório elaborado pelo Clube de Roma em 1965, a 1<sup>a</sup> Conferência Mundial sobre Desenvolvimento e Meio Ambiente promovida pela Organização das Nações Unidas – ONU (1972), o Relatório Brundtland, intitulado *Our Common Future* de 1987 e o Fórum Global de Desenvolvimento (Rio – 92), igualmente realizado sob os auspícios da ONU.

A somatória desses esforços surtiu efeitos positivos; por um lado a matéria ambiental ganhou leis e regulamentações bastante restritivas; enquanto que por outro, o mercado consumidor tornou-se mais informado, e por conta disso, mais exigente, quanto à preservação do planeta.

Um dos marcos dessa quebra de paradigma, considerado por muitos inclusive como principal responsável pelo refreamento do modelo desenvolvimentista, foi a formulação do conceito de Desenvolvimento Sustentado, descrito por SILVA (2001), de maneira sintética, como “*o desenvolvimento que atende às necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas*”.

Na opinião de muitos especialistas no tema, o exercício do Desenvolvimento Sustentado tem lugar por meio de ações de duas naturezas: controle e prevenção. As ações de controle buscam reduzir a periculosidade dos rejeitos gerados em certo processo produtivo por meio da modificação das propriedades físicas, químicas ou biológicas dos mesmos, antes que se efetive sua disposição no meio ambiente.

Por outro lado, as chamadas ações de prevenção incidem sobre um processo produtivo buscando minimizar não apenas seu consumo de recursos naturais, mas também a geração de rejeitos proporcionada em consequência do mesmo. Para esse último caso em particular, diversas técnicas, visando o reuso, a reciclagem ou ainda, a revalorização desses materiais costumam ser implementadas a título de prevenção.

Muito embora realizada com o intuito de atender a requisitos e padrões legais, a incorporação de medidas de controle e prevenção a seus processos produtivos fez com que muitas empresas experimentassem um aumento da eficiência de conversão de insumos em produto, o qual acabou sendo diretamente transformado em receita.

Entretanto, como o campo de aplicação de tais medidas estava restrito apenas às etapas de processamento propriamente dito dos bens de consumo – ou seja, desde a extração dos recursos naturais até os limites da unidade de manufatura – aspectos igualmente relevantes como os efeitos ambientais provocados pelas chamadas etapas de pós-produção permaneciam ainda sem serem avaliados.

Os problemas ambientais que permaneciam assolando o planeta fizeram com que o homem moderno percebesse que a manutenção da sustentabilidade mundial não dependia tão somente do bom desempenho ambiental dos processos de produção e que portanto a matéria ambiental não poderia ser tratada de outra maneira que não a sistêmica.

A solução dessa dificuldade foi alcançada por meio de uma mudança de foco; assim, ainda durante os anos 90, foram realizadas as primeiras avaliações ambientais nas quais o processo deixava de ser o principal objeto de estudo, para dar lugar à função a que se destina o produto por ele gerado.

Por conta disso, etapas como distribuição, uso e disposição final puderam ser também acrescentadas à cadeia de produto. Dessa ampliação de fronteiras nasceu o conceito de *ciclo de vida do produto*, descrito por SILVA (2001) como, “*o conjunto das etapas necessárias para que um produto cumpra sua função, desde a obtenção dos recursos naturais empregados em sua manufatura, até a disposição final do mesmo após se haver completado o cumprimento de sua função*”.

Ao longo de seu ciclo de vida, um produto interage com o meio ambiente em diversas ocasiões, quer consumindo recursos naturais, quer dispondo nesse último, de rejeitos sólidos, líquidos e gasosos. A norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001) define cada uma desses correntes materiais e energéticas como *aspectos ambientais*. Ainda segundo a mesma publicação, são denominados de *impactos ambientais* às alterações ocorridas no meio ambiente em decorrência dessas interações.

Essa nova mudança de paradigma acabou por criar um consenso de que uma avaliação consistente do desempenho ambiental de um produto poderia ser realizada apenas por uma metodologia que fosse capaz de contabilizar não apenas os aspectos ambientais gerados durante seu ciclo de vida, mas também os impactos ambientais a eles associados. Atualmente este papel tem sido ocupado pela Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

#### **IV.1.2. BREVE HISTÓRICO**

Em termos conceituais, a ACV pode ser entendida como uma metodologia técnico-científica capaz de avaliar os impactos ambientais gerados por um produto, grupo de produtos ou materiais, ao longo de seu ciclo de vida; isto é, desde a extração de matérias-primas da Terra, ou biota, até a disposição final do mesmo, após sua função ter sido completamente esgotada (CONSOLI, 1993).

Os primeiros estudos dedicados à realização de avaliações ambientais nos moldes do que se poderia chamar hoje de uma Avaliação de Ciclo de Vida datam do início dos anos 60, portanto em meio ao apogeu do Desenvolvimentismo, quando alguns dos grandes grupos empresariais da época houveram por bem inventariar os consumos energéticos decorrentes da fabricação de seus produtos (VIGON, 1993).

Segundo MEADOWS (1973), práticas como essa foram intensificadas ainda na mesma década motivadas principalmente pela divulgação de documentos como o relatório do Clube de Roma, que fizeram crescer a preocupação da sociedade tanto com o esgotamento de recursos naturais quanto com a poluição do planeta.

Um dos estudos mais conhecidos nesse campo, foi realizado pelo *Midwest Research Institute* a pedido da Coca-Cola Co. no ano de 1969. Nesse trabalho, eram comparados os consumos de recursos materiais e energéticos bem como as gerações de rejeitos da fabricação das embalagens que acondicionavam alguns dos produtos da referida empresa do segmento alimentício (CHRISTIANSEN, 1996).

A compilação dos diversos estudos elaborados segundo esse mesmo enfoque, os quais segundo WENZEL et al. (1997) passaram a ser denominados de *Resource Environmental Profile Analysis* – REPA, foi decisiva para o desenvolvimento pelos países europeus do conhecido *Ecobalance Method*, que viria a fornecer alguns anos depois, boa parte da fundamentação teórica necessária à concepção da ACV.

CURRAN (1996) reporta que os REPA também desempenharam importante papel durante a primeira crise do petróleo, particularmente nos anos entre 1973 e 1975. À época, segundo a autora, foram realizados por encomenda dos governos de diversos países industrializados, estudos detalhados avaliando o potencial energético do planeta que incluíam não apenas um diagnóstico situacional do problema, mas também propostas de alternativas ao uso dos combustíveis fósseis.

Entretanto, ainda segundo CURRAN a diversidade de padrões e critérios para a aplicação da metodologia, aliada à falta de bancos de dados amplos e confiáveis, bem como, aos elevados custos envolvidos à época, resultou na manipulação dos resultados obtidos em muitos dos casos. Por conta disso, a ACV acabou por cair em descrédito junto a comunidade científica, ao que se seguiu seu temporário abandono.

Os centros de pesquisa voltados ao estudo e à difusão da metodologia em questão, decidiram porém seguir fazendo investimentos para o seu desenvolvimento; essas organizações empreenderam esforços no sentido de aprimorar estes e outros pontos deficitários da técnica e a fim de torná-la definitivamente um procedimento confiável e exequível.

Os progressos obtidos por meio dessa iniciativa, associados à preocupação muito em voga no início dos anos 80 com a destinação dos resíduos, foram, segundo VIGON (1993), decisivos para a criação de um ambiente amplamente favorável ao ressurgimento da ACV.

Diante de um cenário altamente competitivo, no qual as grandes organizações multinacionais tentavam demonstrar ao mercado consumidor a superioridade de seus produtos sobre seus concorrentes imediatos, a ACV reaparece como uma ferramenta de grande potencial para a avaliação de desempenho ambiental de bens e processos. A maior prova de que a ACV tornara-se consistente em suas avaliações ocorreu em 1985, quando a Comunidade Européia – CE decidiu recomendá-la como técnica para o auto-monitoramento dos consumos materiais e energéticos em quaisquer empresas nela instaladas (FAVA, 1991; CHRISTIANSEN, 1996).

Ainda que a ACV siga em fase de evolução no que se refere a alguns de seus componentes, o interesse por ela tem aumentado em seus mais variados usos. Dentre as muitas instituições espalhadas pelo mundo que se dedicam à busca de uma base conceitual consistente e uniforme para essa metodologia merece especial destaque pelo papel que desempenha a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* – SETAC.

Na opinião de muitos praticantes da ACV, a SETAC, que dedica esforços ao crescimento da ACV há mais de uma década, constitui-se atualmente no principal fórum de discussão para os muitos aspectos correlacionados à referida técnica.

A importância adquirida pela ACV no contexto da Prevenção da Poluição fez com que os conceitos e procedimentos executivos que dela fazem parte acabassem sendo padronizados pela *International Organization for Standardization* – ISO. Há exatos dez anos, essa instituição vem tratando de fornecer à referida metodologia o caráter uniforme peculiar a todas as técnicas que se dedicam à Gestão Ambiental. Para tanto, a ISO reservou para a ACV a série 14040, que conta atualmente com as seguintes normas disponíveis (ISO, 2002):

- ISO 14040: *Environmental management – Life Cycle Assessment – Principles and framework* (1997)
- ISO 14041: *Environmental management – Life Cycle Assessment - Goal and scope definition and inventory analysis* (1998)
- ISO 14042: *Environmental management – Life Cycle Assessment – Life cycle impact assessment* (2000)
- ISO 14043: *Environmental management – Life Cycle Assessment – Life cycle interpretation* (2000)
- ISO/TR 14047: *Environmental management – Life cycle impact assessment – Examples of application of ISO 14042 / Management environmental* (2000): Committee draft – Technical Report
- ISO/TR 14048: *Environmental management – Life Cycle Assessment –Data documentation format* (2002): Committee draft – Technical Report
- ISO/TR 14049: *Environmental management – Life Cycle Assessment – Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis* (2000) – Technical Report

Procurando manter-se em consonância com as tendências mundiais, o Brasil optou por tomar contato com ACV por meio de três vertentes: a versão das normas da série 14040 para o Português, realizada sob a supervisão da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT; o desenvolvimento de estudos, tanto de aplicação como de aprimoramento de ACV adaptados às condições brasileiras e a criação da Associação Brasileira de Ciclo de Vida – ABCV, a qual ocorreu formalmente no ano de 2003.

#### **IV.1.3. USOS E APLICAÇÕES**

Em se tratando de uma metodologia de avaliação ambiental com foco sobre a função do bem de consumo, a ACV proporciona informações sobre as interações que ocorrem entre a cadeia de produto – que doravante passará a ser denominada *sistema de produto* – e o meio ambiente. Por conta disso, CONSOLI (1993) relata que durante o primeiro simpósio que pretendeu discutir os rumos da ACV, organizado pela SETAC ainda no transcorrer da década de 90, estabeleceu-se que os objetivos gerais para a realização de um estudo dessa natureza seriam:

- 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 consequências ambientais das atividades humanas e
- gerar subsídios capazes de definir os efeitos ambientais dessas atividades e identificar oportunidades para melhorias de desempenho ambiental.

Por conta dessas premissas, é possível subdividir as aplicações triviais a que se destina um estudo de ACV em duas grandes vertentes:

- identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental e
- comparação ambiental entre produtos de função equivalente.

Na primeira vertente, a ACV atua empreendendo a busca dos principais focos de impactos ambientais proporcionados por um sistema de produto. Ao término de sua aplicação, o praticante terá estabelecido a contribuição do sistema em estudo para as diversas categorias de impacto ambiental. De posse desse diagnóstico, planos de ação voltados à minimização dos mesmos poderão ser estabelecidos.

Na aplicação da ACV para comparação de produtos de função equivalente, a referida técnica avalia os aspectos ambientais – e seus impactos associados – para diferentes formas de atender a uma mesma função.

A maior demanda de utilização da ACV com esse viés ocorre na comparação entre bens de consumo disponíveis no mercado; nesse caso procura-se demonstrar a supremacia ambiental de certo produto sobre seus concorrentes diretos, com o intuito exclusivo de conquistar novos mercados.

No entanto, quando efetuada confrontando o desempenho ambiental de um ou mais produtos contra um padrão pré-estabelecido, os resultados de uma ACV podem servir para a elaboração de rótulos e declarações ambientais (RIBEIRO, 2003).

Para JENSEN (1997), o fato de a ACV ser uma técnica bastante eficiente na elaboração de diagnósticos ambientais disponibiliza sua aplicação para atividades estratégicas de uma organização. Em seu relato, o autor enquadra nessa categoria o projeto de novos produtos ou mesmo a reavaliação de produtos já consagrados, que nesse caso teriam seu reprojeto orientado no sentido de reduzir impactos ambientais gerados ao longo de seu ciclo de vida. Dentro ainda da mesma linha de abordagem, CURRAN (1996) prefere evidenciar a influência exercida pela ACV sobre outras técnicas que orientam a seleção de opções para projeto, principalmente na busca de materiais e formas alternativas de energia, na minimização de perdas de processo e na concepção de produtos menos agressivos ao meio ambiente.

Esta tendência, antes identificada por HIGGINS (1995), e mais recentemente por SONNEMAN (2002), pode ser confirmada por meio da iniciativa de grandes corporações como AT&T, General Electric, IBM, DEC, UniLever, Procter & Gamble, Whirlpool e Xerox, em usar a ACV como ferramenta de tomada de decisão 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 pelo mercado.

Ainda que o conteúdo antes apresentado possa ter demonstrado uma gama bastante ampla para o emprego da ACV, um relato existente em CONSOLI (1993) rememora um fato de grande importância. De acordo com esse autor, se por um lado a ACV demonstra eficiência tanto na identificação dos focos de problemas ambientais quanto na de seus efeitos, por outro é também incapaz de propor soluções para a remediação dos mesmos. CHRISTIANSEN (1996) complementa o raciocínio encorajando empresas, agências ambientais e até organizações não governamentais a utilizarem-se da ACV em conjunto com outras ações de controle e de prevenção, com o intuito de garantir a perpetuação do Desenvolvimento Sustentado.

#### **IV.1.4. METODOLOGIA DE ACV**

A metodologia de ACV a ser apresentada nesse capítulo está baseada nos conteúdos apresentados pelas normas ISO 14040 (1997), em sua versão traduzida para a língua portuguesa pela ABNT - NBR ISO 14040 (2001), ISO 14041 (1998) e ISO 14042 (2000) e ISO 14043 (2000b). Nessas fontes, encontram-se descritos os princípios e a estrutura necessários para a realização de um estudo de ACV, assim como alguns dos requisitos inerentes à referida metodologia. O mesmo arrazoado é complementado ainda, por comentários e observações de membros da comunidade científica que dedicam esforços para o desenvolvimento do referido tema.

A fim de familiarizar o leitor com o vocabulário empregado usualmente pelos praticantes de ACV, bem como, de proporcionar um melhor entendimento do objeto deste trabalho acadêmico, providenciou-se preliminarmente à exposição, a inclusão de um glossário de termos técnicos inerentes à metodologia.

**Alocação:** repartição dos fluxos de entrada ou de saída de uma unidade de processo no sistema de produto sob estudo.

**Carga Ambiental:** parâmetro que representa a somatória de aspectos ambientais associados a uma corrente material ou energética.

**Correntes (ou fluxos):** quantidades de matéria ou energia que transpassam uma fronteira.

**Correntes (ou fluxos) elementares:** material ou energia que entra no sistema sob estudo, que foi retirado do meio ambiente sem transformação prévia ou que sai do sistema em sistema sob estudo sem transformação humana subsequente.

**Correntes (ou fluxos) entre sistemas:** correntes que ligam um ou mais sistemas adjacentes ao sistema em estudo.

**Correntes (ou fluxos) internas:** correntes que ligam entre si, duas unidades de um sistema de mesmo processo.

**Dados primários:** dados coletados diretamente junto às unidades de processo que compõem o sistema de produto onde se realiza a ACV.

**Dados secundários:** dados obtidos em literaturas técnicas especializadas, gerados a partir de cálculos de engenharia ou de estimativas de projeto, ou ainda, coletados junto a bancos de dados de ACV já elaborados.

**Fronteiras :** interface entre um sistema de produto e o meio ambiente ou outros sistemas de produto.

**Produto:** quantidade de matéria ou energia gerada por um sistema, a qual é o objeto do estudo de uma análise de ciclo de vida.

**Rejeito:** qualquer forma de matéria ou energia cuja função já tenha se esgotado, e que portanto, deve ser disposta no meio ambiente.

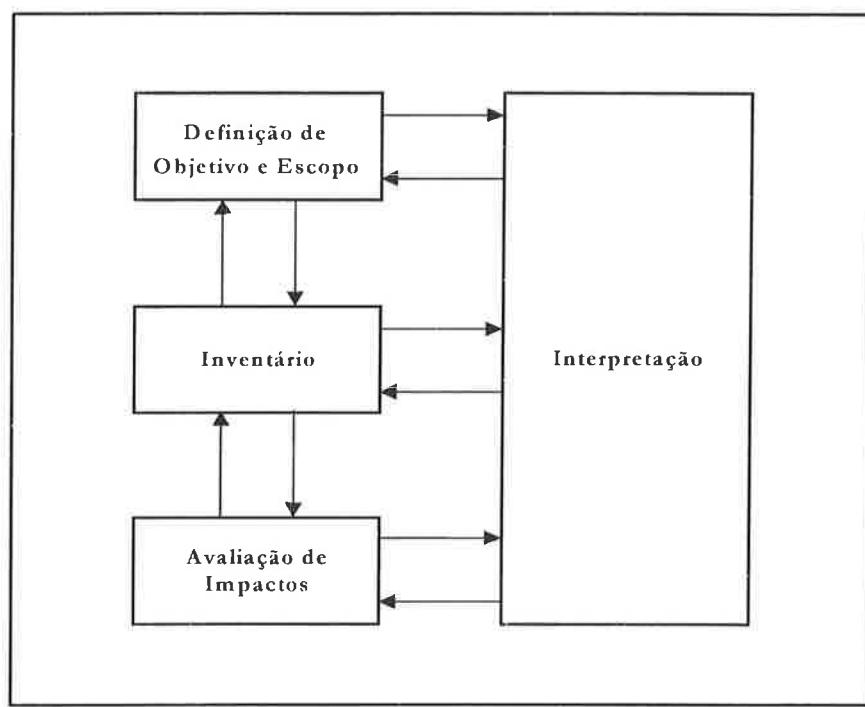
**Sistema:** conjunto de unidades de processo coordenadas entre si e compreendidas no ciclo de vida de um produto.

**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:** menor porção de um sistema de produto para a qual são coletados dados quando é realizada uma avaliação do ciclo de vida.

Segundo a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), a estrutura de um estudo de ACV é composta em essência por quatro fases: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. Cada uma dessas fases relaciona-se às demais de maneira iterativa, tal como aparece representado a seguir na Figura IV.1.

Será apresentada a continuação, uma descrição resumida de cada fase uma das fases acima mencionadas.



**Figura IV.1. Estrutura metodológica da Análise de Ciclo de Vida**  
Fonte: NBR ISO 14040 (ABNT, 2001)

#### IV.1.4.1. Definição de objetivos e de escopo

Tal como descreve a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), durante a etapa de definições são estabelecidos respectivamente os *objetivos* e o *escopo* de um estudo de ACV.

A definição dos objetivos deve ser feita de modo inequívoco, determinar o uso pretendido para os resultados obtidos em decorrência do estudo, a motivação para realizá-lo e seu público-alvo. Normalmente, o processo para o estabelecimento dos objetivos de uma ACV é realizado em reuniões conjuntas entre o cliente e a equipe designada para a realização do estudo. Esse procedimento garante que fatores relevantes como as expectativas do cliente quanto às conclusões do estudo, bem como seus custos e tempo de duração sejam devidamente acordados entre as partes envolvidas.

Segundo KULAY (2000) a realização de estudos de ACV no âmbito interno das organizações, se presta ao atendimento de metas de diversas naturezas, dentre as quais podem ser destacadas:

- planejamento estratégico ou desenvolvimento de estratégias ambientais;
- otimização ou "reprojeto" de processos e produtos existentes e
- desenvolvimento de novos produtos.

Na quase totalidade desses casos, os resultados obtidos pela ACV costumam servir de suporte para decisões corporativas voltadas ao gerenciamento ambiental da organização. De outra forma, caso o cliente pretenda tornar públicas as conclusões geradas pelo estudo no âmbito externo à sua organização, tais como o mercado consumidor, organismos reguladores, ou quaisquer outras fontes, a ACV poderá ser elaborada de forma a 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.

Segundo WENZEL et al. (1997), a definição do escopo do estudo deve tanto identificar quanto definir o objeto de análise da ACV. Segundo o conteúdo da norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), esse processo deverá considerar e descrever de maneira clara os seguintes elementos:

- *função do sistema de produto*: define a que se presta o produto em análise, ou seja, a função a que este se destina;
- *unidade funcional (UF)*: é uma medida do desempenho das “saídas funcionais” do sistema de produto sob estudo, entendendo-se por saída funcional às saídas do sistema de produto relacionadas com sua função (ABNT, 2001);
- *fronteiras iniciais do sistema*: a definição das fronteiras do estudo representa a delimitação dos contornos de aplicação da ACV considerado segundo suas mais diversas dimensões. Segundo TILLMAN & BAUMANN (1995), as fronteiras de um sistema de produto podem ser provenientes de diversas origens. Uma primeira classe refere-se às chamadas *fronteiras físicas*, as quais podem ser fixadas tanto com relação ao sistema natural, quanto com outros sistemas. As

*fronteiras com relação ao sistema natural* são limites que indicam os pontos de início e de término do ciclo de vida de um produto com relação ao meio natural.

Por outro lado, como na grande maioria dos casos um sistema de produto encontra-se associado a uma rede também composta de outros sistemas, faz-se necessária a delimitação dos processos a serem estudados. Esse procedimento é realizado por meio da fixação das chamadas *fronteiras em relação a outros sistemas*. Além das fronteiras físicas, existem ainda as *fronteiras geográficas*, que definem a localização de cada processo que constitui o sistema de produto. Considerando-se que em diversos casos o sistema de produto é composto por unidades de processos localizadas em regiões distintas e com características próprias, uma desconsideração das fronteiras geográficas poderia ser fatal, sob pena de colocar em risco a consistência dos resultados alcançados pela ACV.

Uma terceira classe refere-se às *fronteiras temporais*. Esse procedimento se ocupa de estabelecer o período de validade dos dados a serem levantados. O uso das fronteiras temporais determina se o estudo irá se desenvolver em tempo real, se estará focado em períodos passados, ou mesmo, se deverá tomar por base cenários hipotéticos que deverão se consolidar apenas futuramente.

A última classe de definição de fronteiras comprehende aquelas chamadas de *bens de capital*. Esse elemento estabelece se a infra-estrutura necessária à realização do processo – caso de edificações, vias de passagens e afins – deverá ser ou não incluída no escopo do estudo.

O procedimento de fixação de fronteiras tem início por meio de uma avaliação generalizada do sistema de produto. Para que essa atividade seja realizada de maneira efetiva, a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001) recomenda a elaboração de um diagrama no qual sejam representadas as operações incluídas potencialmente no estudo.

Auxiliado por especialistas no tema, apoiado nos critérios antes descritos e valendo-se ainda de sua própria sensibilidade, o praticante da ACV tratará então de estabelecer a fronteira inicial do sistema. Não obstante, é preciso considerar que em virtude do já mencionado caráter iterativo da metodologia, resultados obtidos durante as etapas subseqüentes da ACV poderão provocar um realinhamento desse primeiro estágio de definição de fronteiras (WENZEL, 1997);

- *procedimento de alocação*: em um ciclo de vida, é comum encontrar unidades de processo das quais emergem mais de um produto. Alguns destes produtos serão utilizados em seu próprio sistema de origem, para a manufatura do produto de interesse do estudo. Entretanto, em alguns casos, os produtos de uma unidade de processo podem também atravessar as fronteiras do sistema, sendo aproveitados, por sua vez, em outros sistemas. Essas correntes dão-se o nome de subprodutos. Em unidades de processo das quais emergem subprodutos a parte daquele sob o qual versa a aplicação da ACV, faz-se necessária uma *alocação* dos aspectos ambientais relativos ao consumo de recursos naturais e à geração de rejeitos, atribuindo-se a cada qual, a parcela desses que lhes é concernente.

O procedimento de alocação de aspectos ambientais baseia-se essencialmente na aplicação dos chamados *critérios de alocação*. Dentre estes, o chamado *critério mássico* deve merecer destaque especial dada sua freqüência de aplicação. Nesse caso particular, todos os fluxos que caracterizam aspectos ambientais de entrada e de saída serão repartidos entre os produtos obtidos na unidade de processo segundo o percentual mássico de contribuição de cada um.

Além do critério mássico, costuma ser também realizada em muitas situações a dita alocação por *valor econômico*. Para casos a serem tratado sob tal enfoque, WENZEL et al (1997) sugerem no entanto, que uma análise mercadológica dos produtos envolvidos seja realizada previamente a aplicação do referido critério. Segundo os autores, esse cuidado encontra justificativa no fato da ACV ser uma técnica que se baseia na medição de parâmetros físicos, classe na qual o valor econômico de um bem não pode ser definitivamente incluído.

Em determinadas situações, as correntes de saída de um sistema de produto podem demonstrar comportamento ambíguo, agindo tanto como subprodutos, quanto como rejeitos. Para casos como esse, KULAY (2000) recomenda o estabelecimento de uma relação entre os subprodutos e os rejeitos, lembrando que os critérios para a alocação de aspectos ambientais são aplicáveis apenas para os primeiros.

Finalmente, dada a inexistência de critérios universais de alocação, fato que por si é suficiente para introduzir considerável grau de subjetividade aos resultados da ACV, o processo para a seleção desses elementos deve ser conduzido de maneira criteriosa e individualizada para cada sistema de produto (ABNT, 2001).

- *Categorias de impacto e sua metodologia de avaliação:* na fase de definições deverão ser estabelecidas também as classes de problemas ambientais a serem abordadas pelo estudo de ACV, assim como a metodologia a ser empregada para efetuar sua avaliação. As classes de problemas ambientais, que doravante passam a ser denominadas de *categoria de impacto*, são definidas de acordo com os propósitos específicos a que o estudo se destina. Dependendo da metodologia de avaliação selecionada, poderão ser empregados em uma ACV tanto indicadores intermediários de impacto, conhecidos entre os praticantes como “*midpoints*”, quanto indicadores finais – “*endpoints*”.

Os indicadores de “*midpoint*” procedem à avaliação de impactos valendo-se de indicadores relativos, restringindo-se em sua grande maioria aos efeitos primários provocados pela disposição (ou consumo) de determinado aspecto ambiental no meio ambiente. São exemplos desses indicadores os potenciais de Aquecimento Global (também chamado de Efeito Estufa), Toxicidade Humana, Ecotoxicidade Aquática e Terrestre, Depleção de Recursos Naturais (materiais e energéticos), Diminuição de Camada de Ozônio, Acidificação, Eutrofização (ou Nutrificação) entre outros.

Os indicadores do tipo “*endpoints*”, concentram-se por sua vez, na avaliação dos efeitos terminais provocados por determinado aspecto ambiental; nesse quadro, SONNEMANN (2002) destaca os potenciais de Ocupação de Área e de Geração de Substâncias Carcinogênicas;

- *critérios de qualidade dos dados:* a precisão, a representatividade e a completeza de uma ACV dependem em grande parte da qualidade dos dados empregados para sua execução. Procurando tornar mínima essa influência sobre o resultado final do estudo, a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001) sugere a aplicação de critérios de qualidade para o tratamento dessas informações.

O chamado *critério temporal*, leva em conta fatores como a idade, a extensão do período e a freqüência com que determinado dado deve ser coletado.

A maioria dos especialistas é unânime em recomendar que durante a realização de um estudo de ACV sejam considerados dados com até 5 anos de idade. No entanto, aspectos puramente relacionados aos processos sob avaliação como

mudanças de equipamentos, implementação de sistemas de controle ou mesmo a instalação de unidades de tratamento e de recuperação de rejeitos podem abreviar esse período.

No que se refere a sua extensão, o período mínimo de tempo de coleta é de 1 ano seguido de operação; chega a ser consenso entre os praticantes da ACV que esse prazo é suficiente para englobar flutuações de produção, desvios operacionais, paradas programadas e não programadas, bem como suas respectivas repartidas.

O *critério de abrangência* dispõe sobre a amplitude geográfica a ser considerada no estudo. Cuidados adicionais devem ser tomados particularmente quando os limites do sistema de produto transpassam fronteiras entre nações, como ocorre tipicamente com o bem de consumo energia elétrica. Nesse caso, se os dados ambientais referentes à geração, à transmissão e à distribuição de eletricidade não estiverem disponíveis para os países nos quais essas operações se desenvolvem, dois caminhos podem ser seguidos, dependendo das metas fixadas para o estudo: realizar uma abordagem meramente qualitativa dos impactos causados sobre o meio ambiente em decorrência dessas atividades, ou lançar mão de informações de outras fontes, resguardando sempre sua integridade e consistência.

Por fim, caberá aos *critérios tecnológicos* estabelecer a condição para a qual será efetuada a coleta de dados. Dentre as possíveis alternativas selecionadas segundo os critérios tecnológicos, costumam ser empregadas mais regularmente a média aritmética dos dados coletados no campo, a melhor tecnologia disponível, ou ainda, a média ponderada do setor que se dedica ao processamento do produto em estudo. Em certas situações, as alterações tecnológicas podem ser tão recentes que os dados disponíveis acabem por carecer de certa representatividade. Em situações como essa, a utilização de dados de plantas que operem processos semelhantes poderá fornecer estimativas com nível razoável de confiabilidade; entretanto, uma análise crítica preliminar desses dados deve ser conduzida.

O uso de critérios de qualidade como aqueles acima descritos auxilia em muito à delimitação do espaço amostral da coleta de dados. Não obstante, tendo em vista a importância da qualidade dessas informações para o sucesso do estudo, RIBEIRO (2003) sugere que tão logo a coleta de dados tenha sido concluída, indicadores estatísticos capazes de aferir adequadamente aspectos de precisão,

integridade, representatividade, reproduzibilidade e precisão da amostra obtida sejam a ela aplicados.

Inicialmente, qualquer amostra de dados selecionada a partir de uma população de origem deve ser capaz de representar essa última de maneira fiel. A aferição de tal condição pode ser avaliada pela aplicação de um indicador estatístico denominado *representatividade*, o qual expressa em termos percentuais, a relação entre a amostra e a população da qual esta se origina.

Além da representatividade, é importante também conhecer a forma de variação de um dado em torno do valor médio da amostra. Essa medida é fornecida pelo indicador de *precisão* dos dados, que corresponderia em termos estatísticos ao desvio padrão da amostra.

Outro indicador importante corresponde à *integridade* dos dados, um valor que 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 têm preferência sobre os dados secundários. Entretanto, as metas estabelecidas para o estudo podem influenciar bastante nessa decisão, fazendo assim com que o indicador de integridade não seja tão elevado.

Segundo CURRAN (1996), 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 têm ainda preferência sobre dados secundários. Nessas situações, recomenda-se entretanto, que uma análise crítica dos valores seja conduzida, a fim de minimizar o erro potencial introduzido pela decisão de se usar dados de processos equivalentes como fonte de informações.

Um estudo de ACV deve ser, acima de tudo, transparente quanto às premissas e aos procedimentos assumidos para sua realização. Por conta disso, uma equipe de profissionais que esteja de posse de uma ACV já realizada, deve ser capaz de atingir resultados semelhantes aos apresentados nesse documento, valendo-se em essência apenas das informações nele contidas. Para medir essa capacidade, deve ser utilizado um indicador denominado *reprodutibilidade*;

- *análise de sensibilidade*: a análise de sensibilidade, pode ser entendida como um procedimento sistemático de avaliação dos efeitos causados sobre os resultados de um estudo por incertezas de dados e alterações de metodologias. Apenas título

de sugestão, na norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), é recomendado que tal procedimento seja aplicado em associação com os critérios de qualidade de dados no intuito de garantir a consistência das conclusões obtidas da realização da ACV

- *tipo e formato do relatório final:* segundo a NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), os resultados gerados por uma ACV devem ser apresentados ao público alvo – ou cliente – de maneira clara, transparente, completa e precisa.

Para tanto, as partes envolvidas deverão estabelecer de comum acordo a forma e o conteúdo do relatório final a ser apresentado.

Independentemente do uso a que se destina um estudo de ACV, este deve na medida do possível, atender às expectativas do cliente. Assim sendo, certos cuidados visando garantir credibilidade, transparência e integridade dos resultados alcançados, devem ser observados não apenas durante os processos de definição de objetivos e escopo, mas também, ao longo das demais etapas que compõem essa metodologia.

#### **IV.1.4.2. Inventário de Ciclo de Vida**

De acordo com a norma ISO 14041 (1998) a etapa de definições estabelece os elementos iniciais necessários à realização do estudo. A presente etapa, que cuida da elaboração do inventário de ciclo de vida (ICV), concentra-se essencialmente em proceder à coleta dos dados, aplicando-lhes a seguir, um tratamento matemático que permita determinar de maneira quantitativa as correntes de entrada e saída do sistema de produto. Deve-se salientar, no entanto, que a construção de um ICV se dá segundo um processo iterativo, o qual deverá ocorrer necessariamente em consonância com os objetivos e o escopo previamente definidos, ainda que ao longo do desenvolvimento do estudo, esses últimos tenham que ser revistos. Consta da norma ISO 14041 (1998) que um inventário de ciclo de vida estará concluído, após terem sido realizados os seguintes procedimentos operativos:

- preparação para a coleta dos dados
- coleta de dados propriamente dita
- tratamento dos dados
- refinamento do sistema de produto

#### *A). Preparação para a coleta de dados*

O estabelecimento do escopo de uma ACV, define entre outros aspectos, os subsistemas que deverão constituir o sistema de produto em estudo. Tendo em vista que o procedimento de coleta de dados gera grande quantidade de informações – provenientes de diversas fontes e sob as mais distintas condições – é de fundamental importância que uma preparação prévia a atividade de coleta desses dados seja realizada de forma a garantir uma interpretação uniforme e consistente do sistema a ser estudado.

*A preparação para a coleta dos dados* pode ser dividida em três atividades principais:

- elaboração de fluxograma representando os subsistemas e as unidades de processo que os constituem;
- preparação de formulários para a coleta de dados e
- definição de critérios de exclusão de aspectos ambientais.

O objetivo da elaboração de um *diagrama que represente os subsistemas*, é permitir uma visão global do sistema de produto, assim como de suas inter-relações tanto com o meio ambiente, quanto com outros sistemas ligados a ele. O nível de detalhamento estabelecido para a confecção desse diagrama será determinado tanto em função dos objetivos estabelecidos para o estudo, quanto pelas fontes de dados disponíveis para sua realização. Quando um estudo é elaborado com o intuito de fornecer elementos para a definição das estratégias ambientais de uma organização, é necessário que o fluxograma do sistema de produto disponha do maior nível de detalhamento possível, ainda que, quanto à sua extensão, este acabe ficando restrito apenas e tão somente às atividades desenvolvidas pela própria corporação. Por outro lado, caso o estudo seja realizado com o propósito de identificar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental ao longo de todas as etapas que compõem o ciclo de vida de um produto, o fluxograma deverá ser mais extenso não precisando eventualmente dispor de tantas informações.

Afora o fluxograma do sistema de produto, podem também ser eventualmente elaborados diagramas individualizados para cada um de seus subsistemas, a fim de detalhar ao máximo as operações e correntes que os compõem.

Considerando-se tão somente o objetivo a que se destina a coleta de dados, ou seja, quantificar os aspectos ambientais selecionados para certo sistema de produto, é possível perceber o elevado grau de complexidade que cerca essa atividade. Portanto é conveniente que além dos diagramas anteriormente mencionados, sejam preparados ainda *formulários de coleta de dados*, conhecidos genericamente como "*checklists*".

O formulário de coleta de dados é um recurso usado para que o registro das informações levantadas ocorra de maneira organizada, a fim de que essas possam ser recuperadas e disponibilizadas rapidamente caso seja necessário (ISO 14041, 1998).

Um formulário de coleta é, em essência, uma tabela na qual serão listados e quantificados os aspectos ambientais constantes em cada unidade de processo, sob a forma de correntes de entrada e saída que circulam através das fronteiras internas do sistema. As correntes de entrada são compostas por recursos materiais e energéticos, enquanto as correntes de saída referem-se aos produtos, subprodutos e rejeitos, os quais podem ser igualmente materiais e energéticos, gerados no sistema. Além da quantidade do aspecto ambiental selecionado deve ser ainda apontada no "*checklist*" a unidade de medida para as condições em que se realiza o estudo.

A norma ISO 14041 (1998) recomenda que além dos valores das correntes, o formulário deva trazer indicações sobre a fonte de informação do dado, os critérios de qualidade e os indicadores estatísticos selecionados para o estudo; quaisquer referências quanto ao uso de recursos naturais pouco convencionais, assim como, de critérios de alocação que se façam necessários, devem também ser apontadas.

Os formulários de coleta de dados devem ser concisos, para evitar possíveis atrasos quanto ao recebimento de respostas; além disso, é fundamental fazer-se uso de clareza e de objetividade em sua elaboração, a fim de que erros de interpretação e ambigüidades sejam cometidos. Finalmente, esses documentos devem ser concebidos de forma a conter campos nos quais serão feitos registros de situações especiais nas quais estejam compreendidas inclusive, eventuais irregularidades ocorridas durante o transcorrer da coleta.

Ao proceder-se à elaboração de um ICV é preciso estar ciente de que em termos práticos, será impossível considerar todos os aspectos ambientais contidos em um sistema de produto. Assim sendo, deve-se providenciar a *elaboração de critérios de exclusão de aspectos ambientais* visando o refinamento dos mesmos.

Os critérios utilizados na exclusão de aspectos ambientais podem ser de duas naturezas: quantitativos ou de relevância ambiental. Segundo o critério quantitativo devem ser excluídas do sistema correntes de matéria ou energia, cuja contribuição para a massa ou energia total que entra (ou sai) no sistema seja inferior a uma determinada percentagem. Muito embora influenciados pelos objetivos da ACV, os valores usuais adotados em geral para esse procedimento costumam ser 1,0%, 2,5% e 5,0% (SONNEMANN, 2002).

Ainda que o critério quantitativo traga como benefício a economia de tempo e de investimentos, sua aplicação pode resultar na desconsideração de aspectos que se revertam em impactos significativos sobre o meio ambiente. O desconhecimento de tal particularidade, pode acarretar na distorção dos resultados de uma ACV, a ponto das conclusões deles decorrentes virem a invalidar futuros processos de tomada de decisão. Para que isso possa ser evitado, recomenda-se que a equipe encarregada da realização do estudo lance mão de um segundo critério de exclusão, o qual permite deliberar sobre os efeitos provocados em particular, pela disposição dos rejeitos de um sistema de produto sobre seu entorno.

Esse critério, denominado de *relevância ambiental*, faz com que a seleção de aspectos ambientais esteja baseada em uma análise de sensibilidade, o que se reverte em ganho de confiabilidade para o estudo. A desvantagem dessa abordagem, reside na necessidade de que um banco de dados de grande porte esteja disponível para fornecer os valores preliminares à execução de tal análise, o que, não obstante os avanços realizados até o momento, ainda não se configura de todo possível.

#### *B) Coleta de dados propriamente dita*

Segundo WENZEL et al (1997), a coleta de dados é a tarefa mais demorada de uma ACV, podendo portanto ser bastante intensiva na demanda de recursos. Esse problema pode ser no entanto minimizado, caso tal procedimento seja conduzido de maneira organizada; assim, a norma ISO 14041 (1998) recomenda o cumprimento das seguintes atividades:

- seleção das fontes de informação
- uso de dados específicos e de dados agregados, e
- substituição, caso necessário, de dados primários.

Um dos problemas da coleta de dados reside na indisponibilidade de *fontes de informações* específicas e confiáveis para a realização do estudo. Segundo WENZEL et al (1997), além dos dados primários que são obtidos de medições diretas no campo, um estudo de ACV é completado, na quase totalidade dos casos, por dados secundários. Para esses autores, os dados secundários podem ser obtidos junto a três fontes principais de informação: bancos de dados eletrônicos próprios para ACV, valores de literatura e dados fornecidos por terceiros, tais como empresas, órgãos do governo, associações de classe, laboratórios de análise, entre outros.

Dentre as fontes mencionadas, devem merecer especial referência os bancos de dados. Considerando-se o fato da ACV ser uma técnica recente, a elaboração de bancos de dados regionalizados para recursos comuns de diversos sistemas – caso da energia elétrica, de combustíveis fósseis, de aço e de alumínio, de celulose e papel, de polímeros de maneira geral, do cimento e de outros materiais – começou a ser realizada apenas recentemente nos países desenvolvidos.

De acordo com SILVA (2002), iniciativas dessa natureza são ainda bastante superficiais no caso do Brasil, fato que, segundo esse autor tem dificultado em muito a realização de estudos de ACV para as condições nacionais. Tendo em vista certas peculiaridades do país – como por exemplo uma notória predominância de energia de origem hidrelétrica, ou a supremacia do transporte de insumos e de bens por meio da via rodoviária – a utilização de bancos de dados internacionais pode prejudicar as conclusões obtidas para estudos realizados com produtos fabricados no país. Não obstante, esse mesmo autor enfatiza que a realização de trabalhos como esses, ainda que com as limitações antes descritas, é amplamente mais recomendável do que a omissão quanto à aplicação da referida metodologia. SILVA conclui seu raciocínio reforçando o ponto de vista de muitos outros pesquisadores, de que a construção de bancos de dados genuinamente brasileiros faria da ACV um instrumento bastante efetivo para a introdução definitiva da variável ambiental no processo gerencial de tomada de decisão da indústria nacional.

Mais de uma vez no corpo desse mesmo documento, procurou-se chamar a atenção para o caráter iterativo existente entre as etapas que compõem a metodologia de ACV. Para a coleta de dados essa realidade não é diferente, já que esse mesmo procedimento acaba sofrendo influência direta da definição dos objetivos do estudo.

Como regra geral, em situações onde a realização de uma ACV se destina a fornecer elementos para decisões estratégicas de uma organização - como nos casos de projeto de novos produtos ou "reprojeto" de processos existentes – a norma ISO 14041 (1998) recomenda o uso de dados específicos do sistema, no intuito de formar um panorama mais representativo do mesmo.

Por outro lado, quando essa técnica é aplicada a trabalhos voltados ao mercado consumidor ou a organismos ambientais, costumam se utilizados os chamados *dados agregados*; ou seja, valores consolidados de correntes de matéria e energia de um sistema, usados em substituição a informações específicas que estejam indisponíveis, ou mesmo, que sejam pouco confiáveis.

Como relatado em UNESCO (1995), o uso de dados agregados faz com que os resultados de uma ACV possam ser disponibilizados para o público em geral sem no entanto revelar segredos de produção ou aspectos vulneráveis de processo. A mesma fonte recomenda, no entanto, a realização de uma análise crítica dessas informações previamente a sua incorporação no estudo, a fim de preservar aspectos importantes desse último, tais como transparência, consistência e integridade.

Em situações nas quais os dados primários não podem ser coletados, a equipe de execução do estudo deve lançar mão de dados secundários para complementar o ICV do sistema de produto. Nessas situações, a norma ISO 14041 (1998) sugere os seguintes procedimentos na ordem em que estas são apresentadas:

- incluir valores calculados, coletados junto a processos que demonstrem semelhanças tecnológicas com o sistema em estudo, não sem antes realizar uma análise crítica dos mesmos,
- incluir valores consistentes, extraídos de literatura (passando-se portanto a considerar como substituto um dado secundário),
- atribuir à corrente a ser quantificada o valor "zero", seguindo-se a isso, o registro de uma justificativa formal e técnica para tal ação e

- estimar o dado por meio de balanços de massa e energia realizados dentro da unidade de processo. Nesse caso, as premissas feitas para realização dos balanços devem ser documentadas e cuidadosamente fundamentadas por meio de conhecimentos técnico-científicos pertinentes.

O procedimento para a coleta de dados pode eventualmente variar em função dos objetivos da ACV, ou mesmo das características do sistema de produto; no entanto, em qualquer situação é fundamental que seja procedido o registro de todas as informações, fontes e hipóteses admitidas. Ao final da etapa de coleta de dados, a equipe de realização da ACV deve dispor de tantas planilhas de aspectos ambientais quantificados, quantas unidades de processos fizerem parte do sistema de produto. Os valores das correntes de entrada e saída constantes de cada planilha deverão ser calculados por meio de balanços materiais e energéticos, tomando-se como base de cálculo as unidades de referência próprias de cada unidade de processo.

### *C) Realização do tratamento dos dados*

Após a coleta, tem início o processo de tratamento de dados. Buscando obter máximas eficiências também no cumprimento de tal atividade, a norma ISO 14041 (1998) recomenda a realização dos seguintes passos:

- normalização dos valores à unidade funcional do sistema de produto,
- aplicação dos critérios de alocação e
- validação dos dados.

Como mencionado ao término do tópico anterior, o procedimento de coleta gera uma planilha de dados individualizada para cada unidade de processo.

Essa forma de apresentação é no entanto, pouco conclusiva para os objetivos do estudo, por dificultar a inter-relação dos consumos de recursos e das gerações de rejeito ocorridas no sistema, com o total de produto dele obtido.

A fim de corrigir tal distorção e de possibilitar uma adequada avaliação de impactos, essas quantidades devem ser *normalizadas à unidade funcional do sistema de produto* estabelecida anteriormente durante a etapa de definição de escopo.

O processo de normalização de dados é realizado em duas etapas: na primeira etapa, todos os aspectos ambientais quantificados para cada unidade de processo são convertidos a uma base de cálculo unitária.

A referida transformação é levada a cabo dividindo-se as quantidades das correntes de matéria e de energia que caracterizam certa unidade de processo, pelo valor de qualquer das correntes de produto geradas por essa última, que participe direta ou indiretamente da manufatura propriamente dita do produto sob avaliação.

Na segunda etapa do processo de normalização são calculados os chamados *fatores de conversão ao fluxo de referência*, os quais determinam a relação entre a UF estabelecida para o estudo e as quantidades das correntes de produto geradas em cada unidade de processo. A normalização à UF é completada multiplicando-se o valor do aspecto ambiental ajustado à base de cálculo unitária de cada unidade de processo pelo fator de conversão à UF a ela associado. Concluída a normalização os dados obtidos são agrupados na forma de uma tabela única, a qual é denominada de *Tabela de Valores Convertidos à UF*.

Segundo FAVA et al. (1991) por ocasião da normalização de valores deve ser dispensada especial atenção aos dados agregados. Esses autores recomendam que em casos como esse, o procedimento de conversão à UF seja posterior a uma análise na qual se busca determinar se o grau de agregação dos dados é capaz de satisfazer os objetivos e o escopo a que o estudo se propõe. FAVA et al. (1991) apontam por fim, que se o procedimento empregado para a agregação de dados necessitar de regras específicas, eventualmente mais detalhadas, estas últimas deverão ser previstas e justificadas durante a definição do escopo do sistema, ou alternativamente durante a avaliação de impacto.

Aspectos relacionados às matérias-primas, às tecnologias de processamento e em certos casos, até mesmo às condições de operação podem levar determinado processo de transformação a gerar mais de um produto. Aliando-se esse fato ao esforço crescente da comunidade científica em obter materiais de valor agregado a partir de rejeitos de outros sistemas produtivos, é possível compreender o porquê da alocação entre produtos torna-se cada vez mais freqüente em estudos de ACV.

Muito embora apontada em muitos manuais como uma prática necessária, a alocação é vista com respeito por parte da comunidade científica, a ponto de alguns pesquisadores sugerirem que a definição das fronteiras do sistema seja estudada de forma a evitar situações onde essa prática tenha que ser empregada. De qualquer forma, em situações onde seu uso seja eminente, a seleção e a aplicação dos critérios de alocação deve ser conduzida de maneira cuidadosa, onde cada caso precisa ser considerado em separado. Segundo GUINÉE (1993) o fato de não existir consenso em torno de um critério universal de alocação faz com que a escolha do mesmo seja definida em função do contexto em que o estudo se realiza.

A última atividade prevista no tratamento de dados é a validação. Nessa ação estão envolvidos procedimentos de verificação, tais como balanços materiais e de energia, ou mesmo análises comparativas, todos com o intuito de detectar ainda nas fases iniciais da ACV eventuais distorções presentes até então. A validação serve também para determinar medidas a serem tomadas diante da suposta ausência de um dado desejado (ISO 14041, 1998).

Ao final do tratamento dos dados, a equipe designada para a realização do estudo estará de posse de uma planilha conhecida entre os praticantes da ACV como *Tabela Consolidada de Valores*.

#### *D) Refinamento do sistema de produto*

À medida que um ICV se desenvolve, maior nível de conhecimento sobre o objeto de análise vai sendo adquirido por seus executores. Diante desse fato, a norma ISO 14041 (1998) recomenda que periodicamente o sistema de produto seja revisto, à luz da identificação de pontos que careçam de aprimoramento. Esse refinamento é realizado por meio de análises de sensibilidade as quais buscam avaliar a pertinência de:

- exclusão de unidades de processo ou mesmo de etapas do ciclo de vida do produto que não sejam significantes,
- exclusão de aspectos ambientais pouco relevantes para resultado final e
- inclusão de outros processos, ou mesmo aspectos, que por ventura passem a ser julgados relevantes para o estudo.

A elaboração de um inventário de ciclo de vida é precedida sempre da fixação de premissas, definidas a partir dos objetivos e do escopo a que a ACV se propõe. Assim sendo, quaisquer conclusões originadas da elaboração do ICV só poderão ser estendidas a outros casos de aplicação – ainda que os mesmos tratem de produtos equivalentes – caso critérios objetivos de comparação forem submetidos a ambos os sistemas (ISO 14041, 1997). Tratamento semelhante será dispensado se modificações profundas o suficiente para descharacterizar o ciclo de vida em estudo no que se refere ao seu escopo original vierem a ocorrer.

#### **IV.1.4.3. Avaliação de Impactos Ambientais**

A Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida (AICV) corresponde à terceira etapa da metodologia de ACV. As muitas recomendações e procedimentos técnicos inerentes à sua realização encontram-se descritos na norma ISO 14042 (2000), e cujo conteúdo será futuramente complementado por exemplos de aplicação constantes da norma ISO 14047. Esta última, por sua vez, encontra-se hoje na fase de elaboração de “Relatório Técnico”.

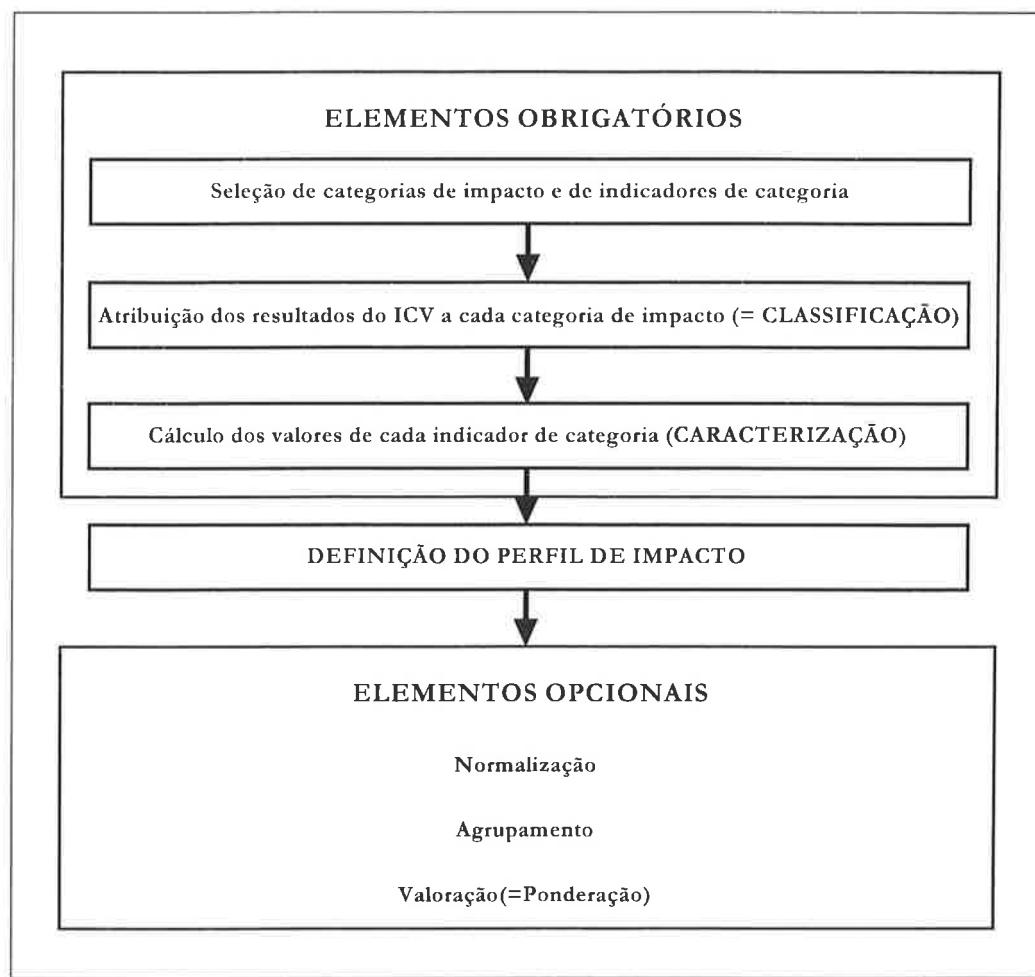
A AICV tem na avaliação dos impactos causados pelos aspectos ambientais relacionados na etapa de ICV seu principal objetivo. Além disso, essa etapa presta-se também a fornecer informações à etapa da metodologia denominada Interpretação que a ela se segue. Atuando em conjunto com os demais componentes da ACV, a avaliação de impactos permite a elaboração de um quadro preciso do desempenho ambiental do sistema de produto sob avaliação. Para tanto, a AICV lança mão das chamadas categorias de impacto, que representam em termos conceituais, as classes de problemas ambientais relevantes que podem ser provocados, ou eventualmente até agravados, pelos aspectos ambientais do sistema em estudo.

Ao término da AICV o praticante deverá dispor de um *Perfil de Impactos Ambientais* do sistema de produto, no qual se farão representar as contribuições por ele impostas para diversas categorias de impacto. Dependendo dos objetivos a que a ACV se destina, o desempenho do ciclo de vida sob avaliação poderá ser também representado por um indicador único.

Em termos de estrutura, a AICV é composta por duas classes de elementos: *obrigatórios* e *opcionais*. Os elementos obrigatórios referem-se aos procedimentos de *classificação* e de *caracterização* de aspectos ambientais, por meio dos quais serão calculados os indicadores de impacto de cada categoria.

Os chamados elementos opcionais ocupam-se, por sua vez, da normalização, do agrupamento e da valoração desses indicadores. A Figura IV.2. traz um panorama geral da estrutura de execução da AICV, no qual aparecem evidenciadas as inter-relações entre os elementos obrigatórios e opcionais.

Segue-se a essa exposição introdutória uma descrição resumida de cada um dos elementos que constituem a AICV.



**Figura IV.2. Elementos obrigatórios e facultativos da Avaliação de Impactos**  
Fonte: ISO/TR 14047 (2000)

#### *A) Elementos obrigatórios*

- *Classificação:* procedimento por meio do qual efetua-se o relacionamento qualitativo dos aspectos ambientais quantificados durante a elaboração do ICV do sistema de produto, às categorias de impacto para as quais estes exercem qualquer contribuição. A norma ISO 14042 (2000) destaca o fato de determinados aspectos ambientais poderem contribuir para mais de uma categoria simultaneamente; por conta disso, essa norma recomenda que os a equipe encarregada da execução do estudo dispense atenção especial à classificação de aspectos, a fim de evitar possíveis equívocos ao longo do desenvolvimento da etapa de Avaliação de Impactos.
- *Caracterização:* cada impacto ambiental é representado algebricamente por um *Indicador de Categoria*. Assim sendo, o processo de caracterização consistirá da conversão das quantidades dos aspectos ambientais atribuídos a cada impacto, á substância, ou base de referência, usada para representar seu respectivo Indicador. Para essa operação são empregados os chamados *Fatores de Equivalência*. Os Fatores de Equivalência são índices por meio dos quais é possível estimar a contribuição de cada aspecto ambiental para os impactos aos quais este se encontra associado. Os valores obtidos pela multiplicação dos fatores de equivalência pelas quantidades de aspectos ambientais a eles associados podem ser somadas, totalizando um indicador único, o qual representa a contribuição do sistema de produto em estudo para a referida classe de problemas ambientais. O conjunto de indicadores de impacto constitui o chamado Perfil Ambiental do sistema em estudo.

#### *B) Elementos opcionais*

- *Normalização:* em muitas situações os resultados expressos por meio do Perfil Ambiental do produto são de difícil interpretação, já que os impactos que o constituem estão calculados em unidades diferentes. Para contornar essa dificuldade, faz-se uso do procedimento da normalização, por meio do qual é realizada a conversão de todos os indicadores de categoria a uma única base de referência.

Em termos práticos, a normalização é realizada dividindo-se os valores dos indicadores de impacto por uma base comum. Dessa operação se originam os chamados indicadores normalizados, cujo agrupamento irá constituir, por sua vez um *Perfil Normalizado de Valores*. A elaboração do referido perfil auxilia, entre outras funções, na hierarquização de ações de melhoria de desempenho ambiental do sistema de produto em estudo, etapa das mais importantes de qualquer processo gerencial de tomada de decisão. Por outro lado, por apresentarem mesma unidade, os indicadores normalizados podem também ser somados para constituir o *Indicador Único de Impacto Ambiental* do produto.

- *Agrupamento*: o agrupamento nada mais é que a ordenação das categorias de impacto. De acordo com a norma ISO 14042 (2000), o agrupamento pode ser conduzido, organizando-se as categorias de impacto de acordo com seu *tipo* – situação em que estas podem ser classificadas em *Efeitos sobre o Meio Físico*, *Efeitos sobre o Meio Biótico*, *Consumo de Recursos não-renováveis* entre outras – ou segundo uma *ordem de importância*, caso que depreende o uso de certo grau de juízo de valores. Assim como no caso da normalização, o agrupamento é também um recurso bastante útil em processos de tomada de decisão que sejam decorrentes da realização de estudos de ACV.
- *Valoração (ou ponderação)*: realizada na grande maioria dos casos por equipes multidisciplinares, a valoração consiste da atribuição de *pesos* às categorias de impacto que formam o Perfil Ambiental do produto segundo seu grau de importância. Além disso, quando associado à normalização o procedimento de valoração torna-se bastante útil no sentido de atribuir maior representatividade ao indicador único de impacto ambiental do produto.

Pelo conteúdo antes apresentado, pode-se depreender que os elementos ditos opcionais que compõem a etapa de Avaliação de Impactos da metodologia de ACV são de grande valia para processos gerenciais de tomada de decisão.

Por conta disso, é de fundamental importância que a aplicação de quaisquer desses procedimentos se encontre em consonância com os objetivos e o escopo a que o estudo se propõe.

#### **IV.1.4.4. Interpretação**

Os principais objetivos a que se propõe a etapa de interpretação da ACV são respectivamente combinar, resumir e discutir os resultados obtidos em um estudo dessa natureza, no intuito de gerar subsídios para conclusões e recomendações que sejam capazes de satisfazer os objetivos propostos para o mesmo. Além destes, será também função da interpretação, organizar a apresentação dos resultados na forma de um relatório claro, objetivo e consistente (ISO, 2000b).

A interpretação de uma ACV demanda três tipos de informação: os resultados das etapas anteriores de elaboração do ICV e de realização da AICV; um relato das premissas que balizaram o estudo, dentre as quais se encontram critérios empregados no estabelecimento de fronteiras, na alocação de cargas ambientais, na definição das categorias de impacto e na admissão de juízo de valor; e finalmente, uma relação de todas as partes envolvidas na execução da ACV, bem como um registro que descreva seus interesses e obrigações para com esse empreendimento.

Segundo a norma ISO 14043 (ISO, 2000b), o procedimento de interpretação de um estudo de ACV é composto essencialmente por três elementos:

- identificação de temas de relevância,
- avaliação dos resultados do estudo, geração de conclusões e proposição de recomendação e
- elaboração de relatório

Considerando-se que os resultados obtidos pelo ICV e pela AICV corroboram os objetivos e o escopo estabelecidos para a ACV, passa-se então à identificação dos *temas de maior relevância* do estudo. Assim como apresentado na norma ISO 14043 (ISO, 2000b) esses temas podem corresponder a aspectos ambientais contidos no inventário, a uma ou mais categorias de impacto, ou mesmo a quaisquer processos, operações unitárias ou atividades que se desenvolvam dentro do sistema de produto.

Segue-se à identificação de temas de relevância para o estudo, uma avaliação por meio da qual será determinada a confiabilidade dos resultados obtidos, que deve, por sua vez, ser apresentada ao cliente de maneira clara e compreensível. Para tanto, a norma ISO 14043 (ISO, 2000b) recomenda que sejam efetuadas:

- *análise de completeza*: por meio da qual busca-se verificar se os dados e informações relevantes gerados pela ACV encontram-se disponíveis e completos. O resultado de uma análise de completeza pode levar à adição de comentários extras ao relatório final do estudo, ou mesmo à revisão completa das etapas de ICV e de AICV, respectivamente;
- *análise de sensibilidade*: que busca determinar o grau de confiabilidade dos resultados e das conclusões obtidos pelo estudo. Pela análise de sensibilidade pode-se também avaliar o quanto esses mesmos resultados poderão vir a ser afetados por focos potenciais de deficiência do estudo, tais como a qualidade dos dados empregados, a definição dos critérios de alocação de aspectos ambientais, a seleção de modelo de avaliação de impactos, entre outros. Uma análise de sensibilidade deverá também levar em conta possíveis hipóteses e simplificações realizadas durante a etapa de definições, além dos resultados obtidos por outras análises de sensibilidade realizadas respectivamente ao longo do cumprimento das etapas de ICV e de AICV. Além disso, são de grande importância nessa etapa do estudo a opinião de especialistas no tema objeto do estudo, ou ainda, o relato de experiências semelhantes ocorridas anteriormente e
- *análise de consistência*: que se preocupa em avaliar a consistência das hipóteses, dos métodos e das informações empregadas na realização do estudo, com relação às premissas iniciais estabelecidas para o mesmo. Por meio da realização de uma análise de consistência é possível avaliar se há diferença na qualidade de dados entre etapas da ACV; se, e como, variáveis temporais e espaciais foram consideradas; se a metodologia de avaliação de impactos atende aos objetivos pré-estabelecidos para o estudo, além de outros aspectos de ordem prática, inerentes à execução do trabalho.

Os dois elementos seguintes da etapa de interpretação de uma ACV consistem do estabelecimento das *conclusões e recomendações* e da elaboração do *relatório final* do estudo. Segundo a norma ISO 14043 (ISO, 2000b), o atendimento desses requisitos é realizado seguindo-se algumas recomendações, tais como:

- as *conclusões do estudo* devem ser estabelecidas de modo iterativo com os demais elementos levados em conta durante a etapa de interpretação, além de basearem-se sempre nas premissas fixadas na etapa de definições;
- nos casos onde assim couber, *tecer comentários e fazer recomendações* que auxiliem os tomadores de decisão quanto ao manuseio dos resultados da ACV. Esses aportes devem, sempre que possível, estar baseados nos resultados do estudo, refletindo assim consequências lógicas e razoáveis desse último, e
- uma vez que já se tenha dado por terminado o estudo, os resultados dele decorrentes devem ser reportados com a devida brevidade ao cliente. Por conta disso, um relatório que contenha itens tidos como essenciais para a realização da ACV deve ser providenciado. Nesse contexto, os moldes e quaisquer premissas inerentes à elaboração do referido relatório precisam também ser previstas durante as etapas iniciais de definições.

A título de observação final, consta da norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001) que logo após a conclusão de uma ACV deve ser promovida uma *Análise Crítica* da mesma. Por meio de análise crítica pretende-se aferir o grau de atendimento do estudo quanto às normas que dispõem sobre o desenvolvimento da referida metodologia. Ainda segundo a mesma fonte, recomenda-se que tanto a equipe encarregada da realização de um estudo de ACV, quanto os métodos empregados em sua operacionalização, sejam definidos com a devida brevidade, fundamentalmente no que se refere aos objetivos, necessidades e prazos para o desenvolvimento das etapas da metodologia.

## **IV. 2. FERTILIZANTES FOSFATADOS**

O fósforo encontra-se na natureza na forma de depósitos minerais fosfatados de origens ígnea, sedimentares ou biogenéticas. Os chamados depósitos ígneos ou magmáticos, são normalmente pobres em sílica, possuem textura simples e contêm rochas associadas do tipo carbonatitos e ultrabásicas. Em termos mundiais, suas reservas apresentam maior incidência em países como Rússia, Finlândia, Brasil e África do Sul (CEKINSKI, 1990).

Os fosfatos de origem sedimentar possuem, por sua parte, história geológica complexa e variada, podendo ser detriticos, precipitados químicos ou conter ainda significativas quantidades de minerais orgânicos fósseis. Quanto à textura, estes podem ser divididos em rochas consolidadas e rochas não consolidadas. As rochas consolidadas apresentam cimentação por sílica, carbonatos ou óxidos de ferro e alumínio, ao passo que rochas não consolidadas, foram originadas provavelmente a partir de processos secundários como re-ordenação, lixiviação, intemperização e enriquecimento natural. Os fosfatos sedimentares são em muitos casos oferecidos no mercado de fertilizantes como fosfatos naturais para uso direto na agricultura, dado o elevado poder de reatividade com o sistema do solo por eles apresentado. Quanto à distribuição, as reservas de fosfatos sedimentares localizam-se preferencialmente nos Estados Unidos, sudeste do México, Marrocos, noroeste do Saara e Oriente Médio.

Muito embora apresentando características geológicas distintas, os fosfatos de origens ígnea e sedimentar são explorados economicamente tanto para a produção de fertilizantes quanto pela indústria do fósforo e de seus derivados. Para essas funções, independentemente da conformação de sua estrutura cristalina, tais recursos minerais passam a ser denominados genericamente de fosfatos naturais ou mesmo de rochas fosfatadas (SOUZA, 2002).

O acúmulo dos dejetos das aves, associados ao produto da degradação de seus esqueletos, constituem importantes depósitos fosfáticos denominados biogenéticos ou simplesmente guanos. Esse material pode ser incorporado diretamente aos adubos nos quais pretende-se que sejam obtidas misturas contendo além do fósforo, também fontes de nitrogênio e de matéria orgânica.

A pequena expressão de suas reservas, concentradas apenas em algumas ilhas oceânicas e certas regiões do Peru, faz com que o guano seja capaz de atender apenas a uma parcela pouco representativa do mercado (LEHR, 1980).

A maioria das rochas fosfatadas de todo o mundo pertence ao chamado grupo das apatitas, um mineral disponível na natureza segundo uma forma não assimilável pelos vegetais. A apatita, também conhecida como francolita ou fosforita, apresenta composição química genérica  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{X}_2$ , onde a posição "X" pode ser ocupada tanto por compostos halogenados como flúor ou cloro, quanto por radicais oxidrila.

No que se refere às suas propriedades físicas, a apatita apresenta cristalografia hexagonal, clivagem imperfeita, brilho vítreo subresinoso, dureza 5,0 na escala Mohs e densidade relativa da ordem de 3,2g/cm<sup>3</sup>. A composição média aproximada da apatita apresenta 41,8% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 55% de óxido de cálcio (CaO), 1,2% de fluor (F), 2,3% de cloro (Cl) e 0,6% de H<sub>2</sub>O (ZANARDO, 2000).

Como relatado por GREMILLION & McCLELLAN (1980), muito embora a apatita apresente variações em sua rede cristalina, provenientes na maioria dos casos de substituições isomórficas, a fluorapatita –  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$  – é normalmente aceita como principal componente desse fosfato mineral.

Dados publicados pelo jornal GAZETA MERCANTIL em junho-2001, dão conta que as reservas brasileiras de apatita cresceram cerca de 40%, no período entre compreendido 1988 e 2000, alcançando, segundo estimativas feitas recentemente, a expressiva marca de 4,0 bilhões de toneladas. De acordo com a mesma fonte, tal resultado pode ser imputado essencialmente aos esforços e investimentos realizados pelas empresas nacionais do setor de fertilizantes.

Essa condição colocou o país na 7º posição entre os produtores mundiais de rocha fosfática em 2001, com uma participação efetiva de 4,8 milhões de toneladas, que equivalem a 3,8% do mercado internacional (ANDA, 2003).

SOUZA (2002) relata que cerca de 96% do total de rocha lavrada entre 1988 e 2000 foi destinado à produção de fertilizantes, sendo o restante distribuído entre a produção de suplemento usado para alimentação animal, a aplicação direta no solo e a manufatura de produtos da já mencionada indústria do fósforo.

Graças à estrutura geológica de seus solos, o chamado *patrimônio fosfático brasileiro* é composto predominantemente por rochas de origem ígnea. No que se refere à distribuição geográfica, estas se concentram principalmente nos complexos de Araxá e Tapira no Estado de Minas Gerais, que detêm juntas 73,8% das reservas totais do país. Seguem-se a eles as minas de Catalão e Ouvidor (GO) – que perfazem 8,3% da demanda nacional – e Jacupiranga (SP) com 7,3%. Respondem pelos 10,6% restantes, os depósitos sedimentares localizados nos municípios de Paulista (PE), Lagamar (MG) e na ilha de Fernando de Noronha.

Para fins comerciais, convenciona-se que o teor de fósforo de matérias-primas e produtos deva ser medido em termos do percentual de pentóxido de fósforo –  $P_2O_5$  – apresentado pelos mesmos. Baseado nesse fato, KAMINSKI (1997) constata que o conteúdo ponderado de fósforo do mineral apatítico extraído no Brasil – da ordem de 10,2% – está bastante aquém do valor médio mundial, que supera os 17%  $P_2O_5$ . Na opinião do mesmo autor entretanto, essa limitação é amplamente compensada pelo volume de rocha fosfática disponível para exploração no país.

Tal como relatado por CEKINSKI (1990), quando dele se fizer necessário, o processo de concentração da rocha fosfática é realizado com o intuito único de gerar concentrados fosfáticos com teor de fósforo compatíveis com os processamentos que serão levados a cabo ao longo da produção de fertilizantes.

De acordo com levantamentos realizados por SOUZA (2002), estima-se que em 2001 tenham sido produzidas em todo o mundo mais de 128 milhões de toneladas de concentrado de rocha fosfática. O primeiro lugar dentre os produtores mundiais desse bem primário ficou com os Estados Unidos que alcançaram uma produção de 34,2 milhões de toneladas. Nesse mesmo contexto, seguiram-se aos norte-americanos o Marrocos (22 milhões), a China (20 milhões) e a Rússia (10,5 milhões).

SOUZA relata também que o desempenho do parque industrial brasileiro – da ordem de 4,8 milhões de toneladas de concentrado fosfático – correspondeu às previsões dos especialistas do setor; muito embora revelando uma clara tendência de crescimento, esse resultado não foi, ainda dessa vez, suficiente para desobrigar o país de recorrer à importação para suprir sua demanda interna.

De qualquer maneira, como decorrência desse fato e de maneira homóloga ao sucedido com a rocha fosfática, esse desempenho alçou o Brasil a ocupar também a 7<sup>a</sup> colocação entre os produtores mundiais dessa matéria-prima.

A produção nacional de concentrado fosfático é dominada atualmente por três empresas: a FOSFÉRTIL/ULTRAFÉRTIL, detentora de 51,9% da oferta interna de insumos fosfatados, a BUNGE FERTILIZANTES – 30,4%, e a COPEBRÁS S.A., cuja participação monta cerca de 13,5%.

Para que o fósforo possa exercer seu papel no crescimento de culturas, a estrutura do concentrado apatítico deve sofrer modificações de forma que a leve a se tornar um composto solúvel na solução edáfica, também conhecida por “*solução da terra*”. Para tanto, foram desenvolvidas pela indústria de fertilizantes fosfatados duas rotas de solubilização: *rota úmida* e *rota térmica*.

A indústria brasileira demonstra clara predileção pela rota úmida; por meio dessa via de processamento são gerados aproximadamente 97% de toda a produção anual de fertilizantes fosfatados do país a cada ano. Em termos qualitativos, a rota úmida comprehende uma ampla gama de produtos, dentre os quais merecem destaque o Superfosfato Simples – SSP, o Superfosfato Triplo – TSP e os Fosfatos de Mono e Diamônio (MAP e DAP, respectivamente).

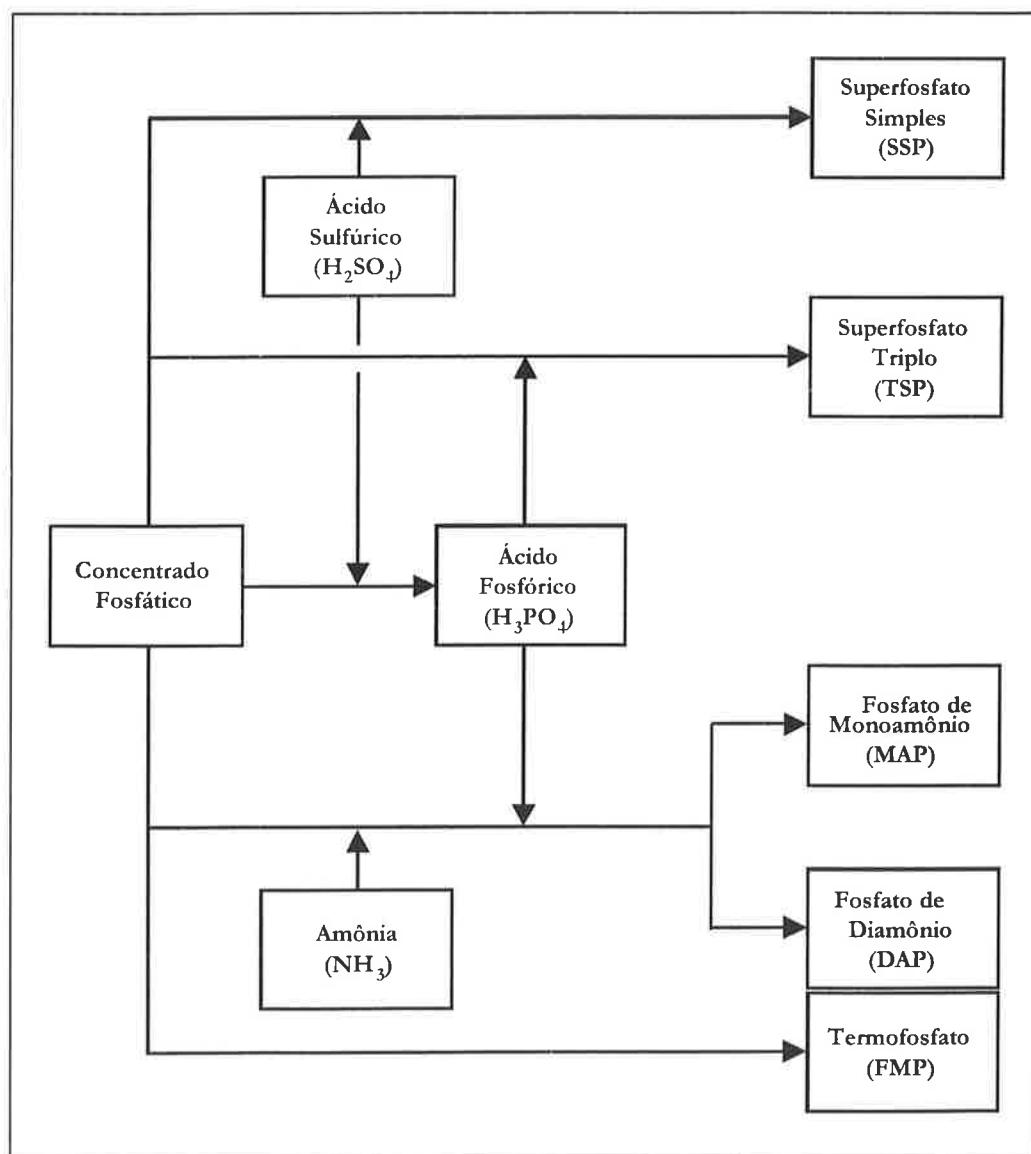
Os processos compreendidos pela rota úmida caracterizam-se pela digestão do concentrado de apatita por um ácido mineral, sendo regularmente empregados o ácido sulfúrico -  $H_2SO_4$  e o ácido fosfórico -  $H_3PO_4$ .

Os processos que compõem a rota térmica – também chamada de rota seca – valem-se, por sua parte, de energia na forma de calor para transformar a estrutura da apatita. No Brasil, o único produto atualmente manufaturado em escala industrial é o Termofosfato Magnesiano Fundido - FMP. A Figura IV.3. traz uma representação esquemática das várias alternativas de processo praticadas pelas indústrias brasileiras para a manufatura de fertilizantes fosfatados pelas vias úmida e seca.

Mesmo dispondendo de outras opções, o modelo brasileiro para a produção de fertilizantes fosfatados pela via úmida, está calcado no uso de  $H_2SO_4$  como agente de solubilização do fósforo (SILVA, 1982; LOBO & SILVA, 1984; FERREIRA, 2001).

Por conta disso, o Brasil vem se mantendo, há pelo menos cinco anos, como sétimo maior produtor mundial deste insumo. Segundo estatísticas publicadas em ANDA (2003), as plantas brasileiras produziram em 2002 uma quantidade pouco inferior a 5,4 milhões de toneladas, as quais corresponderam naquela ocasião, a cerca de 3,4% do volume total de ácido sulfúrico produzido em todo o mundo.

Pelo esquema representado na Figura IV.3. pode-se notar que do ataque direto do concentrado fosfático por ácido sulfúrico serão obtidos respectivamente o SSP e o ácido fosfórico.



**Figura IV. 3. Processos utilizados no Brasil para a produção industrial de fertilizantes fosfatados**

Fonte: SILVA (1998)

Conforme apontado por SILVA (1998), as reservas mundiais de enxofre – S – apresentam esse composto associado ao gás natural, petróleo, sulfetos metálicos não ferrosos de cobre, chumbo, zinco, molibdênio, e pirita – FeS – na forma de elemento nativo nos depósitos em rochas sedimentares deformadas e vizinhas a domos salinos.

Além disso, o enxofre pode ainda provir de depósitos vulcânicos resultantes da sublimação de vapores sulfurosos de origem magnética, de arenitos betuminosos e de sulfatos, como gipsita e anidrita. Finalmente, estima-se que perto de 600 bilhões de toneladas de S encontrem-se disponíveis no carvão, folhelhos pirobetuminosos e xistos ricos em matéria orgânica; no entanto, o uso de tais fontes tem se mostrado antieconômico.

Segundo reportado por TEIXEIRA (2002), as reservas oficiais de enxofre no Brasil, correspondem respectivamente aos sulfetos de cobre, cobalto e níquel de Fortaleza de Minas, e aos sulfetos de zinco de Paracatu e Morro Agudo, todas localidades do Estado de Minas Gerais. Além disso, estima-se em 48 milhões de toneladas a quantidade de enxofre associado a folhelhos pirobetuminosos na Bacia do Paraná e em 3,6 milhões de toneladas o montante de S nativo dos depósitos sedimentares de Sergipe. Esse patrimônio é no entanto muito pouco expressivo dentro do cenário mundial, no qual corresponde a apenas 1,2% do total das reservas.

O mesmo autor reporta ainda que em 2001 foram produzidas no país 384672 toneladas de enxofre. Desse total, a maior participação – 72,8% – ficou por conta do subproduto do processamento de minérios de ouro, cobre e zinco; seguiram-se a essa, respectivamente, extrações realizadas a partir do refino do petróleo – 20,9%, e do folhelho pirobetuminoso – 6,3%.

A quase totalidade do enxofre consumido no país destina-se à fabricação de ácido sulfúrico. No entanto, tendo em vista a limitação do suprimento interno desse insumo, resta ao país como única alternativa ao suprimento de suas necessidades o recurso da importação. Por essa via, o Brasil adquiriu ao longo de 2002, um total de 1526502 t de S, que corresponderam a 87% de seu consumo aparente no período.

A maior parcela de contribuição desse total – da ordem de 92% – ocorreu como *bens primários*, particularmente na forma de enxofre a granel; a parte restante, foi por sua vez introduzida no mercado nacional segundo *compostos químicos* tais como ácido sulfúrico, enxofre sublimado e pirita não ustulada.

Em termos de bens primários as principais fontes fornecimento partiram do Canadá (71,0%) e dos Estados Unidos (10,0%); por outro lado, provieram do Chile (22,0%) e da Alemanha (18,0%) as contribuições mais significativas de compostos químicos.

Outro ácido mineral que tem participação bastante significativa na obtenção de fertilizantes fosfatados é o ácido fosfórico. Essa afirmação está fundamentada no fato de pouco menos de 47% da produção nacional de fertilizantes fosfatados, medida como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, depender necessariamente de sua fabricação (SILVA, 1998).

Como demonstrado antes no esquema que consta da Figura IV.3, o ácido fosfórico é empregado em larga escala como agente de solubilização do concentrado fosfático, processo pelo qual será obtido o superfosfato triplo (TSP); ou ainda, para reagir, em condições controladas, com amônia anidra, formando respectivamente os fosfatos de mono e diamônio (MAP e DAP).

Em 2002, a produção brasileira de ácido fosfórico atingiu as 1,9 milhões de toneladas, valor 3,9% superior àquele alcançado no ano anterior. No entanto, muito embora o consumo aparente tenha apresentado redução de crescimento de 2,1% com relação a 2001, o país viu-se obrigado a importar por volta de 48 mil toneladas desse insumo a fim de atender sua demanda interna nas aplicações mais diversas a que o mesmo se destina (ANDA, 2003).

Quanto à distribuição de mercado para a produção de ácido fosfórico, um quadro algo semelhante àquele apresentado pelo concentrado de rocha pôde ser observado. Em 2001, a FOSFÉRTIL detinha da ordem de 54% da produção nacional desse insumo, sendo seguida pela COPEBRÁS, cuja participação alcançou os 29%, e pela BUNGE FERTILIZANTES com cerca de 17,0%.

SOUZA (2002) imputa a supremacia exercida por essas empresas, tanto para o concentrado fosfático quanto para o ácido fosfórico, ao modelo verticalizado de operação adotado pelas mesmas. Segundo esse conceito, a organização se propõe a gerar os principais recursos necessários ao funcionamento de sua cadeia produtiva ao longo das diversas etapas que a compõem.

Na produção fosfatados em particular, essa abordagem compreende todas as etapas de procesamento, desde a produção do concentrado de rocha até a manufatura de fertilizantes complexos, passando pela fabricação de intermediários e produtos que exerçam papel importante na referida cadeia produtiva tais como o próprio ácido sulfúrico.

Na solubilização pela via seca, a rocha fosfatada é tratada por meio de energia térmica com ou sem a adição de outros materiais. Essa ação busca transformar a estrutura original da apatita por calcinação ou fusão, de maneira que o fósforo nela se apresente segundo uma forma assimilável pelos vegetais denominada genericamente de termofosfato (GUARDANI, 1982).

Muito embora uma gama razoável de termofosfatos possa ser obtida pela via seca, a produção brasileira dessa classe de fertilizantes limita-se apenas ao chamado Termofosfato Magnesiano Fundido (FMP).

Dados coletados junto a ANDA (2002), dão conta que a produção nacional em escala econômica de FMP é praticada apenas pela FERTILIZANTES MITSUI S.A. Ainda segundo a mesma fonte, essa empresa disponibilizou ao mercado interno em 2002, um total de 130149 t de FMP, produção que supera em 28,6% ao resultado alcançado no ano anterior. Deve-se evidenciar, no entanto, que a taxa de contribuição relativa desse produto para o volume total de fertilizantes fosfatados gerado no mesmo período manteve-se dentro da mesma ordem de grandeza daquelas obtidas no decorrer das últimas duas décadas, ao ocupar um patamar ligeiramente superior aos 2% (1,2% como  $P_2O_5$ ).

#### **IV.2.1. Superfosfato triplo (TSP)**

##### **IV.2.1.1. Características do TSP**

Denomina-se superfosfato triplo – TSP – o produto originado da digestão do concentrado fosfático por ácido fosfórico. No entanto, o bem obtido industrialmente apresenta uma composição bastante mais complexa, na qual, quantidades residuais de fosfatos bicálcico e tricálcico, ácido fosfórico e sulfúrico livres, fosfatos de magnésio, ferro e alumínio, pirofosfatos de cálcio e sílica podem ser encontrados.

Segundo MALAVOLTA (1980), duas são as razões capazes de explicar essa grande diversidade de compostos presente no adubo comercial: a elevada presença de impurezas nos insumos utilizados na produção do TSP, e uma eventual ocorrência de reações secundárias que culminem na formação de compostos intermediários. Esse autor observa ainda que alguns desses compostos costumam também reagir entre si, impondo por conta disso, um aumento da taxa residual de fósforo solúvel em água.

Sempre de coloração acinzentada, o TSP pode ser encontrado no mercado nas formas pulverulenta e granular. O produto fabricado no Brasil conta com um teor de fósforo que em alguns casos chega a atingir os 46%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (ANDA, 2002) ao qual se somam de 12 a 14% de cálcio e 2% de enxofre.

De acordo com a legislação estabelecida pela Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária vigente desde 1983, para fins de comercialização o TSP deve fornecer como garantias mínimas 41%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em uma solução aquosa a 2% de citrato neutro de amônio e 37% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em água (BRASIL, 1983).

Dado seu elevado produto de solubilidade em água, o superfosfato triplo é considerado um fertilizante de ação rápida. Para LOPES (1998), essa característica faz dele um produto altamente recomendável tanto para plantas com ciclo curto de cultivo, como leguminosas e hortaliças em geral, como para culturas que cresçam em condições de clima e de solo onde a dissolução de fosfatos naturais é habitualmente difícil.

Ainda no que se refere à sua aplicação, MALAVOLTA (1980) comenta que o uso do TSP em pó traz como vantagem o aumento da superfície de contato entre as partículas de solo e as de adubo. Esse autor recomenda, no entanto, que para cultivos realizados em regiões sujeitas à ação de intempéries, esse seja substituído pela forma granular a fim de que perdas de material por arraste sejam evitadas.

Finalmente, no que se refere à compatibilidade, o TSP permite ser misturado com quaisquer outros fertilizantes, salvo aqueles que possuam caráter essencialmente alcalino tais como cal, calcário, cinzas e outros fosfatos em fusão. Essa propriedade credencia o TSP a ser freqüentemente utilizado no preparo de misturas complexas.

#### IV.2.1.2 Produção de TSP no Brasil

A produção nacional de superfosfato triplo vem sendo sistematicamente reduzida ao longo dos últimos anos, como mostra a compilação de dados realizada para o período compreendido entre 1992 e 2001 e apresentada na Tabela IV.1.

**Tabela IV.1. Dados anuais da produção brasileira de produção de fertilizantes fosfatados e de superfosfato triplo (TSP) entre 1992 e 2002 (\*)**

Ano	Produção de Fertilizantes Fosfatados	Produção de TSP	Contribuição do TSP no total produzido
	(t/ano)	(t/ano)	(%)
1992	3412581	573542	16,8
1993	4090272	525030	12,8
1994	4560746	583058	12,8
1995	4091705	508363	12,4
1996	4315614	519470	12,0
1997	4769960	586220	12,3
1998	4929823	506801	10,3
1999	4979178	488636	9,8
2000	5447941	490129	9,0
2001	5471135	441347	8,1
2002	5697772	358523	6,3

Fonte: Adaptado de ANDA (Anuários: 1992-2002)

(\*): valores expressos em toneladas de produto

Para FERREIRA (2002), eventos ocorridos no setor agrícola como o aumento da adubação na cana-de-açúcar, o crescimento das áreas plantadas de milho, soja e algodão, e a antecipação das aquisições de fertilizantes por parte dos produtores de soja, são capazes de explicar os sucessivos aumentos de produção dos fertilizantes fosfatados no período compreendido entre 1992 e 2002.

A produção de TSP não seguiu, no entanto, as mesmas tendências, sofrendo reduções tanto em termos percentuais, quanto de valor absoluto ao longo do mesmo período. Dentre os fatores capazes de justificar essa depressão de demanda merecem ser destacados:

- a flexibilidade operacional das instalações utilizadas na produção do TSP, que as tornam igualmente disponíveis ao processamento do SSP e
- o elevado custo de fabricação desse produto no país em comparação a seu similar importado (FERREIRA, 2002).

As industrias brasileiras utilizam-se na grande maioria dos casos, do chamado processo contínuo – "*run of pile process*" – para a manufatura de superfosfato triplo. Constituído basicamente por uma correia transportadora que, ao mover-se de maneira contínua, dá vazão à massa reacional proveniente de um misturador, essa instalação presta-se não apenas à produção do TSP como também do superfosfato simples e do fosfato parcialmente acidulado (BRUNO et al., 1985).

Dispondo de tal tecnologia, dezesseis empresas representadas por vinte e uma unidades fabris processaram, ao longo de 1993, um total de 2785872 t SSP. Valendo-se do já mencionado caráter multi-propósito de suas plantas, doze unidades contidas nesse universo, foram também responsáveis pela fabricação no mesmo período de mais 525030 toneladas de superfosfato triplo (ANDA, 1993). Nessa época, apareciam como líderes desse segmento de mercado respectivamente as empresas MANAH, IAP, GALVANI e TREVO.

Forçado a expandir-se para continuar dando suporte ao mercado agrícola, o parque industrial interno viu-se obrigado a passar por sucessivas re-estruturações em um período curto de tempo.

Dessa forma, ao cabo de escassos quatro anos outro panorama de mercado já se fazia notar. Em 1997, a produção de SSP – agora praticada por doze empresas em vinte unidades – alcançava a marca de 3378933 toneladas anuais (um acréscimo de 21,3% com relação ao resultado anterior). Ao mesmo tempo, a manufatura de superfosfato triplo tendeu a estagnação, já que apenas a terça parte dos mesmos grupos dedicou-se à obtenção do produto, gerando um volume de produção que não chegou a alcançar sequer as 590 mil toneladas (ANDA, 1997).

Um novo horizonte balizava também a divisão de mercados nesse período. Estruturadas em termos estratégicos segundo o conceito antes descrito de produção verticalizada, empresas como a FOSFERTIL e a SERRANA unem-se à TREVO e à GALVANI na liderança do mercado.

Atualmente, o mercado apresenta-se ainda mais consolidado em torno dessa realidade. O SSP mantém-se absoluto à frente dos demais fertilizantes fosfatados, apresentando em 2002 um volume de produção próximo às 4,3 milhões de toneladas. Esse resultado, que reflete o esforço de onze empresas representadas por dezenove unidades produtivas, suplanta em 26,4% o desempenho conseguido cinco anos antes.

Por outro lado, a produção de TSP encontra-se definitivamente em declínio. No mesmo período, apenas cinco unidades produtivas de quatro empresas do mesmo parque industrial despenderam tempos de operação de seus processos para a fabricação desse produto, perfazendo um volume de produção algo inferior à casa de 360 mil toneladas (38,8% menor que aquele obtido em 1997) (ANDA, 2003).

O mercado nacional de superfosfatos encontra-se atualmente sob o domínio de quatro empresas, dentre as quais a BUNGE FERTILIZANTES é detentora da maior parcela de participação. Além de manter o controle acionário da SERRANA essa organização adquiriu entre 1997 e 2001 unidades fabris da MANAH localizadas em Cubatão (SP), Rio Grande (RS) e Uberaba (MG).

Simultaneamente, FOSFERTIL e TREVO realizam ampliações da capacidade instalada de suas instalações produtivas e a COPEBRÁS iniciou a operação de uma unidade inteiramente nova, cuja capacidade média anual de produção é de 558000 t, no município de Catalão (GO).

A Tabela IV. 2. mostra como se encontra atualmente a divisão do mercado de produção dos superfosfatos simples e triplo no país. Nesse caso, foram relacionadas as principais empresas que se dedicam a ambas manufaturas, os municípios onde estas atividades são desenvolvidas, o teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> esperado para cada produto final e a capacidade de produção das instalações utilizadas.

A análise realizada até o momento denota uma clara predileção das empresas brasileiras do setor de fertilizantes por fabricar SSP em detrimento do TSP. Essa tendência já tinha sido identificada anteriormente por COUTINHO et al. em um estudo sobre a competitividade da industria nacional de fertilizantes realizado em 1993. Segundo esses autores, a cadeia de produção do TSP começa a ser impactada negativamente desde o início, graças à natureza mineralógica da rocha brasileira marcada pelos baixos teores de fósforo e a elevada quantidade de contaminantes.

**Tabela IV.2. Principais produtores nacionais de superfosfato simples (SSP) e superfosfato triplo (TSP)**

Empresa	Localização	Teor de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)		Capacidade de Produção (t/a)	
		SSP	TSP	SSP	TSP
BUNGE	Araxá (MG)	20,0	-	679000	-
BUNGE	Cubatão (SP)	20,0	-	596000	-
BUNGE	Guará (SP)	20,0	-	342000	-
BUNGE	Rio Grande (RS)	20,0	-	168000	-
BUNGE	Uberaba (MG)	18,0	-	183000	-
COPEBRÁS	Catalão (GO)	18,0	41,0	558000	37000
COPEBRÁS	Cubatão (SP)	18,0	41,0	251000	28000
FOSFERTIL	Uberaba (MG)	18,0	44,5	280000	435000
GALVANI	Paulinia (SP)	18,0	-	675000	-
GALVANI	L. E. Magalhães (BA)	18,0	-	108000	-
ROULIER	Rio Grande (RS)	20,0	42,0	264000	66000
TREVO	Rio Grande (RS)	18,0	42,0	551000	121000
ULTRAFÉRTIL	Catalão (GO)	18,0	-	350000	-

Fonte: (Adaptado de ANDA, 2003)

Por conta desse fato, os custos de exploração e beneficiamento desse insumo incidiam diretamente sobre o preço final do concentrado fosfático, que variava, por sua vez, entre 76,50 e 89,27 US\$/t. Tais valores eram ligeiramente superiores àqueles praticados pelos EUA, que por disporem de reservas mais propícias à exploração, se permitiam colocar nos portos brasileiros um concentrado de rocha com custo variável entre 68,63 e 80,50US\$/t.

Na produção de ácido fosfórico, fase subsequente do mesmo ciclo produtivo, um quadro semelhante também se fazia notar. Ao mesmo tempo em que o valor de venda EXW – referente ao termo “*ex work*”, usado pelo setor de comércio exterior para representar o valor de venda de um produto descontados os custos de transporte interno, aduana ou de capatazia – do produto nacional, à época de 405,00 US\$/t, correspondia a 87,6% de seu valor final de comercialização, o similar importado dos Estados Unidos era introduzido no país a um valor médio de 453,91 US\$/t.

Apesar da significância dos custos de transporte e de despesas aduaneiras que incidiam sobre o produto americano, seu baixo preço de venda na fábrica – da ordem de 293,00 US\$/t – tornava-o competitivo em qualquer entreposto portuário brasileiro.

Em sua análise, COUTINHO et al. (1993) constataram que no transcorrer de sua cadeia de produção, as desvantagens do TSP nacional seguiam se acumulando, já que em qualquer dos portos brasileiros, seu preço final superava o do equivalente importado. Para esses autores, os problemas desse estágio de produção em particular não estavam restritos tão somente àqueles herdados de etapas anteriores da cadeia, consignados nos preços das matérias-primas. Muito embora partindo de menores preços de mercado para concentrado de rocha e para ácido fosfórico, o preço final alcançado para a comercialização do TSP nacional variava de 224,22 a 233,61 US\$/t, ao passo que seu equivalente importado dos EUA podia ser encontrado no mercado interno a um custo médio de 184,51US\$/t. Uma vez mais, COUTINHO et al. (1993) apresentaram como principal fator responsável da grande competitividade do produto estrangeiro, o fato de seu valor de venda EXW, em torno dos 126,00 US\$/t, ser bastante inferior aos US\$ 201,00 por tonelada conseguidos pelas empresas nacionais.

Muito embora mais de uma década tenha transcorrido desde que COUTINHO et al. (1993) elaboraram o diagnóstico da competitividade do setor nacional de fertilizantes, algumas das conclusões decorrentes desse trabalho permanecem válidas até os dias de hoje. Dentre estas, destaca-se a influência do valor de venda EXW do TSP fabricado no Brasil sobre o valor final do produto de mercado.

A Tabela IV.3. traz uma comparação entre os preços EXW praticados no Brasil e no Estados Unidos em 2001, respectivamente para concentrado fosfático, ácido fosfórico e TSP. Como demonstram os valores nela indicados, o concentrado de rocha produzido no Brasil segue apresentando um valor de venda EXW bastante superior ao de similar americano.

Por conta disso, a despeito de todos os esforços realizados nos últimos anos pelo setor no sentido de desenvolver técnicas de beneficiamento apropriadas à rocha nacional, é possível perceber a marcante influência das características geológicas do patrimônio fosfático brasileiro na composição do preço da referida matéria-prima.

**Tabela IV.3. Valor médio de preços de rocha fosfático, ácido fosfórico e superfosfato triplo produzidos no Brasil e nos EUA em 2001**

País	Brasil	Estados Unidos
Material	US\$(EXW)/t	
<b>concentrado fosfático (*)</b>	<b>71,83</b>	<b>47,14</b>
<b>ácido fosfórico (**)</b>	<b>370,41</b>	<b>251,13</b>
<b>superfosfato triplo(**)</b>	<b>171,42</b>	<b>129,45</b>

(\*): o valor de venda do concentrado para os EUA coletado em JASINSKI (2003)

(\*\*): os demais valores que compõem a tabela foram levantados junto a ANDA (2002)

Quanto à produção, o ácido fosfórico nacional apresenta um custo variável 47,5% superior ao de seu equivalente fabricado nos EUA, o que leva esse último a constituir-se em uma opção atrativa ao mercado brasileiro, ainda que despesas com transporte e aduana tenham que ser incluídos em seu valor final de venda.

As sucessivas ampliações da capacidade de produção do parque industrial brasileiro fizeram do TSP nacional um produto bastante mais competitivo do que aquele avaliado por COUTINHO et al. (1993). No entanto, a diferença de preços ainda existente entre este fertilizante e seu similar importado sugere que o processo de produção do TSP como tal, sigue apresentando problemas específicos, relacionados em essência ao nível de atualização dos processos produtivos praticados no país.

A exposição antes realizada permite entender a paulatina retração de oferta de TSP no transcorrer dos últimos anos; para que o cenário da produção industrial de superfosfatos possa ser retratado adequadamente, faz-se necessário justificar ainda o aumento da demanda interna do SSP. Para tanto, um raciocínio igualmente baseado na composição do valor final de venda desse produto, será levado a cabo.

De acordo com dados apresentados por ANDA, o valor médio de venda EXW de uma tonelada de SSP produzida no país em 2002 foi de US\$98,25 ao passo que a mesma quantidade desse produto fabricada nos EUA custa ao seu produtor cerca de US\$86,41.

Como para efeitos de importação deve-se uma vez mais acrescer a esse valor despesas com transportes e taxas alfandegárias, é possível concluir que nesse caso torna-se mais barato suprir a demanda interna com SSP gerado no Brasil.

A relação entre a produção interna de superfosfatos e sua importação pode ser observada também em termos da quantidade de fósforo comercializada por produto. Como o SSP apresenta cerca de 20%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em sua composição, o preço de venda EXW do produto nacional manufaturado atingiu, também no ano de 2002, um total de 491,25 US\$/tP<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, um valor considerado vultoso quando confrontado com os 380,93 US\$/tP<sub>2</sub>O<sub>5</sub> calculados para o TSP, cujo conteúdo de fósforo medido nessa mesma é da ordem de 45%. Em virtude do acima exposto, é possível entender porque as importações brasileiras de SSP em 2001 restringiram-se apenas a 323010 t, (8,1% da oferta total desse produto para o mercado) enquanto que as de TSP montaram 413617 t, volume pouco inferior ao processado pelo setor durante o mesmo período.

#### **IV. 2.2. Cadeia produtiva do TSP**

Um estudo de ACV que se propuser a avaliar os impactos ambientais gerados ao longo das etapas ditas produtivas do ciclo de vida do TSP deverá compreender em seu escopo as seguintes etapas industriais:

- mineração da rocha fosfática;
- beneficiamento da rocha fosfática;
- produção de ácido sulfúrico;
- produção de ácido fosfórico grau fertilizante e
- produção de superfosfato triplo (TSP).

##### **IV.2.2.1. Mineração da rocha fosfática**

A mineração da rocha fosfática, também conhecida por lavra ou desmonte, ocorre a céu aberto e consiste da extração da rocha fosfática do meio natural. No modelo adotado para o presente estudo, o qual está baseado nas práticas exercitadas na mina da BUNGE localizada no Município de Cajati (SP) essa operação é realizada pela explosão de cargas de dinamite adequadamente instaladas ao longo da jazida.

Concluída a extração, a rocha fosfática é transportada em caminhões até a área de britagem. Entende-se por britagem à operação de fragmentação do mineral de apatítico a um diâmetro aparente –  $\Phi_a$  – compatível com os processamentos a que esse material estará sujeito ao longo da cadeia de produção.

Quando realizada em escala econômica, a britagem costuma ocorrer em dois estágios sucessivos, conhecidos respectivamente por britagens primária e secundária. Segue-se a ela uma classificação por dimensão, realizada normalmente por peneira vibratória.

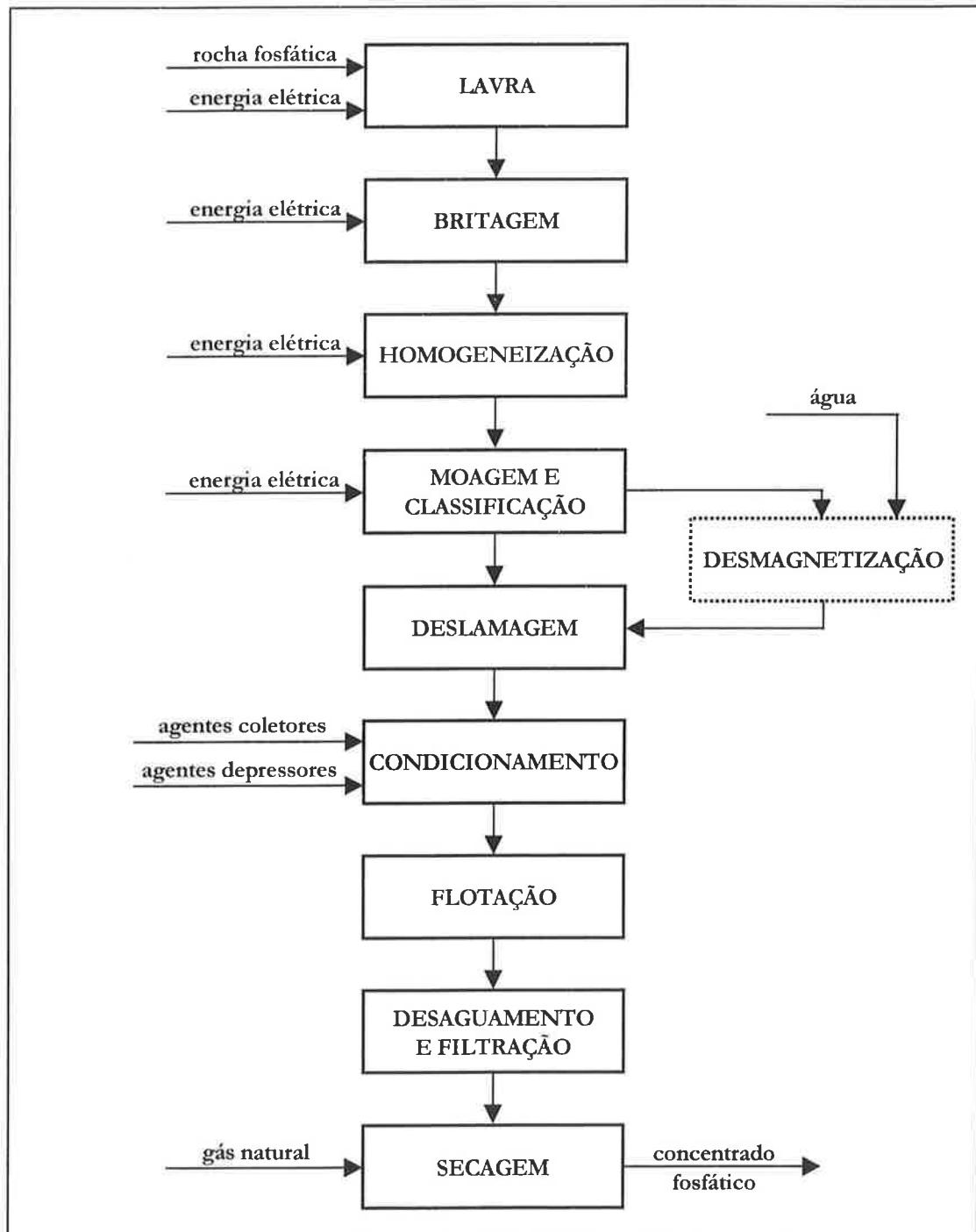
O teor de corte da classificação, o qual deve apresentar  $\Phi_a < 3/4"$ , segue no processo, ao passo que a porção rejeitada retorna à britagem secundária por meio de um circuito fechado composto por correias transportadoras (SILVA, 1994). Como a rocha fosfática caracteriza-se pela falta de uniformidade ao longo da mina, o material de aceite da classificação deve ser homogeneizado a fim de aumentar sua eficiência de conversão em termos de fertilizantes fosfatados. A operação de homogeneização é realizada em um pátio aberto, após o que a rocha fosfática será então conduzida para o beneficiamento.

#### **IV. 2.2.2. Beneficiamento da rocha fosfática**

Para colocar a rocha fosfática em condições de atender às especificações necessárias à fabricação de fertilizantes, esta deve ser previamente concentrada. O processo de concentração, mais conhecido entre os produtores de fertilizantes como beneficiamento, consiste da remoção dos minerais acessórios presentes no mineral de apatita, os quais para o caso da rocha estudada referem-se respectivamente à calcita e à magnetita.

Tendo em vista a relativa variabilidade da composição mineralógica da rocha fosfatada nacional, os processos de beneficiamento praticados regularmente no país compreendem, em geral, as operações de moagem, desmagnetização, deslamagem, condicionamento, flotação, desaguamento, filtração e secagem.

Como produto do beneficiamento obtém-se o chamado concentrado fosfático, cujo teor de fósforo varia entre 32% e 36%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Uma seqüência típica das operações necessárias ao beneficiamento de rocha fosfática aparece representada a seguir no diagrama da Figura IV.4.



**Figura IV.4. Diagrama do processo de produção de concentrado fosfático**  
Fonte: CEKINSKI (1990)

A moagem da rocha é realizada a úmido, normalmente em moinhos de barras. De acordo com SILVA (1998), as dimensões a que o material será reduzido durante tal operação dependem em essência do *grau de liberação* do mesmo. Esse parâmetro, conhecido também como grau de moabilidade, estabelece o percentual de separação entre os grãos de apatita e os dos demais componentes da rocha fosfática. O mesmo autor adverte por fim, que a definição do grau de liberação da rocha está intimamente relacionado ao consumo de energia despendido durante a moagem.

Segue-se à moagem, uma operação denominada de desmagnetização, na qual a magnetita presente na rocha estudada será removida. Segundo ZANARDO (2000), a magnetita pode ser classificada como um óxido mineral do grupo do espinélio, de coloração predominante preto-metálico, clivagem indistinta, densidade relativa  $5,1\text{g/cm}^3$ , dureza variável entre 5,5 e 6,0 na escala Mohs e fórmula química  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . No que se refere à composição, a magnetita é formada essencialmente por óxidos de ferro, dentre os quais aproximadamente 31% são óxidos ferrosos ( $\text{FeO}$ ) e 69% óxidos férricos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

A desmagnetização se inicia pelo transporte do material moído por esteiras rolantes até um tanque de armazenamento, no qual será adicionada água suficiente para formar uma suspensão. A desmagnetização é realizada a úmido, colocando-se a suspensão minério–água em contato com um cilindro imantado que, valendo-se das propriedades magnéticas da magnetita, separa esse mineral dos demais constituintes da rocha. Segue-se à desmagnetização uma operação denominada de deslamagem na qual se processa a separação de partículas de tamanho reduzido – geralmente com diâmetro aparente inferior a  $20\mu\text{m}$  – pela da passagem da suspensão minério–água por hidrociclones (CEKINSKI, 1990).

O estágio seguinte do beneficiamento tem por objetivo separar a apatita dos minerais acessórios ainda presentes na rocha fosfática, dentre os quais, irá merecer especial destaque a calcita.

ZANARDO (2000) descreve a calcita como um mineral pertencente ao grupo isoestrutural dos carbonatos ortorrômbicos, de clivagem perfeita, densidade aparente  $2,7\text{g/cm}^3$ , coloração usual branca, dureza 3,0 na escala Mohs e fórmula química  $\text{CaCO}_3$ .

A composição aproximada da calcita compreende 53% de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), 44% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e 3% de outros constituintes menores. Esse mesmo autor destaca ainda que nas minas brasileiras, a calcita é freqüentemente encontrada em associação com a apatita.

Para realizar a referida separação, faz-se necessário o condicionamento prévio do meio no qual os minerais encontram-se em suspensão. LEAL (1991) descreve o condicionamento como a adição à suspensão minério–água dos chamados agentes coletores e depressores, os quais por agirem modificando as propriedades superficiais do sistema, garantem que a concentração dos compostos de fósforo ocorra com maior grau de eficiência.

O mecanismo usualmente empregado para a separação da apatita é a flotação. Assim, a polpa condicionada é alimentada a baterias de células de flotação, nas quais é introduzido ar atmosférico. Quando realizada em escala industrial, a flotação é efetuada em geral em três estágios consecutivos.

A fração sobrenadamente proveniente da flotação, então bastante concentrada em apatita, é submetida a uma operação de espessamento, de onde será transferida para um filtro a vácuo. Por outro lado, a calcita que deixa o sistema pelo fundo do flotador é enviada a um pátio de estocagem para ser eventualmente comercializada. Na última etapa do beneficiamento, a apatita concentrada é recolhida e encaminhada à um secador rotativo, no qual o teor de água nela contido será ajustado (CEKINSKI, 1990).

#### **IV.2.2.3. Produção de ácido sulfúrico**

As empresas brasileiras voltadas a fertilizantes se utilizam, em sua totalidade, de uma tecnologia de processo denominada dupla absorção – DA para proceder à fabricação em escala econômica de ácido sulfúrico. Um diagrama esquemático, no qual aparecem indicadas as operações relacionadas a tal processo, é apresentado na Figura IV.5.

O processo DA se inicia pela fusão do enxofre elementar por contato indireto em um tanque dotado de serpentina, quando vapor superaquecido de baixa pressão é empregado como fluido de aquecimento.

Concluída essa operação, o material líquido é enviado a um filtro prensa, onde as impurezas nele contidas serão eliminadas. De acordo com KETZIEN (1974), ainda que o S elementar apresente elevado grau de pureza, algumas de suas espécies contaminantes são capazes de comprometer sobremaneira o bom andamento da produção de ácido sulfúrico. Segundo esse autor, a presença de hidrocarbonetos no chamado "*dark sulfur*", é capaz de reduzir a eficiência de funcionamento dos equipamentos utilizados nesse processo, ainda que a incidência de tais resíduos não costume exceder a taxa de 0,5%.

O enxofre livre de impurezas é alimentado em uma câmara refratária, na qual, em presença de ar atmosférico desprovido de umidade irá se transformar em anidrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ).

Considerando ser este o único ponto de entrada de ar do sistema, e ainda, que o  $\text{O}_2$  nele contido será consumido também posteriormente para a conversão do  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ , SANDER (1984) recomenda que a vazão do ventilador de ar seja ajustada de modo a fornecer uma vazão molar de oxigênio 50% maior que a do enxofre que alimenta a câmara de combustão. Entretanto, como por razões cinéticas é desejável que a etapa de conversão catalítica ocorra com excesso de  $\text{O}_2$ , SILVA (1998) cita que a relação  $\text{O}_2:\text{SO}_2$  seja equimolar, o que equivale a uma relação molar  $\text{O}_2:\text{S} = 2,0$ .

SANDER (1977) relata que durante a combustão do enxofre elementar, perto de 3,03 GJ de energia são gerados para cada tonelada de ácido sulfúrico produzido. Por conta disso, a temperatura dos gases emanados da câmara de combustão, no qual estão contidos de 10 a 12% de  $\text{SO}_2$  em base volumétrica, varia entre 950 e 1100°C. A reação estequiométrica de combustão do enxofre elementar aparece representada a seguir pela equação Eq. 01:



A etapa seguinte do processo DA compreende a transformação do  $\text{SO}_2$  obtido na combustão em anidrido sulfúrico ( $\text{SO}_3$ ). Essa operação, que normalmente se desenvolve em um equipamento denominado conversor catalítico, ocorre segundo a reação química representada pela equação Eq. 02:



Em termos construtivos, NARAYANASWAMY et al. (1978) descrevem o conversor catalítico como sendo um vaso vertical de perfil cilíndrico, segmentado internamente em compartimentos intercomunicantes e de mesmo volume, que serão

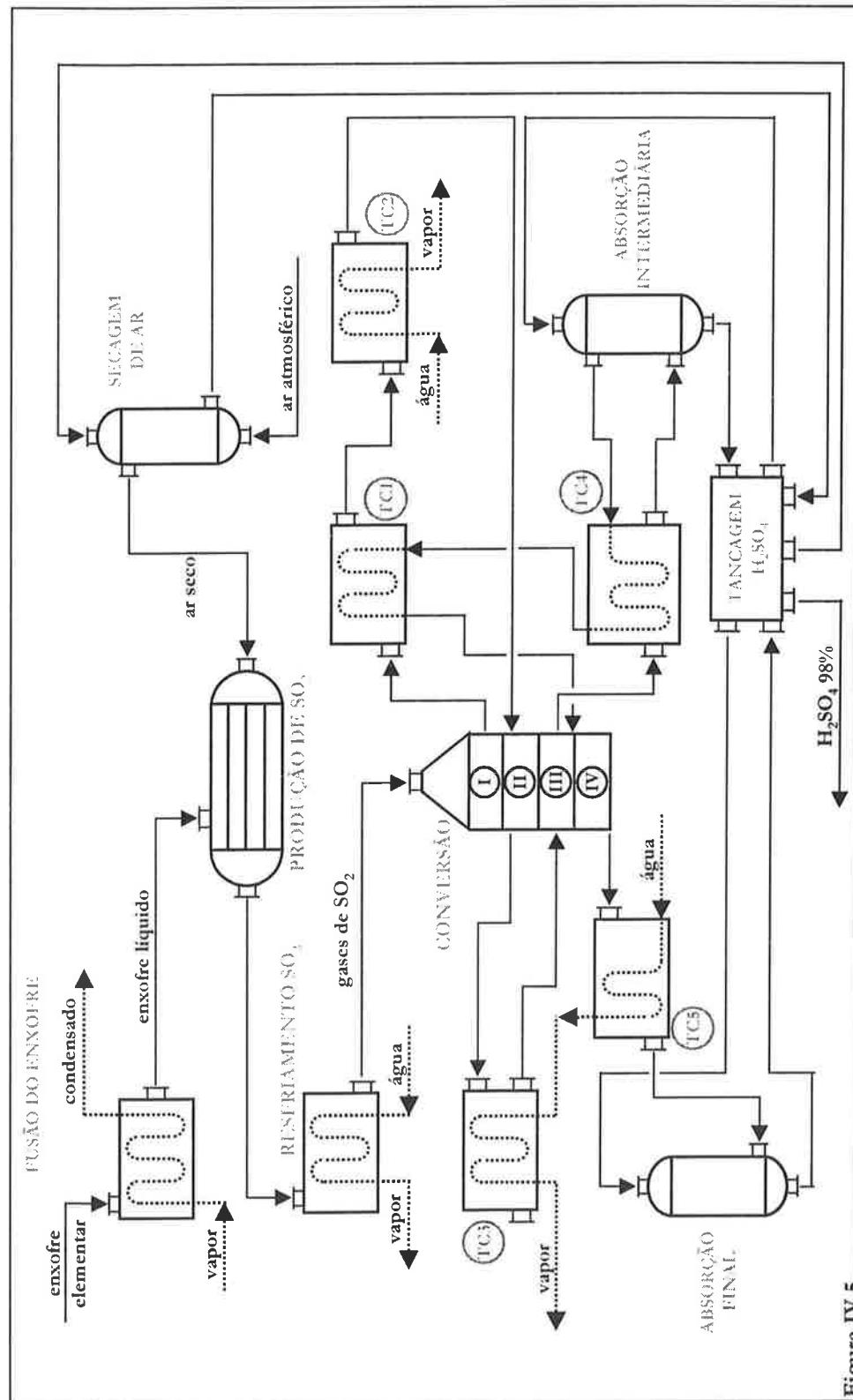


Figura IV.3. Diagrama do processo de Dupla Absorção (DA) para a produção de ácido sulfúrico

ocupados pelos chamados leitos catalíticos.

Segundo TRAINA (1984), um leito catalítico é definido por três camadas de material sobrepostas, sendo que as mais externas – também denominadas camadas de suporte – são formadas por materiais cerâmicos inertes à reação, enquanto que na camada a central encontra-se o agente catalisador da reação.

A camada cerâmica inferior tem por principal função evitar que o catalisador entre em contato com uma grelha metálica instalada no fundo de cada compartimento para dar sustentação ao conjunto, evitando assim o surgimento de focos potenciais de corrosão sobre esta última. O recobrimento do agente catalisador com material inerte visa assegurar uma dispersão gasosa mais uniforme, bem como evita a formação de cavidades no corpo desse último, que poderiam afetar de maneira adversa seu perfil de temperaturas.

De acordo com SANDER et al. (1984), a oxidação do SO<sub>2</sub> em fase gasosa é virtualmente impossível de ser realizada a qualquer temperatura sem a presença de um agente catalisador. Para formular tal afirmação, esses autores argumentam que muito embora implicando em elevação da velocidade de reação, um incremento na temperatura do sistema irá acarretar também o deslocamento do equilíbrio no sentido da dissociação do SO<sub>3</sub> em anidrido sulfuroso e oxigênio. Portanto, a implementação de temperaturas elevadas o suficiente para garantir velocidades de reação aceitáveis na ausência de agentes catalisadores, acabariam fatalmente proporcionando taxas de conversão bastante discretas.

Das substâncias testadas como catalisadores para a oxidação do SO<sub>2</sub>, apenas determinados compostos de vanádio e os óxidos de platina e de ferro, apresentaram desempenho técnico satisfatório. O fato de demonstrar uma relação custo-benefício mais atrativa que as das demais opções, fez com que o pentóxido de vanádio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) se difundisse sobremaneira entre os fabricantes de ácido sulfúrico MÜLLER (1994).

Além do V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, um catalisador comercial deve conter em sua composição um agente promotor de reação e um suporte de catalisador. Os promotores de reação são normalmente sais de metais alcalinos, dentre os quais merece destaque o sulfato de césio (Cs<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), cujas características fisico-químicas permitem que o conversor possa operar a temperaturas mais reduzidas, a partir de 400°C. Como suporte de catalisador

é recomendável o uso de sílica na forma de zeólitas, de terra de diatomáceas ou de gel (BECKER et al., 1979).

De acordo com MANN et al. (1980), o uso da tecnologia DA requer entre 150 e 200 litros de catalisador comercial para cada tonelada de ácido sulfúrico (100%) a ser produzida. Os mesmos autores comentam ainda, que a altura da camada de catalisador a ser instalada em cada leito varia em função da concentração de SO<sub>2</sub> nos gases que alimentam o sistema, podendo por isso variar de 200 a 1000 mm.

Para evitar perdas de rendimento no conversor, provenientes da fragmentação do leito catalítico de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em decorrência de seu uso sucessivo, DALO & VILANI (1984) sugerem que parte desse material seja substituída periodicamente. Os mesmos autores ressaltam, ainda a importância do cumprimento de procedimentos adequados quanto ao manuseio, acondicionamento e descarte final do resíduo sólido gerado em decorrência dessa operação, dado o grau de toxicidade por ele apresentado.

A obtenção de elevados índices de eficiência no conversor está intimamente ligada à temperatura de operação a que se submete o catalisador de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Segundo CONNOCK (1997), o V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> começa a ter ação efetiva sobre a reação de oxidação do SO<sub>2</sub> apenas entre 410 e 430°C; por outro lado, esse autor adverte que por volta de 600°C, o material tende a sofrer diminuição de sua superfície interna, fato que poderá culminar com a perda definitiva de sua atividade.

Considerando a sensibilidade térmica demonstrada pelo catalisador de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> torna-se, portanto, necessário um controle ostensivo de temperaturas sobre correntes que circulam pelo conversor. Assim, o gás que deixa o combustor deve ser resfriado até próximo dos 430°C antes de ser introduzido no primeiro estágio de conversão.

O caráter exotérmico da reação de oxidação do SO<sub>2</sub> impõe novo aumento de temperatura dos gases que passam através de cada leito catalítico. Por esse motivo, antes de ser transferida para seu homólogo subseqüente, a mistura gasosa emanada de cada leito deverá passar por um trocador de calor com o intuito de ser novamente resfriada.

A Tabela IV.4. traz representados os perfis de temperaturas e de rendimento acumulado de processo – esse último expresso em termos de SO<sub>2</sub> convertido – bem como a variação de temperatura entre estágios de um conversor catalítico alimentado com gases que contém entre 10 e 12% de SO<sub>2</sub>.

**Tabela IV.4. Perfis de temperatura e eficiência dentro do conversor**

Estágio de conversão	$\Theta_e^{(*)}$	$\Theta_s^{(**)}$	$\Delta\Theta^{(***)}$	$H_a$
	(°C)	(°C)	(°C)	(%)
leito catalítico ( I )	430	582	152	48,8
trocadores de calor TC1 + TC2	582	430	(-) 152	-
leito catalítico ( II )	430	520	90	77,6
trocador de calor TC3	520	430	(-) 90	-
leito catalítico ( III )	430	457	27	99,61
trocador de calor TC4	457	180	(-) 277	-
absorção intermediária	180	180	0	-
trocador de calor TC5	180	430	250	-
leito catalítico ( IV )	430	436	6	99,78
trocador de calor TC6	436	180	(-) 256	-
absorção final	180	80	(-) 100	-

Fonte: Adaptado de EFMA (2000a)

(\*): temperatura de entrada

(\*\*): temperatura de saída

(\*\*\*): variação de temperatura

Os valores apresentados na Tabela IV.4, demonstram que sendo a liberação de calor uma função direta da concentração de SO<sub>2</sub> presente no meio, os acréscimos de temperatura proporcionados pelo processo de oxidação vão sendo paulatinamente diminuídos conforme os diversos leitos catalíticos se sucedem.

Um dos avanços processuais introduzidos pela tecnologia DA refere-se à realização de uma absorção intermediária de anidrido sulfúrico em meio à conversão gasosa. Nessa operação o SO<sub>3</sub> gerado nos primeiros leitos catalíticos do conversor é absorvido em ácido sulfúrico com ao menos 98% de concentração em massa, ao reagir com a água presente na solução para formar mais ácido sulfúrico.

Conforme apontado por PACQUIEZ (1954), o valor ótimo de concentração para o ácido sulfúrico empregado como agente absorvente corresponde ao do azeotropo, para o qual as pressões parciais do SO<sub>3</sub>, do ácido sulfúrico e da água em fase vapor encontram-se em seus valores mais baixos.

Nas plantas de produção de ácido sulfúrico que empregam conversores com quatro ou mais estágios, costuma-se efetuar a captação dos gases para a absorção intermediária após a passagem destes últimos pelo segundo ou pelo terceiro leitos catalíticos.

Para configurações nas quais a absorção intermediária ocorre entre o segundo e terceiro estágios do conversor catalítico, cerca de 85% de todo SO<sub>2</sub> que alimenta o sistema deverá ter sido transformado em anidrido sulfúrico por ocasião da introdução dos gases na torre de absorção intermediária; por outro lado, para conversores nos quais a absorção intermediária se dá entre o terceiro e quarto estágios do conversor catalítico a quantidade de SO<sub>3</sub> absorvida tende a superar os 99%. Nos casos em que haja necessidade iminente de alcançar eficiências de conversão superiores a 99,7% BROWN (1976) recomenda a utilização de conversores com cinco leitos catalíticos, sendo a torre de absorção intermediária instalada após o terceiro leito catalítico.

A totalidade das torres de absorção opera em regime contracorrente, com os gases de processo sendo alimentados na parte inferior do equipamento e circulando no sentido ascendente por entre os elementos que constituem seu recheio interno; este, por sua vez, deverá ser irrigado uniformemente a partir do topo com solução de ácido sulfúrico.

Como demonstrado pelos dados da Tabela IV.4, os gases de processo que deixam o conversor devem ser resfriados a aproximadamente 180°C antes de serem alimentados à torre intermediária quando parte do calor ainda nela contido deverá ser transferido para ácido sulfúrico enquanto ambos os fluidos estiverem em contato. Por outro lado, o caráter exotérmico da reação entre o SO<sub>3</sub> a água acaba elevando novamente a temperatura da corrente gasosa, o que faz com que a mesma deixe o absorvedor em condições de estado virtualmente semelhantes àquelas apresentadas por ocasião de sua entrada no equipamento. O equilíbrio estequiométrico que caracteriza a hidrólise do SO<sub>3</sub> em ácido sulfúrico concentrado aparece representado a seguir pela equação Eq. 03:



A corrente gasosa remanescente da torre intermediária terá sua temperatura restabelecida acima de 400°C antes de retornar ao conversor, para dar seguimento a oxidação do SO<sub>2</sub> residual. A corrente que deixa o quarto estágio do conversor deve ser novamente resfriada para depois alimentar a torre de absorção final onde o SO<sub>3</sub> produzido nos últimos estágios catalíticos será absorvido em condições operacionais idênticas àquelas descritas anteriormente.

À semelhança da torre intermediária, o ácido sulfúrico efluente da torre de absorção final é recirculado ao tanque pulmão, que tem sua concentração reajustada, normalmente a 98% em massa, pela adição de água.

Além do uso nas torres de absorção, parte desse produto é aproveitada para absorver umidade do ar atmosférico que servirá de combustível na produção de SO<sub>2</sub>; a parcela restante segue para estocagem.

A tecnologia DA se destaca daquelas que a precederam por apresentar rendimentos globais de processo superiores a 99,5% para a transformação de enxofre elementar em ácido sulfúrico. Não bastasse sua significância em termos processuais, esse resultado é considerado bastante expressivo também sob o ponto de vista ambiental, dadas as reduzidas quantidades de enxofre não convertido em produto final a serem lançadas na atmosfera na forma de emissões gasosas de SO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub>.

Por fim, uma particularidade das tecnologias de contato, nas quais se insere o processo DA, refere-se à recuperação da energia gerada ao longo das etapas de manufatura do ácido sulfúrico. SANDER et al. (1984) reportam que em virtude do caráter exotérmico das reações envolvidas nesse processamento, por volta de 5,4GJ de energia na forma de calor são produzidas em média durante a fabricação de uma tonelada de ácido sulfúrico (100%) a partir de enxofre elementar.

Tendo em vista que controle de temperatura das correntes que circulam pelo conversor e pelas torres de absorção influencia diretamente a eficiência de conversão do processo, SANDER et al (1984) reputam ao adequado funcionamento das unidades de resfriamento acoplados tais equipamentos um dos segredos do sucesso da tecnologia DA.

Na Tabela IV.5. encontra-se representado um balanço energético típico para a produção de ácido sulfúrico (98% em massa) a partir de enxofre elementar realizada em uma planta do tipo DA. Diante dos resultados nela contidos, é possível notar que em torno de 97% do total de energia introduzida no sistema origina-se da sucessão de reações químicas decorrentes da transformação do enxofre elementar em ácido sulfúrico. Da mesma forma, deverá ser da ordem de 3% a quantidade de energia consumida para o transporte de fluidos através da unidade.

Observando-se agora o mesmo inventário no que se refere à energia de saída do sistema, é possível constatar que perto de 60% desse total é recuperado na forma de vapor superaquecido com cerca de  $40\text{kgf/cm}^2$  de pressão. Cálculos estimativos realizados por BRUNO et al. (1985), comprovados posteriormente por BRUNN et al. (1995), dão conta que de 1,0 a 1,2 t de vapor de alta pressão são gerados no processo a custa de recuperação de calor, para cada tonelada de ácido sulfúrico produzida.

**Tabela IV.5. Balanço Energético para a produção industrial de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (98%)**

Balanço Energético			
energia que entra no processo		Energia que deixa o processo	
origem	(%)	Origem	(%)
reação exotérmica: $\text{S} \leftrightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$	97,0	vapor superaquecido ( $40\text{kgf/cm}^2$ e $400^\circ\text{C}$ )	60,0
energia elétrica	3,0	energia perdida em diversos estágios de processo	37,0
		emissões atmosféricas	2,5
		ácido sulfúrico (98%)	0,5

Fonte: Adaptado de SANDER et al. (1984)

Por fim, ainda que a tecnologia DA apresente de taxas bastante razoáveis de recuperação de energia, cerca de 40% do total dessa geração acaba por se perder nos seguintes pontos do processo: absorção intermediária (28%), circuito de absorção final (7%), secagem do ar de combustão (1%), resfriamento do ácido sulfúrico (1%), junto às emissões atmosféricas (2,5%) e finalmente, incorporado ao próprio ácido produzido (0,5%).

O vapor de alta pressão gerado por conta da recuperação de calor é produzido em dois pontos do processo: em uma caldeira, por ocasião do resfriamento dos gases emanados do combustor que deverão depois seguir para o conversor, e nos equipamentos de troca térmica usados para a refrigeração das correntes gasosas que circulam entre os leitos catalíticos.

Conforme relatam BRUNO et al. (1985) a partir de levantamentos realizados junto aos complexos industriais brasileiros dedicados à produção de ácido sulfúrico, esse vapor é destinado para os mais diversos usos, dentre os quais podem ser destacados:

- fusão do enxofre sólido;
- acionamento do soprador de ar de combustão e da bomba de alimentação de água da caldeira;
- preaquecimento intermediário do gás que retorna ao conversor após sua passagem pela torre de absorção intermediária;
- produção de energia elétrica por cogeração e
- suprimento das demandas de vapor e de energia elétrica na própria planta e em unidades adjacentes, no caso de parques industriais integrados.

Particularmente no que se refere à produção de energia elétrica pelo processo de cogeração, os mesmos autores destacam ainda que no caso brasileiro, a produção média dessa utilidade é da ordem de 288KW por tonelada de produto obtido.

#### **IV.2.2.4. Produção de ácido fosfórico grau fertilizante**

A indústria nacional de fertilizantes demonstra estar em consonância com as tendências tecnológicas mundiais ao realizar a produção de ácido fosfórico pelo processo de via úmida. Por meio dessa tecnologia, o concentrado fosfático reage com ácido sulfúrico sob condições controladas de processo, para formar ácido fosfórico e sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ ) na forma de sal insolúvel, o qual será posteriormente separado por filtração. A equação Eq. 04. indica o equilíbrio químico descrito acima:



Muito embora representada pela equação Eq. 04, por uma reação única, o mecanismo que compreende a transformação do fósforo presente no concentrado de rocha em ácido fosfórico efetiva-se na verdade dois estágios.

No primeiro estágio, o fosfato tricálcico contido no mineral fosfatado reage com ácido fosfórico para formar fosfato monocálcico –  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , o qual irá por sua vez se combinar com o ácido sulfúrico presente no meio, no segundo estágio, formando então ácido fosfórico e sulfato de cálcio insolúvel. As reações químicas que representam os mecanismos antes descritos encontram-se representadas a seguir pelas das equações Eq. 05 e Eq. 06.



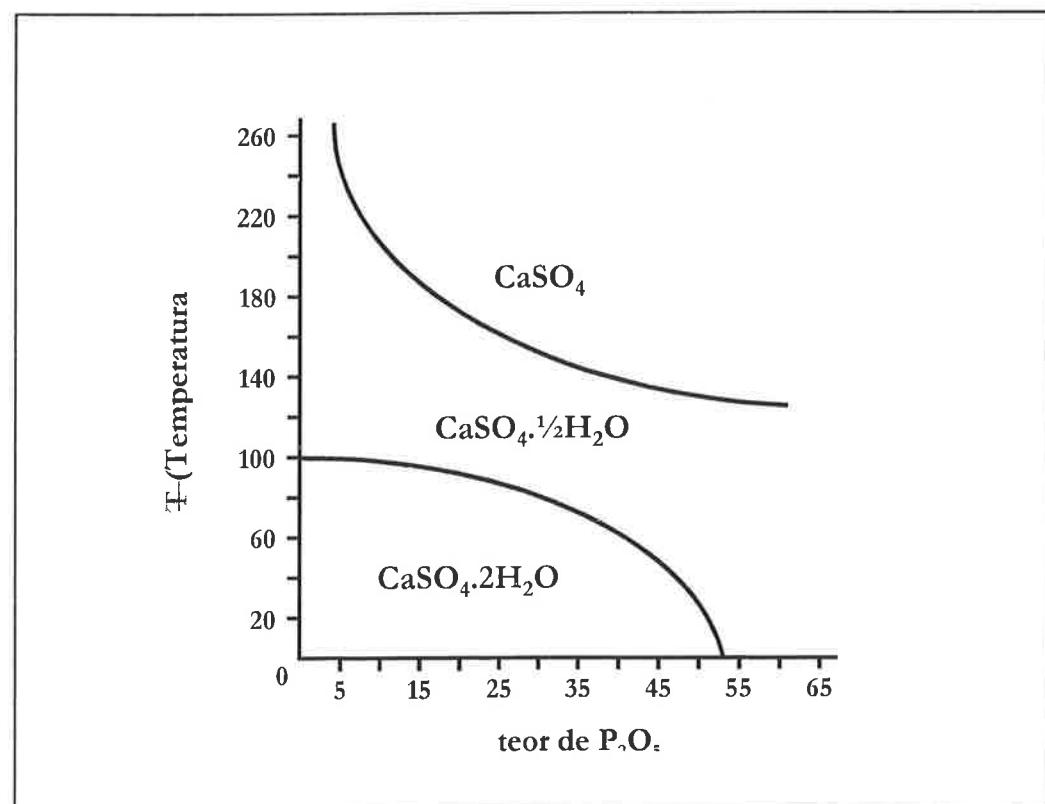
Paralelamente às transformações mencionadas, parte do concentrado fosfático pode também ser atacada diretamente por ácido sulfúrico, gerando ácido fosfórico e sulfato de cálcio dihidratado em um único estágio. No entanto, como observado em EFMA (2000b), essa reação acaba sendo limitada pela formação de uma camada de  $\text{CaSO}_4$  insolúvel sobre a superfície das partículas do mineral.

Segundo a referida publicação, tal problema pode ser minimizado colocando-se o concentrado em contato com ácido fosfórico diluído – recirculado a partir de estágios mais avançados do processo – para que este se converta tão rápido quanto possível em  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , vindo a se precipitar na forma de sulfato de cálcio apenas quando em presença de ácido sulfúrico.

Conforme observado por CEKINSKI (1990) o  $\text{CaSO}_4$  produzido no sistema poderá se cristalizar nas formas dihidratada, hemihidratada ou mesmo anidra. Segundo o mesmo autor, o grau de hidratação a que estará sujeito o  $\text{CaSO}_4$  será influenciado pelo comportamento de diversos parâmetros tais como: a temperatura no interior do reator, a quantidade de sulfato livre em solução e a concentração final de ácido fosfórico obtido no processo. A relação de interdependência firmada particularmente entre a temperatura de reação, o teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  do produto final e o grau de hidratação do  $\text{CaSO}_4$  é ilustrada no gráfico apresentado na Figura IV.6.

Constitui-se pratica usual selecionar condições operacionais de processo que levem à precipitação do sulfato de cálcio nas formas di e hemihidratadas. Para os casos onde se pretende que seja precipitado  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , a faixa de temperatura de trabalho do reator deve variar entre 70 e 80°C, enquanto que a concentração do ácido fosfórico produzido deverá por sua vez permanecer entre 28 e 32%  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Por outro lado, para sistemas produtivos que visam obter sulfato de cálcio na forma hemihidratada –  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$  – a reação precisa ocorrer a uma temperatura mais elevada – entre 90 e 110°C – ao passo que a concentração final do ácido produzido deverá registrar valores entre 40 a 52%  $\text{P}_2\text{O}_5$  (SLACK, 1968).



**Figura IV.6. Dependência do grau de cristalização do sulfato de cálcio com a temperatura e o teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> presentes no reator**

Fonte: EFMA (2000b)

As tecnologias industriais empregadas normalmente na fabricação do ácido fosfórico podem ser classificadas segundo a forma de hidratação na qual o sulfato de cálcio acaba por cristalizar-se. No Brasil, as empresas dedicadas a esse segmento de produção privilegiam em sua grande maioria a tecnologia Dihidrato (DH) dentro de suas muitas variações.

A Tabela IV.6, formulada originalmente por BECKER (1983), e apresentada a seguir, destaca vantagens e desvantagens potenciais do uso da tecnologia DH para a produção de ácido fosfórico.

**Tabela IV.6. Vantagens e desvantagens do uso da tecnologia Dihidrato (DH) na fabricação de ácido fosfórico**

VANTAGENS	DESVANTAGENS
<ul style="list-style-type: none"><li>• permitir que a operação de moagem do mineral fosfatado seja realizada a úmido</li><li>• ser flexível quanto à origem do concentrado fosfático</li><li>• realizar a operação de filtração em estágio único</li><li>• facilitar o transporte do sulfato de cálcio precipitado gerado durante a filtração</li><li>• atingir fatores elevados de produção, despendendo ao mesmo tempo baixos custos operacionais</li><li>• apresentar baixo grau complexidade no que se refere à operação e manutenção dos sistemas que a compõem</li><li>• ser pouco exigente quanto ao tipo de material de construção</li><li>• apresentar concepção de projeto bastante simples</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• alcançar concentrações relativamente baixas de <math>H_3PO_4</math> (entre 28 e 32% <math>P_2O_5</math>) após a operação de filtração</li><li>• consumir vapor na operação de evaporação do ácido obtido</li><li>• gerar produto final com níveis elevados de contaminação de flúor (F) e de alumínio (Al)</li><li>• apresentar eficiências globais de processo, medidas em termos de <math>P_2O_5</math>, que não superam os 95%</li><li>• demandar a instalação de sistemas de remoção de sólidos suspensos tanto antes como após a evaporação</li><li>• requer sistemas adjacentes para o armazenamento de <math>H_3PO_4</math> diluído</li></ul>

Fonte: BECKER (1983)

A tecnologia DH é composta basicamente das operações de moagem, reação, filtração e concentração, tal como se encontra representado a seguir no esquema da Figura IV.7. A reação de ácidos fortes ou mesmos de sais ácidos com o mineral fosfatado é reconhecidamente um fenômeno de superfície. Dessa forma, realiza-se a operação de moagem do concentrado de rocha com o intuito de criar ou expor superfícies porosas livres e suficientemente amplas, a ponto de permitir que esse material seja totalmente dissolvido em um período relativamente curto de tempo quando sujeito às condições impostas pelo sistema de reação (BECKER, 1983).

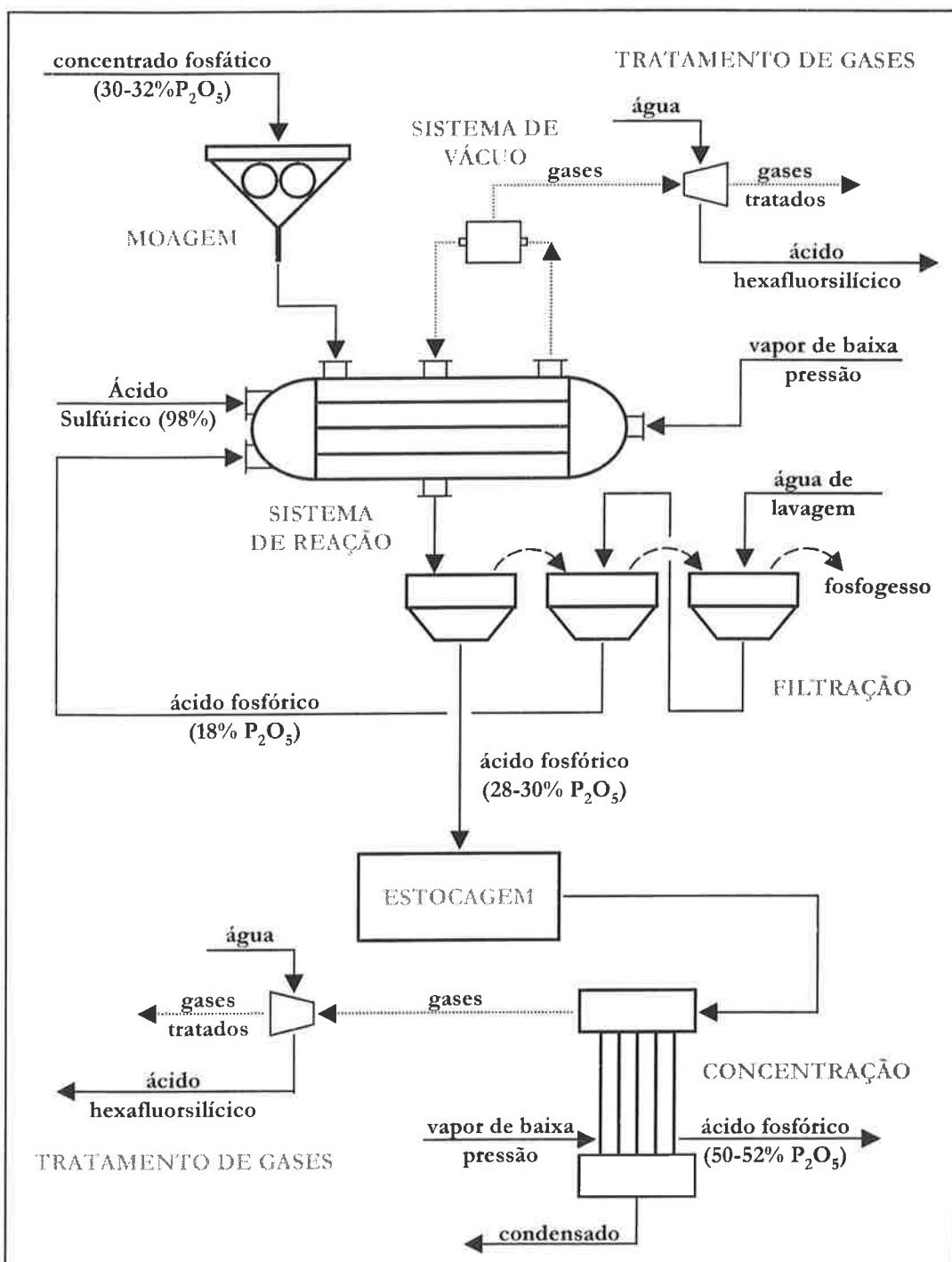


Figura IV.7. Diagrama esquemático do processo Dihidrato (DH) usado para a produção de ácido fosfórico

Fonte: Adaptado de BRUNO et al. (1985)

Além disso, GATES et al. (1976) reportam que a cominuição prévia do mineral de apatita resulta também em benefício de ordem operacional por reduzir o consumo de energia elétrica dos sistemas de agitação do reator de processo.

Boa parte dos concentrados de rocha deve se sujeitar à redução de tamanho antes de ser encaminhada ao reator; no entanto, para certas espécies cuja estrutura geológica apresenta grande porosidade, essa prática pode trazer efeitos indesejáveis. Conforme descrito em STERN (1965), além do dispêndio desnecessário de energia a fragmentação de minerais altamente porosos pode resultar na diminuição dos níveis de sulfato no interior do reator, bem como provocar um aumento das perdas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por co-cristalização. Outra consequência desfavorável da moagem acentuada de rochas porosas manifesta-se por meio da precipitação de cristais de CaSO<sub>4</sub> com dimensões reduzidas, que por serem de difícil separação durante a etapa de filtração tendem a permanecer como contaminantes do ácido fosfórico produzido.

Os requisitos para o estabelecimento da distribuição de tamanho de partícula do concentrado dependem em muito da tecnologia de processo a ser empregada na produção do ácido fosfórico. O processo dihidrato em particular, tende a demonstrar desempenho satisfatório tanto no que se refere à estabilidade operacional da planta quanto em termos de rendimento de produção, quando de 60 a 70% do concentrado a ser alimentado no reator apresenta-se com dimensões inferiores ao limite de 150µm EFMA (2000b).

A cominuição do concentrado é normalmente realizada em moinhos de bolas ou de barras; em qualquer dos casos, essa operação pode ser conduzida tanto a seco como a úmido. BECKER (1983) vê como vantagens da utilização de moinhos secos:

- uma melhor adaptação da operação de moagem às características da rocha e aos requisitos de dimensão do produto a ser obtido;
- diminuição dos consumos globais de eletricidade e de vapor da unidade de transformação;
- minimização das perdas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> solúvel em água e
- significativa redução do consumo de água fresca da planta.

Por outro lado, esse autor reputa ao consumo elevado de combustíveis para a secagem prévia do concentrado fosfático, às perdas de material na forma de emissões atmosféricas de particulados de pequenas dimensões e à exposição da integridade física do equipamento as principais desvantagens da moagem a seco.

Ao realizar avaliação semelhante para a moagem a úmido BECKER (1983) pôde identificar os seguintes pontos positivos no uso dessa prática:

- não obrigatoriedade do uso de combustíveis para secagem do concentrado antes de sua cominuição;
- diminuição substancial da poluição atmosférica no nível local, decorrente da emissão de material particulado e
- redução das dimensões do moinho, e consequentemente, dos requisitos energéticos associados ao seu funcionamento.

Não obstante, as limitações e dificuldades relacionadas com maior freqüência à operação de moinhos úmidos são, por sua vez:

- grande dificuldade no controle do material que se apresenta com grandes dimensões físicas (respectivamente, de distribuições granulométricas +35, +28 e +20 mesh) mesmo quando o processo se desenvolve em regime de reciclo fechado;
- redução da eficiência do reator, do que deverão decorrer um aumento do número de unidades de evaporação, e por conseguinte, um acréscimo da quantidade de vapor a ser consumida pelas mesmas;
- baixa tolerância do equipamento a rochas que apresentem argila em sua composição;
- uma forte tendência a que sejam gerados sulfatos de cálcio precipitados altamente abrasivos em situações nas quais o processo seja operado com concentrados fosfáticos de origem ígnea e
- aumento do volume de geração de efluentes líquidos de processo.

Após a moagem, o concentrado fosfático, agora em granulometria adequada, é alimentado a um reator concomitantemente ao ácido sulfúrico concentrado e a um reciclo de ácido fosfórico proveniente do estágio de filtração.

As diferenças mais marcantes encontradas entre as tecnologias de produção de ácido fosfórico residem no tipo de reator para a digestão do concentrado fosfático. As plantas que apresentam concepção mais antiga são compostas por um conjunto de vasos intercomunicantes ligados em série para realizar tal transformação.

Já nas unidades construídas mais recentemente, cujo projeto levou em conta aspectos de ordem econômica tais como a redução do consumo de material e o uso racional de espaço, esse arranjo foi substituído por um tanque único, segmentado internamente em compartimentos de volume equivalente por paredes ou por placas defletoras (EFMA, 2000b).

Cada compartimento apresenta um sistema próprio de agitação que estimula a movimentação do material no interior do equipamento. Segundo SLACK (1968), essa prática assegura um perfil uniforme de concentração de reagentes no interior do reator, reduz a formação de espuma e auxilia no resfriamento da massa reacional ao estimular o contato direto dessa última com ar atmosférico. Além disso, se observada sob o enfoque meramente econômico, o conceito adotado no projeto do sistema de agitação implica em redução direta dos custos de processo, ao dispensar a utilização de equipamentos próprios para o bombeamento da suspensão e diminuir o consumo de eletricidade da instalação BECKER (1983).

Finalmente, do ponto de vista construtivo os sistemas de reação costumam ser fabricados em aço ou concreto. Para qualquer dessas opções, no entanto, recomenda-se que a superfície interna do vaso seja recoberta por uma camada de borracha a fim de evitar o surgimento de pontos potenciais de corrosão.

Diferentemente das outras alternativas empregadas em escala industrial para a produção de ácido fosfórico, o sucesso da tecnologia DH depende da manutenção da faixa de temperatura de trabalho do sistema. Entretanto, como o balanço energético global das reações envolvidas no processo é francamente exotérmico, as condições idéias de operação poderão ser alcançadas apenas com a instalação de unidades de resfriamento que garantam a remoção contínua da energia excedente.

Como relatado em BRUNO (1980), cerca de 924 KJ por mol de apatita serão liberados ao longo da produção de ácido fosfórico 30%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, concomitantemente à precipitação de CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O caso o ácido empregado apresente concentrações da ordem de 98% de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Como para garantir a temperatura ótima de processo no reator – entre 70 e 80°C – são consumidos aproximadamente 308 KJ por mol de apatita, esse mesmo autor estima que duas terças partes do calor total gerado pelo sistema precisarão ser dissipadas.

MEINHOLD et al. (1966) relatam que diversas plantas de produção de ácido fosfórico implantadas até a primeira metade da década de 60 valiam-se da tecnologia de resfriamento por ar para estabilizar a temperatura do reator. Nesse sistema, ainda hoje em operação em unidades de pequeno porte, a superfície da suspensão é agitada com intensidade suficiente para que se crie uma grande interface líquido-ar, por meio da qual se dá a troca térmica entre os meios, devida principalmente à evaporação de água. Segundo esses autores, ao ser aquecido pela suspensão a uma temperatura entre 65 e 68°C, cada metro cúbico de ar será capaz de dissipar perto de 151 KJ de energia.

A principal vantagem do resfriamento por ar reside na economia de energia elétrica do sistema, uma vez que a perda de carga desse fluido ao longo do sistema de reação é bastante pequena. Assim, o consumo de energia irá se restringir apenas ao sistema de controle de poluição colocado exatamente entre o reator e a chaminé de saída para a atmosfera. Por outro lado, MEINHOLD et al. puderam identificar como desvantagem dessa tecnologia a necessidade do tratamento de grandes quantidades de gases residuais contendo fluoretos, previamente à sua emissão para a atmosfera. Outro ponto vulnerável dessa tecnologia reside no fato da eficiência do sistema estar diretamente relacionada à área superficial da suspensão, de dimensões reduzidas se comparadas às de um trocador de calor, ainda que o reator de processo disponha de grandes dimensões.

Boa parte das modernas unidades de produção de ácido fosfórico emprega o “flasheamento” a vácuo para garantir a estabilidade da temperatura de reação. Nesse caso, a suspensão aquecida é bombeada para o interior de uma câmara de evaporação mantida sob vácuo. Nessas condições a suspensão alcança mais facilmente seu ponto de ebulação, emanando vapor de água e portanto promovendo a dissipação do calor. O vapor gerado é introduzido em um tanque contendo água a temperatura ambiente onde acaba por se condensar (EFMA, 2000b).

A despeito de ser este um sistema tecnicamente mais sofisticado, as maiores desvantagens do “flasheamento” a vácuo residem no apreciável volume de geração de efluentes líquidos contaminados com fluoretos – que superam os 28 m<sup>3</sup>/t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – e no elevado consumo de energia elétrica para os bombeamentos da suspensão para o sistema de evaporação, e de água para o condensador, respectivamente.

Por outro lado, nesse caso não há restrição quanto à área do sistema como no caso do resfriamento por ar, o que causa um aumento significativo da autonomia de remoção de calor da unidade.

O rendimento do processo de produção do ácido fosfórico pode também ser afetado pela presença de impurezas introduzidas no sistema pelo concentrado de rocha. Além de competir com  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  por ácido sulfúrico, os óxidos de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnésio ( $\text{MgO}$ ) e silício ( $\text{SiO}_2$ ) podem causar, quando associados à alguns cloretos inorgânicos, ao ácido fluorídrico (HF) e ao dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), certas alterações de ordem processual, capazes de expor, inclusive, a integridade física das instalações. As limitações operacionais de processo mais conhecidas, provocadas em decorrência da presença de impurezas do concentrado fosfatado aparecem descritas a seguir no conteúdo da Tabela IV.7.

**Tabela IV.7. Efeito da presença de impurezas provenientes do concentrado fosfático na produção de  $\text{H}_3\text{PO}_4$**

SUBSTÂNCIA	PROBLEMA DE PROCESSO
$\text{MgO}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• forma compostos que dificultam a filtração;</li> </ul>
$\text{Al}_2\text{O}_3$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• quando o <math>\text{H}_3\text{PO}_4</math> é amoniado para as fabricações de MAP e de DAP há a tendência de formação de cristais nos quais o fósforo é insolúvel em água</li> <li>• diminui a recuperação de <math>\text{P}_2\text{O}_5</math> ao formar compostos tais como <math>\text{AlPO}_4</math> e <math>\text{FePO}_4</math>;</li> </ul>
$\text{SiO}_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tende a formar lodo altamente viscoso após o estágio de concentração</li> <li>• caso se apresente em baixos teores permite a formação de ácido fluorídrico (HF) que é corrosivo;</li> <li>• em altas concentrações causa erosão de tubulações e de elementos internos de bombas</li> </ul>
$\text{Cl}^-$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• teores acima de 0,01% aumentam consideravelmente a corrosão das instalações</li> </ul>
HF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• o HF reage com a sílica presente na rocha originando fluorsilicatos que podem também levar à corrosão de equipamentos</li> </ul>
$\text{CO}_2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sua presença produz espuma que reduz a eficiência de conversão da etapa de reação</li> </ul>

Fonte: CEKINSKI (1990)

Outro aspecto a merecer especial atenção durante o desenvolvimento da etapa de reação é a precipitação dos cristais de sulfato de cálcio. De acordo com relatos feitos por SLACK (1968), comprovados posteriormente por CEKINSKI et al. (1990), a forma e o tamanho dos cristais de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  são afetados principalmente pela concentração de sulfato livre no sistema de reação. Um teor elevado desse composto resulta na formação de cristais na forma de agulhas que, se por um lado são de fácil filtração, costumam por outro demandar esforços adicionais para sua lavagem. Caso apresente concentrações menores de sulfato, o sistema manifesta uma clara tendência à formação de cristais romboédricos individuais, cujas características permitem não apenas filtrações rápidas, mas também uma lavagem eficiente sem a necessidade de consumo adicional de água.

Uma redução ainda mais acentuada na quantidade de sulfatos irá produzir uma aglomeração dos cristais romboédricos, situação na qual costumam ser obtidos os melhores resultados possíveis em termos de filtração e lavagem. Por fim, caso o teor de sulfato livre no meio seja mínimo, o sulfato de cálcio dihidratado acabará por se precipitar na forma de cristais planos e delgados de difícil filtração e lavagem.

Excluindo-se as baixas concentrações residuais de sulfato livre em solução e a já reportada formação de uma película de  $\text{CaSO}_4$  por sobre as partículas de mineral de apatita, dois outros fatores podem ainda implicar em perdas significativas de  $\text{P}_2\text{O}_5$  no sistema. O primeiro deles, denominado co-cristalização, refere-se à substituição de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  por fosfato bicálcico –  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – gerando fosfatos insolúveis. A co-cristalização, ocorre também em função da diminuição da quantidade de sulfato livre em solução; a magnitude das perdas decorrentes desse efeito pode ser estimada pela equação Eq.07:

$$\frac{\% \text{P}_2\text{O}_5 \text{ perdido}}{(\text{Eq. 07})} = \frac{\text{Kc}}{\% \text{ sulfato (medido como SO}_3\text{)} \text{ em solução}}$$

Na qual:

$\text{Kc}$  – varia normalmente entre 4,5 e 5,5 dependendo de uma série de fatores  
característicos dos concentrados fosfáticos

Outra fonte regular de perda de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> provem dos derramamentos ocasionados pela lavagem de equipamentos. Nesse caso em especial, a forma de disposição dos equipamentos de processo pela planta, bem com, os procedimentos empregados para a limpeza dos mesmos serão fatores decisivos para sua minimização.

O conteúdo da Tabela IV.8 – formulado a partir dos levantamentos realizados por CEKINSKI (1990) – apresenta as principais perdas de processo ocorridas durante a produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> pelo processo DH. Os valores apontados referem-se a médias das perdas estimadas vários dos complexos industriais brasileiros dedicados à produção de ácido fosfórico.

**Tabela IV.8. Perdas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ocorridas durante o estágio de reação do processo de manufatura de ácido fosfórico**

ORIGEM DAS PERDAS	PERDAS DE PROCESSO (% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> não reagido	2,04
Co-cristalização	1,58
Derramamentos na limpeza de equipamentos	2,42
<b>TOTAL</b>	<b>6,04</b>

Fonte: CEKINSKI (1990)

Pelos dados da Tabela IV.8. pode-se observar que em condições normais de operação o rendimento médio das empresas brasileiras que se valem do processo DH para a produção de ácido fosfórico alcança valores em torno de 94%. No entanto, BECKER (1983) reporta que durante os processos de parada e repartida da unidade produtiva, as perdas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> chegam a superar em muitos casos, a marca de 10%.

A suspensão proveniente do estágio de reação, segue para a unidade de filtração e lavagem, na qual ocorrerá a separação das fases sólida e líquida que a constituem. BRUNO et al. (1985) observam que a filtração ocorre normalmente em três etapas: a primeira etapa compreende uma filtração simples, da qual a fase líquida originada é composta por ácido fosfórico com teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> entre 28 e 30%.

Esse produto é encaminhado à zona de estocagem, ali permanecendo até ser transferido ao estágio de concentração. A torta gerada na mesma operação passará, por sua vez, à etapa seguinte, na qual será lavada e filtrada.

O filtrado da segunda etapa de filtração, conhecido como ácido fosfórico diluído por apresentar de 16 a 20% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, é recirculado ao estágio de reação a fim de desempenhar o papel de agente regulador na precipitação do sulfato de cálcio, tal como antes mencionado. Já a fração sólida remanescente é enviada à última etapa do processo de filtração, onde passará por nova lavagem, realizada desta feita com água previamente aquecida, antes de ser transferida ao local de disposição final. Em virtude de seu baixo percentual de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o filtrado da terceira lavagem retorna à etapa imediatamente anterior, para ser aproveitado como fluido de lavagem da torta naquela situação.

O ácido fosfórico obtido da primeira filtração é bombeado dos tanques de estocagem para a seção de concentração, a qual é constituída por evaporadores de simples efeito dispostos em série.

Segundo BRUNO et al. (1985), em termos gerais, a concentração do ácido fosfórico se desenvolve em duas etapas: na primeira etapa a concentração do ácido é elevada até um valor entre 40 e 42% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por meio de troca indireta de calor com vapor superaquecido.

Na segunda etapa, que ocorre de maneira análoga a anterior, o ácido fosfórico atinge novo patamar de concentração, cujos teores variam entre 50 e 52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, que o credencia a ser empregado pelos processos da indústria de fertilizantes.

Segundo EFMA (1995), na grande maioria dos casos a concentração do ácido fosfórico ocorre em evaporadores com circulação forçada, nos quais a remoção do vapor de água é induzida com o auxílio de bombas de vácuo. A Figura IV.8. mostra uma representação esquemática do referido sistema.

Os evaporadores de circulação forçada são constituídos por um trocador de calor, por uma câmara de “flasheamento” e por duas bombas, sendo uma de vácuo e outra pressão, a qual é empregada apenas para a circulação do ácido.

Fazem parte também da instalação uma unidade de separação líquido-vapor e um condensador, cuja função será reter compostos de flúor emanados do sistema em associação com vapor de água, sob a forma de ácido hexafluorsilíssico ( $H_2SiF_6$ ). Tal arranjo busca reduzir as emissões atmosféricas da planta a níveis aceitáveis.

Finalmente, certos cuidados devem ser tomados por ocasião da implantação de unidades de concentração. De início, dada a natureza corrosiva do ácido fosfórico, assim como as temperaturas a que o mesmo estará exposto, é recomendável o uso de várias unidades individuais de evaporação.

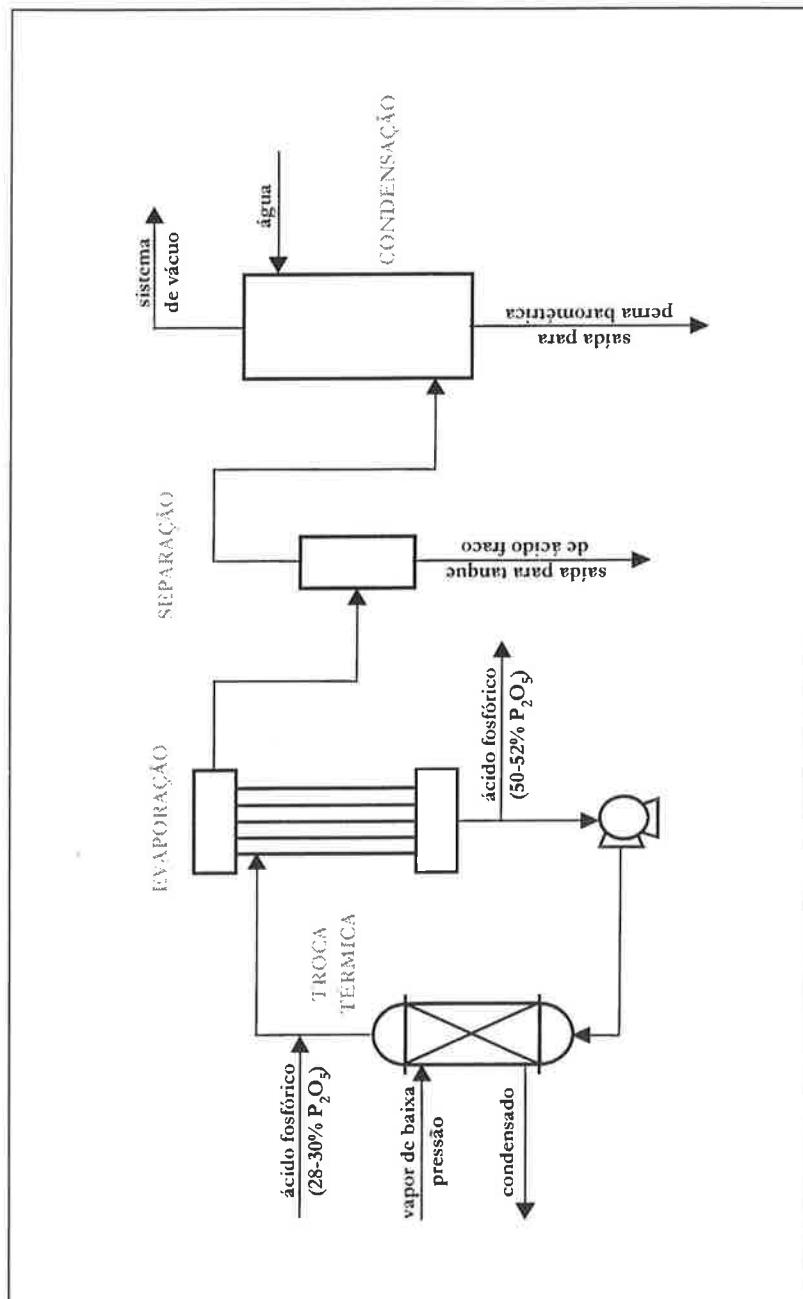


Figura IV.8. Representação esquemática do estágio de evaporação para a produção de ácido fosfórico  
Adaptado de EFMA (2000b)

Outras ações usuais visando a preservação da integridade física do sistema de evaporação, consistem na fabricação da unidade de troca térmica em grafite ou aço inoxidável, e na aplicação de uma camada protetora de borracha sobre a superfície interna dos demais equipamentos que integram a instalação.

Um dos aspectos mais relevantes da produção de ácido fosfórico refere-se ao precipitado que deixa a seção de filtração e lavagem, conhecido entre os fabricantes de fertilizantes pelo nome de fosfogesso.

Formado essencialmente pelo precipitado de sulfato de cálcio hidratado, esse rejeito da manufatura do ácido fosfórico apresenta ainda em sua composição diversos contaminantes provenientes das mais variadas fontes. Segundo SYNDICAT (1982), as causas mais prováveis de incorporação de tais materiais ao fosfogesso devem-se principalmente a:

- origem da matéria-prima fosfatada da qual se deriva o fosfogesso;
- quantidades remanescentes de produtos químicos usados no processo;
- condições reinantes durante a evolução da reação e
- lançamentos de rejeitos nas áreas onde ocorre a disposição do material.

Uma análise detalhada das impurezas presentes no fosfogesso permite que essas substâncias sejam classificadas segundo dois grupos: solúveis e insolúveis. De acordo com RÜGER (1996), as impurezas solúveis são formadas em sua maioria por íons de sódio, potássio ou flúor que acabaram não sendo eliminados ao longo das sucessivas lavagens realizadas durante a filtração. O fato dos contaminantes solúveis estabelecerem ligações frágeis com o  $\text{CaSO}_4$  hidratado, torna simples sua remoção, livrando esse último inclusive de eventuais prejuízos de estrutura.

Por outro lado, RÜGER (1996) classifica as impurezas insolúveis como compostos originados da apatita não solubilizada, sílica na forma de quartzo, carbono orgânico, produto de reações secundárias ocorridas durante o ataque do concentrado e  $\text{P}_2\text{O}_5$  co-cristalizado. Segundo esse autor, os compostos insolúveis estão unidos de tal forma à estrutura do sulfato de cálcio hidratado que sua eliminação ocorrerá apenas caso a integridade desse material seja comprometida significativamente.

RÜGER (1996) reporta que ao longo da produção do ácido fosfórico por meio do processo dihidrato, são geradas em média 4,9 toneladas de fosfogesso para cada tonelada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> obtida no produto final. Além disso, diante de características inerentes a essa tecnologia, o fosfogesso produzido por ela gerado, tende a apresentar níveis de contaminação elevados que os demonstrados por processos semelhantes.

Para fundamentar adequadamente essa afirmação, é apresentada a seguir na Tabela IV.9., elaborada originalmente por KOULOHERIS (1980), uma comparação entre as composições percentuais típicas de fosfogessos produzidos respectivamente pelos processos dihidrato, hemihidrato (HH) e hemi-dihidrato (HH-DH).

**Tabela IV.9. Análises típicas de fosfogessos gerados respectivamente pelas tecnologias DH, HH e HH-DH de produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>**

COMPONENTE	DH	HH	HH-DH
CaO	32,50	36,90	32,20
SO <sub>3</sub>	44,00	50,30	46,50
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,65	1,50	0,25
F <sup>-</sup>	1,20	0,80	0,50
SiO <sub>2</sub>	0,50	0,70	0,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	0,10	0,50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10	0,30	0,30
MgO	0,10	-	-
H <sub>2</sub> O cristalização	19,00	9,00	20,00

Fonte: KOULOHERIS (1980)

A grande quantidade de impurezas presentes em sua composição, aliada ao fato de suas propriedades serem reconhecidamente inferiores às do mineral de gipsita – CaSO<sub>4</sub> natural – fazem com que o fosfogesso tenha reduzida aceitação no mercado consumidor, sendo relegado na maioria dos casos a usos menos nobres.

KABE & SILVA (2003) imputam em grande parte esse baixo aproveitamento ao ceticismo manifestado pelos usuários quanto ao desempenho do fosfogesso como insumo alternativo para as indústrias de construção civil, de base para a produção de “clinker” de cimento Portland ou de suporte na pavimentação de vias de circulação, que constituem, ao menos atualmente, suas principais fontes de aplicações.

Os mesmos autores eviedenciam também que não obstante a recuperação do enxofre presente no fosfogesso continue despertando forte interesse por se tratar de uma alternativa tecnicamente viável à importação desse insumo, sua implementação ainda não se mostrou exeqüível em termos econômicos.

No âmbito nacional, o marcante desbalanceamento entre a geração e o uso do fosfogesso faz com que os depósitos desse material atinjam limites preocupantes. Baseando-se em séries históricas de dados de produção, KABE & SILVA (2003) puderam estimar que se encontram estocadas hoje no Brasil, aproximadamente 41,5 milhões de toneladas de fosfogesso aguardando para serem aproveitadas. Além disso, ainda segundo os mesmos autores, tendo em vista as capacidades produtivas atuais das cinco plantas dedicadas à manufatura de ácido fosfórico são geradas a cada ano no país perto de 4,5 milhões de toneladas de fosfogesso, das quais apenas cerca de 41% tornam a ser absorvidas.

Finalmente, como o armazenamento do fosfogesso é feito normalmente a céu-aberto tanto por empilhamento quanto em lagoas de decantação, impactos ambientais significantes decorrentes dessa prática como a ocupação de espaço físico, o arraste de sólidos por ação dos ventos ou a contaminação dos lençóis freáticos por compostos de flúor e fósforo em consequência da lixiviação natural do material, podem também ser observados.

#### **IV.2.2.5 Manufatura de superfosfato triplo (TSP)**

Como relatado anteriormente, o superfosfato triplo é um fertilizante simples, obtido em fase sólida a partir da reação entre concentrado de rocha fosfática e ácido fosfórico. Quanto à tecnologia, os processos praticados pelas companhias brasileiras dedicadas à produção desse fertilizante fosfatado podem ser de dois tipos: processo na forma granulada e processo do tipo pó.

Segundo relatado por BRUNO et al. (1985), o processo para obtenção de TSP na forma granulada, também conhecido por “*slurry process*”, decorre de inúmeras adaptações realizadas em plantas de granulação química, as quais foram concebidas originalmente com o propósito de fabricar fertilizantes compostos do tipo NPK. Muito embora o uso da referida tecnologia dispense a manufatura prévia de TSP na forma de pó, sua utilização está restrita atualmente apenas a uma unidade produtiva em todo o território nacional.

O processo do tipo pó tem no caráter multi-propósito de suas instalações um de seus pontos mais favoráveis, já que por meio destas podem se realizados além da manufatura do TSP, também os processamentos do superfosfato simples (SSP) e do fosfato parcialmente acidulado.

No que se refere à sua concepção, esta rota processual admite duas variantes operacionais: uma descontínua, denominada ainda de “*den*”, e outra contínua, dita “*run of pile*”. O processo descontínuo, considerado hoje uma tecnologia obsoleta, encontra-se em declínio no país. Já a versão contínua goza de boa aceitação junto ao setor produtivo, independentemente da modalidade tecnológica empregada para sua concepção. A Figura IV.9. traz representado o esquema do processo Broadfield para a produção de TSP em pó.

A primeira etapa do processo Broadfield consiste da moagem e classificação do concentrado de rocha. Segundo MOLDOVAN et al. (1969), para que a dissolução da apatita seja realizada de maneira eficiente, ao menos 90% desta deve ser reduzida a dimensões inferiores a 75mm durante a moagem. Paralelamente a esta ação, ácido fosfórico concentrado a cerca de 52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> é pré-aquecido até uma temperatura entre 70 e 80°C, a fim de que se possa acelerar a solubilização do concentrado, como será discutido posteriormente.

Após terem sido cumpridas as etapas preliminares à reação, o concentrado e o ácido fosfórico são alimentados de forma intermitente a um misturador, que se encarregará de efetuar a homogeneização desses reagentes. Em decorrência dessa operação gera-se um material de consistência pastosa, que será transferido ao reator a uma temperatura de cerca de 125°C, em virtude do caráter exotérmico da reação então em andamento.

CEKINSKI (1990) descrevem o reator como uma correia transportadora que se move continuamente no intuito de dar vazão à massa reacional proveniente do misturador. O tempo de retenção desse material no referido sistema varia segundo diversos fatores, todos eles relacionados à cinética de decomposição da apatita presente no mineral.

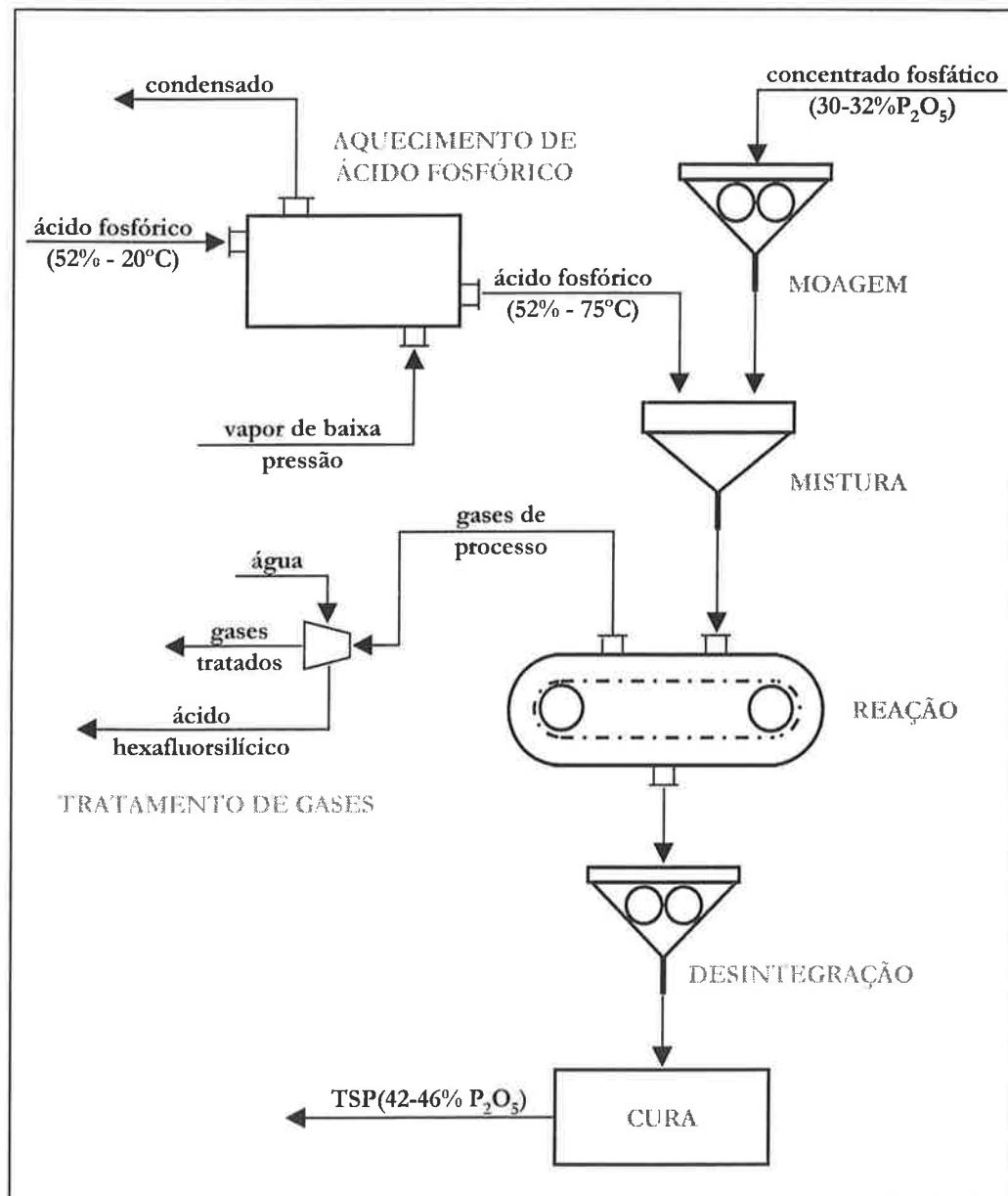


Figura IV.9. Tecnologia Broadfield de produção contínua de TSP em pó  
Fonte: Adaptado de BRUNO et al. (1985)

O processo de digestão do concentrado fosfático por ácido fosfórico ocorre em estágio único, e obedece basicamente à reação química a seguir apresentada pela equação Eq. 08:



A reação de formação do TSP é significativamente menos complexa do que a do ácido fosfórico graças à ausência de CaSO<sub>4</sub>. Nesse contexto, a velocidade da etapa de reação irá depender em essência da concentração hidrogênio-iônica do meio, da temperatura de reação e de propriedades do concentrado fosfático usado no processo, tais como a composição e a área superficial do mesmo.

Segundo CEKINSKI (1990), as etapas iniciais do processo de manufatura de TSP são caracterizadas pela transformação de uma fase fluida para uma fase plástica, e desta para uma fase seca.

Segundo relatos feitos em TVA (1964) os menores tempos de duração da fase fluída são obtidos quando o ácido fosfórico apresenta uma faixa de concentração que varia entre 80 e 85%, equivalentes a um teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> da ordem de 58 a 61,5%. A mesma referência menciona também, que a diminuição do tempo de duração da fase fluida está diretamente proporcional ao aumento da temperatura do ácido fosfórico para os mesmos valores de concentração antes apontados.

A sinergia entre ambos os efeitos explica o fato da digestão do concentrado ocorrer de maneira mais eficiente, ao ser realizada por ácido fosfórico previamente aquecido entre 70 e 80°C e com 50 a 52%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

No que se refere às propriedades do mineral, dois são os aspectos capazes de exercer significativa influência na química de processo da fase fluida: o teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e a relação CaO:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> da rocha beneficiada.

Tal como ilustrado na Tabela IV.10. adaptada de UNIDO (1980), uma análise comparativa das amostras I, II e III faz concluir que o aumento da relação mássica CaO:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de concentrados fosfáticos com conteúdos equivalentes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> implica não apenas no incremento natural de demanda do ácido fosfórico, mas também na elevação da concentração final do TSP.

Analogamente, avaliando-se os resultados obtidos para os ensaios realizados com as amostras II, IV e V, é possível depreender que para uma dada relação mássica entre CaO:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, a concentração final de TSP varia diretamente com o teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> do concentrado de rocha empregado como insumo em sua manufatura.

**Tabela IV.10. Efeito do teor de  $P_2O_5$  no concentrado e da relação  $CaO:P_2O_5$  sobre as proporções de concentrado fosfático e  $H_3PO_4$  e sobre o teor de  $P_2O_5$  do TSP**

Amostra	Relação mássica $CaO:P_2O_5$ no concentrado	(% total de $P_2O_5$ no produto a partir de		(% total de $P_2O_5$ no concentrado)	(% total de $P_2O_5$ no TSP)
		C. Fosfático	$H_3PO_4$		
I	1,70	24,0	76,0	33,0	47,0
II	1,50	27,0	73,0	33,0	46,1
III	1,35	30,2	69,8	33,0	45,2
IV	1,50	27,0	73,0	28,0	43,0
V	1,50	27,0	73,0	38,0	48,5

Fonte: adaptado de UNIDO (1980)

Muito embora os resultados antes mencionados tenham sido obtidos a partir de ensaios com rochas provenientes da Flórida (EUA), estudos realizados por SILVA JÚNIOR (1980), constataram que a matéria-prima fosfática extraída no Brasil mostra comportamento semelhante ao daquele mineral durante a produção de TSP.

Quanto à fase plástica, a área superficial do concentrado de apatita aparece como fator determinante para o desempenho da reação. Tal como descrito em TVA (1964), o aumento da superfície de contato entre o mineral e o ácido fosfórico eleva a velocidade de reação do sistema, reduzindo por conta disso, o tempo destinado à cura do TSP. A mesma referência menciona também que o fato da área superficial do concentrado variar com o inverso de sua granulometria traz implicações imediatas sobre comunicação a que esse último é submetido, especialmente para os casos em que forem utilizadas rochas menos reativas tais como aquelas predominantes no território nacional.

A influência dos fenômenos anteriormente descritos sobre o tempo de reação da produção de TSP, resulta, em termos práticos, em um período cuja duração varia normalmente entre 10 dias a três semanas.

Assim sendo, mesmo após deixar a correia do reator, a massa reacional segue ativa, permanecendo nessa condição inclusive durante seu armazenamento. Esse tipo de reação continuada é chamada de *cura* entre os fabricante do setor de fertilizantes.

De acordo com CEKINSKI (1990), durante o processo de cura do TSP é possível que se dê a ocorrência da chamada reversão ou retrogradação, pela qual uma parte do  $P_2O_5$  dissolvido pelo ataque ácido volta a apresentar-se na forma insolúvel.

O fenômeno de reversão deve-se à formação de substâncias intermediárias tais como  $Ca(H_2F(PO_4)_2 \cdot 5H_2O)$  e  $Ca(Al_3H_2(PO_4)_4 \cdot 20H_2O)$ , ou ainda de complexos do tipo  $(Fe,Al)_3(K,H)H_8(PO_4)_6 \cdot 6H_2O$ . Segundo os mesmos autores, tais compostos são gerados em decorrência de reações paralelas que se desenvolvem na pilha de produto, motivadas principalmente por condições de pressão, temperatura e umidade desse sistema.

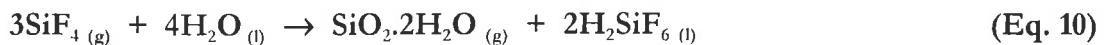
No intuito de minimizar a reversão do fósforo solúvel contido no TSP, muitos especialistas sugerem como alternativas a mudança periódica de posição da pilha e a construção de pilhas menores. Por outro lado, é também de consenso geral que a implementação de tais medidas irá implicar em custos adicionais de processo, os quais deverão ser portanto avaliados previamente à suas implementações.

Um problema complementar e de caráter ambiental gerado em decorrência da produção de TSP corresponde à emissão atmosférica de compostos de flúor durante o desenvolvimento da fase fluida.

Conforme reportado por CEKINSKI (1990), quando sujeito às condições triviais de operação do reator, o flúor disponível na apatita reage com ácido fosfórico formando HF. Esse composto combina-se então com sílica também proveniente do concentrado fosfático gerando tetrafluoreto de silício ( $SiF_4$ ). A reação de formação do  $SiF_4$  encontra-se representada abaixo pela equação Eq.09:



Em virtude de seu reconhecido potencial poluidor, o  $SiF_4$  emanado do reator passa por um sistema de lavagem de gases no qual, em contato com água, acaba por ser facilmente hidrolisado a  $H_2SiF_6$ . A reação que sintetiza a referida transformação é apresentada a seguir pela equação Eq.10:



Como reportado em UNIDO (1980), o efluente líquido emanado do lavador de gases chega a conter concentrações superiores a 20% em massa de  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  em sua composição. Ainda segundo essa fonte, por conta de tal fato esse material encontra uso regular como intermediário dos processos de manufatura de criolita sintética, fluoreto de alumínio, bem como de diversos outros fluorsilicatos.

#### IV.2.3 Termofosfatos

##### IV.2.3.1. Características dos Termofosfatos

Os termofosfatos são fertilizantes obtidos por meio do tratamento térmico da rocha fosfatada onde em geral são também adicionados outros materiais. Ocupando papel semelhante àquele desempenhado pelos ácidos minerais nos processos da via úmida, esse tratamento busca destruir a estrutura cristalina do mineral apatítico para formar compostos em que o fósforo se apresente segundo uma forma mais disponível para os vegetais. Quanto às suas propriedades, os termofosfatos caracterizam-se por serem insolúveis em água, pouco solúveis em citrato neutro de amônio e altamente solúveis em ácido cítrico a 2% (1:100).

LIMA NETO & SILVA (1979) consideram a insolubilidade em água como uma das vantagens dos termofosfatos sobre os demais produtos que compõem o grupo dos fosfatados. Para esses autores, o fato de dispor de tal propriedade evita que o adubo sofra lixiviação do estrato superior do solo quando este é submetido à ação de intempéries.

O grau de alcalinidade é considerado outro traço marcante dos termofosfatos. Por apresentarem valores da ordem de 50% de CaO, os termofosfatos demonstram eficiência agronômica bastante satisfatória quando aplicados em solos ácidos típicos de climas tropicais, a ponto inclusive de, para determinadas culturas seu desempenho ter superar aquele alcançado pelo SSP (LIMA NETO & SILVA, 1979).

Tendo em vista esse quadro, e considerando-se o fato de boa parte dos solos agricultáveis brasileiros, incluindo a região do cerrado, ter perfil ácido, conclui-se que o uso de termofosfatos é portanto bastante recomendável para a suplementação do teor de fósforo necessário ao crescimento de culturas no país.

GUARDANI (1981) evidencia, por fim, que afora as vantagens mencionadas, as propriedades físicas e químicas apresentadas pelos termofosfatos garantem aos mesmos:

- liberação gradual do fósforo no solo (também como decorrência da baixa solubilidade em água);
- armazenamento em depósitos abertos por períodos extensos de tempo;
- capacidade de mistura com fertilizantes nitrogenados e potássicos, fator que os credenciam para a preparação de misturas complexas e
- facilidade de incorporação mecânica ao solo.

A principal desvantagem dos termofosfatos é de ordem econômica, e reside no consumo elevado de energia despendido por ocasião de sua produção. Esse custo pode no entanto contra-balanceado pela não necessidade do uso de matérias-primas tais como enxofre ou ácidos minerais, que para certas regiões devem ter seus custos de produção e aquisição analisados cuidadosamente (GUARDANI, 1981).

Os termofosfatos produzidos atualmente em escala econômica costumam ser em geral subdivididos em dois grupos: calcinados e fundidos. Ambos os grupos diferem em essência quanto à temperatura em que ocorrem seus processamentos.

Para os termofosfatos calcinados, o calor não faz mais que induzir e acelerar as diversas reações químicas envolvidas em sua transformação. Já nos termofosfatos fundidos, o efeito térmico deve ser forçosamente mais ostensivo, uma vez que a manufatura dessa classe de produtos deverá de dar tão somente, quando da fusão dos compostos reagentes (FERREIRA, 2001). Um relato sumarizado que inclui a caracterização dos principais produtos obtidos pelo uso de cada uma das referidas vias, bem como os aspectos operacionais mais relevantes de seus processamentos são apresentados a seguir.

#### **IV.2.3.2 Termofosfatos Calcinados**

Os processos de calcinação consistem em termos absolutos do aquecimento da matéria-prima fosfatada – a qual é alimentada ao sistema tanto de maneira isolada, quanto na forma de mistura com outros materiais – a temperaturas que, se por um lado superam os 1000°C, não deverão, por outro, exceder o ponto de fusão da matéria reagente.

Nessa condição, ocorrem reações em estado sólido nas quais a estrutura da apatita é destruída, fazendo surgir uma solução sólida onde o fósforo estará presente sob a forma de compostos solúveis (GUARDANI, 1979).

Ainda no campo das considerações gerais, o processamento dos termofosfatos calcinados chama a atenção, agora sob o ponto de vista ambiental, pela liberação de grande parte do flúor presente na apatita. Para FERREIRA (2001), esse fenômeno pode ser imputado às reações entre rocha fosfatada e sílica, introduzida no sistema na condição de reagente, ocorridas em presença de vapor de água e independendo de uma eventual contribuição de contribuição de carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ).

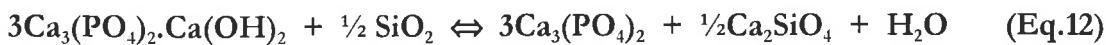
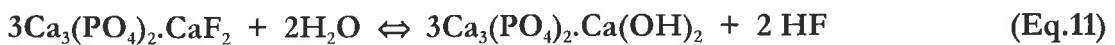
São três os tipos de termofosfato calcinados produzidos em escala econômica atualmente no mundo: desfluorizado, Rhenânia e Termofosfato Calcinado Japonês.

#### **IV.2.3.2.1 Termofosfato desfluorizado**

Desenvolvido pelo *Tennessee Valley Authority – TVA* – no curso da segunda metade da década de 40, a tecnologia empregada para a produção de termofosfatos calcinados desfluorizados tem no concentrado de rocha fosfática – cujo teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  deve variar entre 32 e 36% – e na sílica – introduzida no sistema na forma de areia – suas fontes de matéria-prima.

Segundo (FERREIRA, 2001) em uma etapa preliminar à reação, promove-se a mistura desses reagentes, a qual origina uma mistura a qual será, por sua vez, cominuída até que pelo menos 85% desta seja passante em malha 0,074mm (ABNT n.º 20). A fração de corte da classificação é alimentada a um forno rotativo, mantido a temperaturas superiores aos 1400°C, pela queima de óleo combustível. O consumo de óleo combustível no processo varia entre 280 e 480kg/t produto.

O fato de tal transformação ser conduzida a temperaturas elevadas acaba por favorecer a liberação do flúor presente na apatita sob a forma de HF; os mecanismos que sintetizam esse fenômeno constam das equações Eq.11 e Eq.12:



Com os desprendimentos do HF e da água resta no reator uma solução salina composta por fosfato tricálcico e silicato de cálcio –  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ .

LIMA NETO & SILVA (1979) relatam que o  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  obtido da calcinação pode apresentar estruturas de cristalização dos tipos  $\alpha$  e  $\beta$ , as quais irão estabelecer entre si um equilíbrio por volta dos 1180°C de temperatura. Para que esse equilíbrio se desloque em favor da formação de fosfato tricálcico- $\alpha$ , a mais atraente das duas formas sob o ponto de vista econômico, esses autores recomendam que as seguintes condições de operação sejam observadas:

- manutenção de temperaturas superiores a 1200°C durante toda a operação de calcinação das matérias-primas reagentes e
- redução drástica da temperatura da massa reacional calcinada gerada no sistema tão logo se inicie a descarga desta, visando assim impedir que o fosfato tricálcico- $\alpha$  e volte a se converter em seu homólogo do tipo  $\beta$ .

Portanto, logo que o material calcinado começa a verter do interior do reator, um sistema de chuveiros entra em ação, aspergindo água sobre o mesmo no intuito de resfriá-lo rapidamente. A remoção do flúor residual se completa durante a mesma operação (LIMA NETO & SILVA, 1979).

Como antes mencionado, a produção do fosfato tricálcico- $\alpha$  é incentivada do ponto de vista econômico. Essa prática encontra motivo pela estabilidade estrutural demonstrada pelo produto em questão quando sujeito a temperaturas superiores à do equilíbrio, bem como por elevada capacidade de solubilização em ácido cítrico a 2%.

O termofosfato calcinado desfluorizado obtido pelo processo TVA apresenta como composição média 21% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total (sendo 95% deste montante solúvel em ácido cítrico), 18% de óxido de cálcio –  $\text{CaO}$ , 48% de material silicoso insolúvel e 0,05% de flúor (FERREIRA, 1999).

#### IV.2.3.2.2 Termofosfato Rhenânia

O processo de produção de termofosfato Rhenânia teve origem na Alemanha também durante a década de 40. De perfil operacional semelhante ao empregado no processo TVA para a produção de termofosfato desfluorizado, a tecnologia Rhenânia diverge desse último por acrescentar à lista de matérias-primas o carbonato de sódio

( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), e por operar dentro de uma faixa mais branda de temperatura, geralmente entre 1100 e 1250°C.

De início, as matérias-primas são misturadas na proporção de 100 partes de concentrado fosfatado (com cerca de 38%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), 39 partes de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e 10 partes de areia cujo teor de sílica deve ser da ordem de 97%. O material obtido será então levado ao forno rotativo com injeção de vapor, não sem antes sofrer cominuição a seco e ser classificado em peneira de malha 170 mesh (SILVA, 1979).

O mecanismo de reação a que estará sujeita a massa reagente quando exposta às condições operacionais do sistema, é descrito a seguir de maneira simplificada pelas equações Eq.13 e Eq.14:



Como o processo Rhenânia propicia a transformação completa do mineral de apatita em rhenanita ( $\text{CaNaPO}_4$ ) e silicato de cálcio, torna-se desnecessário efetuar a instalação de um sistema de resfriamento rápido à saída do forno visando manter a estrutura cristalina do produto gerado.

Muito embora ambas as reações se desenvolvam simultaneamente durante a calcinação, o mecanismo de reação indicado na equação Eq.17. predomina sobre seu homólogo, justificando assim o fato de o flúor emanado do reator encontrar-se sob a forma de  $\text{NaF}$ .

Como no processo TVA, a manutenção da temperatura de operação do forno rotativo no presente caso é conseguida à custa da queima de óleo combustível, o qual segundo relata FERREIRA (1999) é consumido à razão de 70kg/t produto.

A composição típica do termofosfato Rhenânia apresenta 28% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total (95% solúvel em ácido cítrico), 40% de  $\text{CaO}$ , 17% de óxido de sódio –  $\text{Na}_2\text{O}$ , 10% de óxido de silício –  $\text{SiO}_2$  – e 2,5% de F.

#### **IV.2.3.2.3 - Termofosfato calcinado japonês**

A tecnologia de produção do termofosfato calcinado japonês pode ser vista como uma variante dos processos antes apresentados sendo que às matérias-primas empregadas deverá ser adicionado o ácido fosfórico.

A presença de ÁCIDO FOSFÓRICO na condição de reagente permite adicionar à estrutura do produto de reação, fosfato tricálcico do tipo  $\alpha$ . Por conta disso, a fórmula geral do termofosfato calcinado japonês deverá conter



sendo que para o caso de sua composição média são esperados como coeficientes os seguintes valores:  $\alpha = 1,00$ ;  $\gamma = 1,22$  e  $\zeta = 0,30$ .

Misturadas na proporção de 100 partes de concentrado fosfático (37% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), para 13 partes de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, 10 partes de sílica e 8 partes de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de ÁCIDO FOSFÓRICO, as matérias-primas são moídas e classificadas antes de serem alimentadas ao forno rotativo. Segundo procedimento semelhante àquele utilizado no processo Rhenânia, efetua-se a seguir, uma injeção de vapor de água no sistema, com o intuito de efetivar a remoção dos compostos de flúor (FERREIRA, 2001).

A temperatura de reação, mantida por meio da combustão de 200kg de óleo combustível por tonelada de produto, oscila em torno de 1350°C. Assim como no processo TVA, a tecnologia usada na manufatura do termofosfato calcinado japonês depreende o resfriamento instantâneo da massa reacional concomitantemente à sua descarga, a fim de reprimir a formação de fosfato tricálcico- $\beta$ .

O termofosfato calcinado japonês é composto por aproximadamente 40% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, sendo 90% deste solúvel em ácido cítrico, e 0,1% de F.

#### **IV.2.3.3 Termofosfatos Fundidos**

De acordo com GUARDANI (1982), os primeiros registros de investigações voltadas à manufatura de fertilizantes por meio da fusão de misturas de rocha fosfática com silicatos de metais alcalinos ou alcalino-terrosos datam do início do século passado, ainda nenhum desses processos tenha chegado a ser empregado em escala comercial.

Apenas na década de 40, WALTHALL & BRIDGER, então trabalhando para a TVA, publicaram os resultados de seus estudos sobre a fusão de minério de rocha fosfatada do Tennessee (EUA) com olivina – um tipo de silicato de magnésio natural de fórmula  $(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_2\text{SiO}_4$  – realizados a temperaturas que variavam entre 1450 a 1550°C em fornos elétricos de pequena escala.

Segundo os mesmos autores, por meio da fusão de uma mistura de 100 partes de rocha do Tennessee (com cerca de 33% de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) e 46 partes de olivina, foi obtido um fertilizante com 22,8% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  total, e 21,4% de  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em ácido cítrico a 2% de concentração. Mereceu uma atenção especial à época, o fato de no referido processo a dissolução do fósforo não depender aparentemente da remoção de flúor, já que apenas de 25 a 30% do F contido na apatita é volatilizado (GUARDANI, 1982).

A produção do chamado termofosfato magnesiano fundido (FMP) começou a ocorrer em escala industrial apenas em 1948 nos Estados Unidos, por meio da fusão de misturas de rocha fosfatada com olivina em fornos elétricos do tipo “arco direto”.

No entanto, em virtude das características do produto obtido, sua aplicação nos solos alcalinos de clima temperado, predominantes na maioria das áreas agricultáveis do território americano resultou em marcante insucesso. Esse motivo foi suficiente para que a produção desse fertilizante fosse suspensa poucos anos mais tarde.

No período compreendido entre meados da década de 50 e o início dos anos 60 observou-se uma significativa produção científica sobre tecnologia de produção de FMP, gerados em sua maioria por uma equipe de pesquisadores da Universidade Chuo – Japão, sob a coordenação do Dr. Jumpei Ando. Tais publicações abrangeram principalmente aspectos relacionados à composição, estrutura e solubilidade do FMP.

O sucesso demonstrado nos ensaios exploratórios de aplicação do FMP como fonte de suplementação de fósforo e magnésio nos solos aráveis japoneses permitiu um rápido crescimento do parque industrial daquele país, o qual permanece ativo até hoje. Afora o Japão, o FMP é também produzido em escala industrial na Coréia do Sul, na China, África do Sul e Brasil.

#### **IV.2.3.3.1 Aspectos estruturais dos termofosfatos magnesianos fundidos**

De acordo com ANDO (1961), a composição química típica do termofosfato magnesiano fundido varia dentro dos seguintes intervalos:

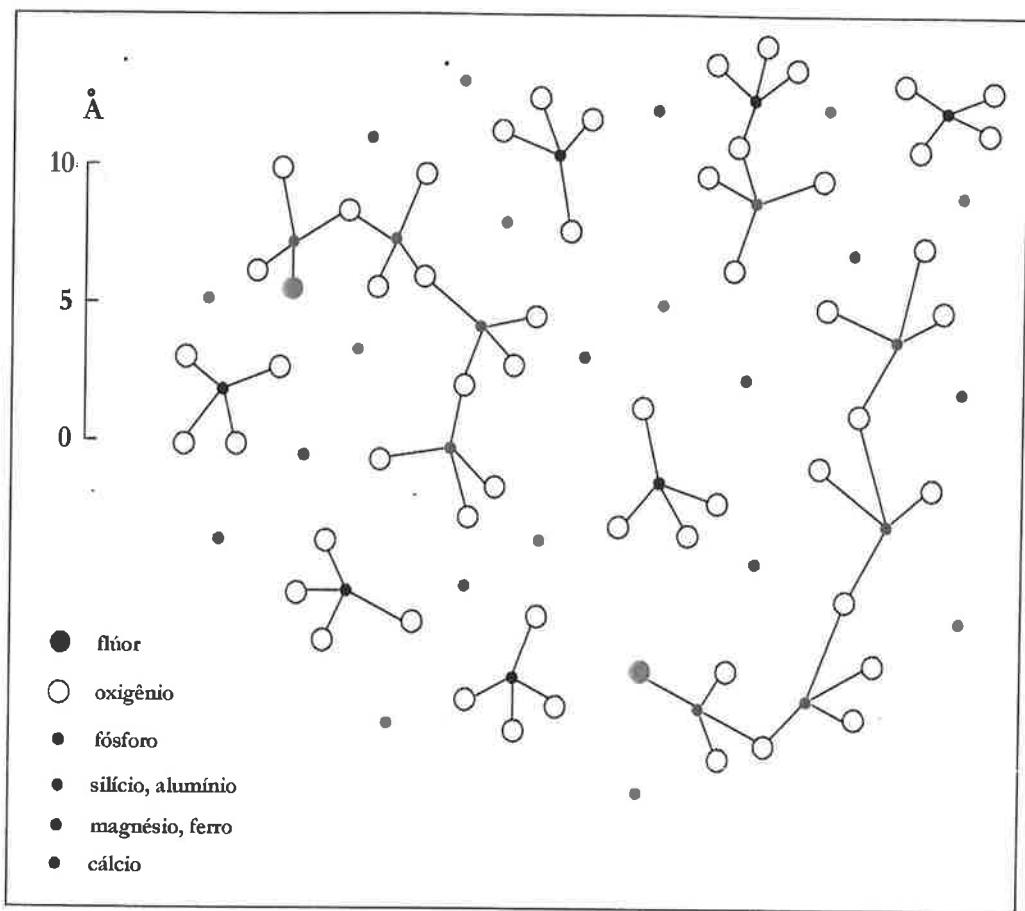
16 a 22% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>;  
25 a 35% de CaO;  
15 a 20% de MgO;  
20 a 30% de SiO<sub>2</sub>;  
0,5 a 1% de F<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;  
1 a 2% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;  
3,5 a 4,5% de FeO;  
1 a 1,5% de F e  
alcalinidade: 50% em equivalentes de CaO

Esse autor relata ainda que de 90 a 95% dos componentes acima relacionados são normalmente solúveis em solução aquosa de ácido cítrico a 2%. Assim como os demais termofosfatos, o FMP é insolúvel em água.

O aquecimento da mistura de matérias-primas utilizada na produção do FMP a uma temperatura superior à de seu ponto de fusão faz com que os diferentes íons presentes no meio adquiram mobilidade suficiente para causar o desaparecimento das estruturas cristalinas inicialmente existentes. O resfriamento imediato do material obtido nessa operação evita que haja uma possível recristalização do mesmo.

Com isso, a maior parte do produto apresenta-se numa forma vítrea, solúvel, onde podem ser encontradas pequenas quantidades de cristais tanto de apatita, como de forsterita (Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) (GUARDANI, 1982). A Figura IV.10. extraída originalmente de ANDO (1961), traz uma ilustração da estrutura do FMP na fase vítrea.

Como se observa, existem cadeias de polissilicatos de alguns mero de SiO<sub>4</sub>, cujo comprimento varia de 5 a 10 Å. Como o silício, também o fósforo apresenta-se na forma de ânion ortofosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>). No entanto, uma vez que tal íon é proveniente de ácido mais forte que o íon silicato, o fósforo encontra-se isolado na estrutura, ao passo que o silício está polimerizado.



**Figura IV.10. Estrutura da fase vítrea assumida pelo termofosfato magnesiano fundido pós-resfriamento**

Fonte: GUARDANI (1982)

Além disso, distribuídos ao longo da estrutura, cálcio e magnésio aparecem cercados por átomo de oxigênio de acordo com seu número de coordenação (de 6 a 8 para o  $\text{Ca}^{2+}$  e 6 para o  $\text{Mg}^{2+}$ ). Fenômeno semelhante ocorre para o ferro sob a forma de  $\text{Fe}^{2+}$ , e para parte do alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ). Este último inclusive, da mesma forma que o cátion férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) pode ligar-se em cadeia polimérica com o  $\text{SiO}_4$ .

Entretanto, como os teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  não chegam a perfazer juntos mais de 3% da massa total de FMP, a influência desses compostos nas características desse produto é vista como desprezível. Finalmente o flúor, então presente sob a forma aniônica  $\text{F}^-$ , aparece combinado com silício na cadeia de polissilicato, atuando como substituinte do oxigênio.

Pelo esquema apresentado na Figura IV.10., depreende-se que o termofosfato magnesiano fundido é formado por elementos livres de qualquer estrutura cristalina definida, sendo que as pequenas quantidades de cristais presentes devem em muito sua existência, à fusão insuficiente das matérias-primas, ou ainda, ao resfriamento eventualmente lento da massa reacional fundida.

#### **IV.2.3.4 Produção de termofosfatos no Brasil**

Pelo conteúdo antes apresentado observa-se que pela via seca de processo é possível gerar uma gama variada de produtos. No entanto, por razões em sua quase totalidade de ordem econômica, a indústria brasileira se interessa já há muitos anos, apenas pela obtenção em escala industrial do termofosfato magnesiano fundido.

Dante desse quadro, são indicados a seguir pela Tabela IV.11 os volumes de produção de FMP gerados no país entre 1992 e 2001, assim como o percentual de contribuição deste para o total de fertilizantes fosfatados produzidos no período.

**Tabela IV.11. Dados anuais de produção de fertilizantes fosfatados e de termofosfato magnesiano fundido (FMP) entre 1992 e 2002 (\*)**

Ano	Produção de Fertilizantes Fosfatados	Produção de FMP	Contribuição do FMP no total
	(t/ano)	(t/ano)	(%)
1992	3412581	101831	2,98
1993	4090272	107397	2,63
1994	4560746	124489	2,73
1995	4091705	99206	2,42
1996	4315614	126752	2,94
1997	4769960	125771	2,64
1998	4929823	145033	2,94
1999	4979178	91216	1,83
2000	5447941	115619	2,12
2001	5471135	101194	1,85
2002	5697772	130149	2,28

Fonte: Adaptado de ANDA (Anuários: 1992-2002)

(\*): valores expressos em toneladas de produto

Além da mencionada ausência de diversidade de tipos, a produção industrial de adubos fosfatados pela via seca é também monopolizada; a totalidade da produção nacional antes apontada está a cargo exclusivamente da FERTILIZANTES MITSUI S.A., cujo parque industrial localiza-se na cidade de Poços de Caldas – MG.

Segundo os dados constantes da Tabela IV.11, a MITSUI pôs à disposição do mercado interno, no ano de 2002, um total de 130149t de FMP, que se por um lado contribuíram com apenas 2,28% do total nacional no período, corresponderam, por outro a uma marca expressiva na série histórica desse processamento, superada tão somente pelo desempenho de 1998. Nesse ano em particular, a MITSUI registrou seus melhores índices de produtividade dentro do período em avaliação atingindo um volume de produção correspondente a 80,6% de sua capacidade instalada.

Como reportado anteriormente, muito embora para a maioria dos especialistas em fertilização o FMP seja um produto com boa capacidade de adaptação aos solos nacionais, sua participação dentro do grupo de fertilizantes fosfatados é bastante discreta. Basta ver que ao longo do período em análise, o produto registrou uma contribuição média para o montante global de produção de apenas 2,5% sendo que suas marcas mais expressivas de produção, atingidas respectivamente nos anos de 1996 e 1998, não alcançaram sequer o patamar de 3% do total gerado no país.

Aspectos tais como o dispêndio elevado de capitais para a implantação das unidades produtivas e a sensibilidade do processo ao custo e à disponibilidade de energia elétrica são apontados pelos estudiosos do tema como as principais razões para a pequena representatividade do FMP junto ao setor produtivo nacional.

A dependência de quantidades expressivas de energia para o desenvolvimento da produção de FMP é de fato notória. Essa afirmativa pode ser fundamentada por meio da comparação direta entre o consumo energético desse processamento e os das manufaturas de outros fertilizantes que compõem o grupo dos fosfatados como o SSP e o TSP. A fim de justificar essa afirmativa, são apresentados a seguir pela Tabela IV.12, valores de consumos energéticos – expressos em GJ por tonelada P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – para cada uma das etapas que constituem os referidos processos.

**Tabela IV.12. Consumos energéticos específicos despendidos respectivamente pelos processos de produção de SSP, TSP e FMP**

FERTILIZANTE FOSFATADO	FMP <sup>(***)</sup>	SSP <sup>(**)</sup>	TSP <sup>(**)</sup>
ETAPA DE PROCESSO (*)			
mineração da rocha fosfática	0,22	0,20	0,23
britagem e homogeneização	0,07	0,07	0,02
concentração da rocha fosfática	-	0,57	0,17
secagem da rocha fosfática	-	1,52	0,46
produção de ácido fosfórico	-	-	3,14
manufatura do produto	21,60	0,35	0,56
secagem do produto	1,30	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>23,19</b>	<b>2,71</b>	<b>4,58</b>

(\*): valores expressos em GJ/t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

(\*\*): Fonte: BRUNO et al. (1985)

(\*\*\*): Fonte: GUARDANI (1987)

Pelos dados acima apresentados, observa-se que o consumo global específico de energia para a produção de FMP (23,19GJ/t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) supera em quase oito vezes e meia o do SSP (2,71GJ/t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e em mais de cinco vezes o do TSP (4,58GJ/t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Essa marcante diferença é imposta em essência, pela demanda de energia do estágio de manufatura desse produto, em que, como reportado por GUARDANI (1987), são consumidos 21,6GJ por tonelada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para realizar a fusão das matérias-primas empregadas no processo.

Deve-se ainda acrescentar que as diferenças de desempenho energético entre os três produtos poderiam ser ainda maiores, caso a rocha fosfatada empregada na produção do FMP não apresentasse teores de fósforo da ordem de 25%, fato que por si desobriga a realização dos tratamentos de concentração e secagem previamente à sua utilização.

Por outro lado, um excedente de energia da ordem de 1,3GJ/t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> deve também ser creditado à fabricação do FMP por conta da secagem do produto obtido após o resfriamento rápido do material fundido.

A influência dos custos de produção na composição do preço final do FMP a ser distribuído no mercado interno fica evidente, por exemplo, tomando-se como referência os levantamentos realizados pelo Instituto de Desenvolvimento Industrial de Minas Gerais (INDI).

Segundo essa instituição, criada pelo Governo de Minas Gerais com o intuito de ampliar e consolidar o parque fabril do Estado, uma saca contendo 50kg de FMP foi comercializada durante o mês de junho-2002 a um valor médio de R\$22,00 – por volta de US\$7,86 à época. Considerando-se que o termofosfato magnesiano fundido contém por volta de 20% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, é possível estimar que, na referida ocasião, a tonelada de fósforo adquirida sob a forma de FMP custava pouco mais de US\$785,00 para o consumidor final no mercado varejista.

Apenas a título de comparação, informações da mesma fonte dão conta que no mesmo período, igual quantidade desse macronutriente primário, disponível no entanto na forma de SSP, cuja concentração de fósforo é igualmente de 20%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, era adquirida por um valor ligeiramente superior a US\$626,00 junto aos mesmos centros de distribuição.

#### **IV.2.4. Cadeia produtiva do FMP**

Baseando-se novamente no enfoque do "berço ao portão da fábrica" da ACV, que restringe os ciclos de vida dos produtos somente aos estágios referentes ao seu processamento, um sistema de produto capaz de retratar a produção do FMP deverá contemplar as seguintes etapas industriais:

- mineração e tratamento preliminar da rocha fosfática;
- obtenção e tratamento das fontes de sílica e de magnésio;
- produção de termofosfato magnesiano fundido (FMP)

Diferentemente do TSP, o qual é fabricado em escala econômica no país por mais de uma empresa do setor de fertilizantes, o fato da obtenção de FMP ser ainda hoje privativa de MITSUI FERTILIZANTES S.A. incide diretamente na definição das fronteiras do sistema usado para retratar tal processamento.

Caberá a este último, portanto, compreender as operações e procedimentos praticados pela já mencionada empresa, na forma e seqüência como aparecem descritas a seguir pela Figura IV.11.

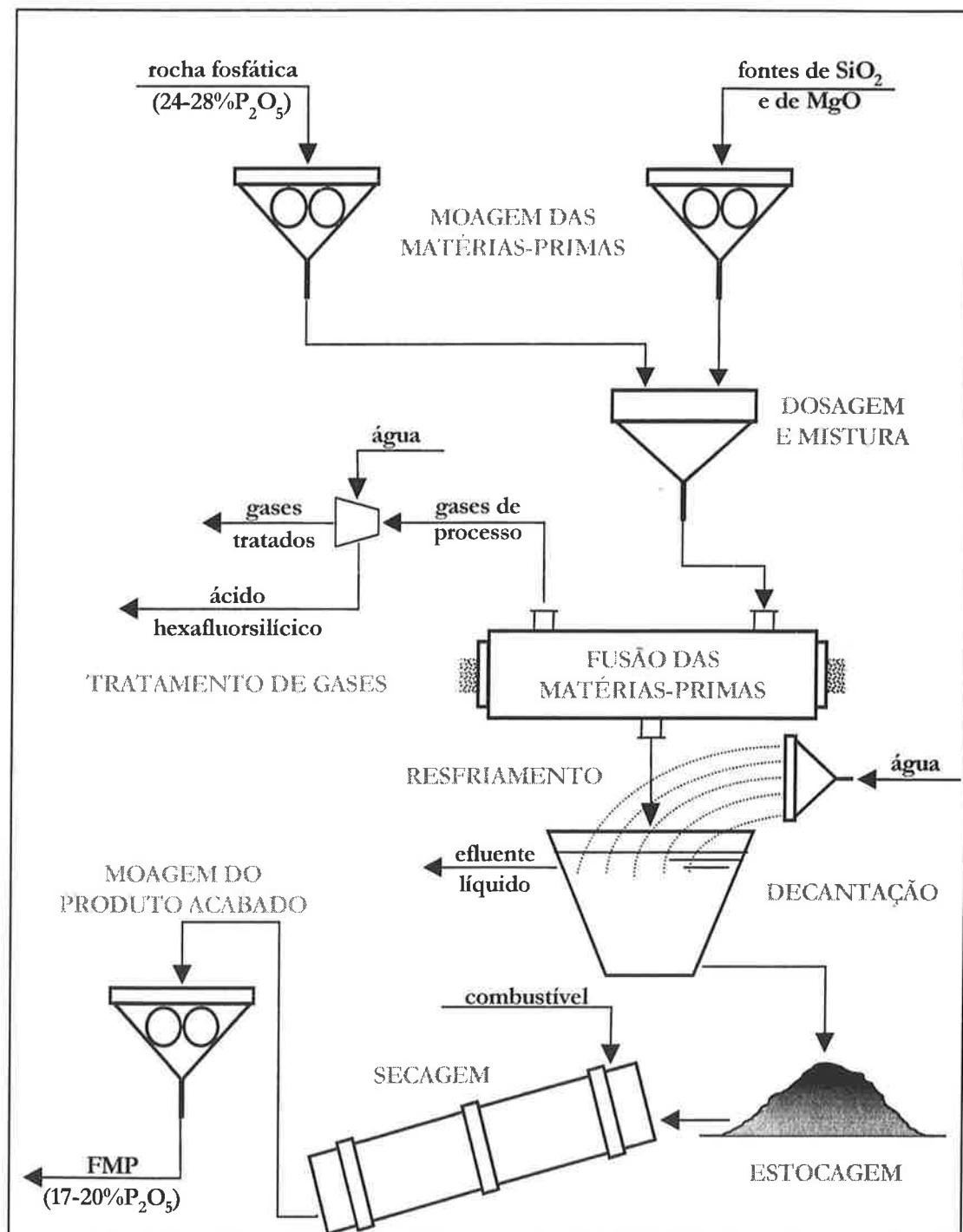


Figura IV.11. Representação esquemática do processo de produção de FMP

praticado pela MITSUI FERTILIZANTES S.A.  
FONTE: Adaptado de BRUNO et al. (1985)

#### **IV.2.4.1 Mineração e tratamento preliminar da rocha fosfática**

A principal fonte de fósforo usada pela MITSUI no processo de produção de FMP é o mineral apatítico proveniente de Araxá – MG. A lavra desse recurso natural cujos teores de fósforo atingem valores entre 24 e 28% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ocorre de maneira bastante semelhante àquela descrita antes no ciclo de vida do TSP.

Antes de ser enviada à unidade de produção de FMP, a rocha lavrada em Araxá, é britada até adquirir tamanho de partícula adequado ao seu processamento, o qual deve variar entre  $\frac{3}{4}$  e  $1\frac{1}{2}$ ". Logo após seu recebimento, as matérias-primas fosfatadas são transferidas com o auxílio de um sistema de correias transportadoras para silos fechados, dentro dos quais permanecerão armazenadas até sua utilização.

#### **IV.2.4.2 Obtenção e tratamento das fontes de sílica e de magnésio**

Além do mineral de apatita, a tecnologia de produção do FMP conta ainda em sua relação de insumos com sais de sílica e de magnésio. GUARDANI (1983) relata que os objetivos principais da adição desses materiais à rocha fosfatada são:

- abaixamento do ponto de fusão da mistura reagente e
- formação de um produto constituído por uma fase vítreia, onde o fósforo se apresenta segundo uma forma solúvel quando em presença de soluções de ácidos fracos.

Em geral, as necessidades de sílica e magnésio do processo são supridas por silicatos naturais de magnésio contendo serpentino – Mg<sub>6</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub> (OH)<sub>8</sub> – ou olivina – (Mg, Fe<sup>2+</sup>)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>.

A escória industrial gerada em princípio como rejeito do processamento de ligas de ferro-níquel, constituída essencialmente SiO<sub>2</sub> e MgO, encontra também boa aceitação, tanto em virtude dos bons resultados demonstrados no que se refere ao seu desempenho de processo, quanto de seu baixo custo de aquisição.

No caso particular da MITSUI, a escória magnesiana utilizada no processo é obtida na região central do país, mais especificamente em Niquelândia – GO. Assim como a rocha, os compostos de sílica e magnésio deverão ser britados previamente à sua transferência para a unidade de produção, onde permanecerão estocados em silos de armazenamento ou depósitos a céu aberto aguardando uso.

#### **IV.2.4.3 Manufatura do termofosfato magnesiano fundido (FMP)**

A etapa de manufatura propriamente dita do FMP, se inicia com a preparação da carga de material que irá alimentar o forno de fusão. As matérias-primas fosfatada e sílico-magnesianas são retiradas de seus locais de estocagem por pás carregadeiras e levadas para pesagem em balanças dosadoras, as quais se encarregarão de compor da maneira mais precisa possível a mistura reagente. Concluída essa operação, os insumos serão despejados sobre uma correia transportadora que cuidará de transferi-los até um elevador de canecas de onde estes seguirão finalmente para o interior do forno (SILVA, 1979).

A tecnologia para obtenção dos termofosfatos fundidos assemelha-se bastante àquelas empregadas nas produções de seus homólogos calcinados, particularmente quanto às operações de moagem e preparação da carga. Entretanto, como a fusão dos reagentes ocorre normalmente sob condições mais severas do que aquelas praticadas nos processamentos dos termofosfatos desfluorizado, Rhenânia e calcinado japonês, certos cuidados no projeto e na operação dos fornos devem ser observados.

Os fornos de fusão elétricos do tipo arco direto são projetados para operar em regime descontínuo e a elevadas temperaturas. Em virtude da natureza corrosiva da carga fundida gerada no processo, é prudente que esta última seja mantida, sempre que possível, distante do material refratário que reveste internamente a unidade; para tanto, é aconselhável a criação entre ambos de uma camada de produto solidificado, conseguida, por sua vez, pelo resfriamento das paredes externas do forno por meio de chuveiros com água. Mesmo com todas as precauções antes relatadas, SILVA (1979) assinala que a MITSUI costuma substituir todo o isolamento térmico interno de seus fornos de fusão aproximadamente a cada 7 meses.

A fusão da mistura reagente é levada a cabo entre 1350 e 1450°C. Para que tal transformação ocorra, são empregados eletrodos de grafite, que por serem mantidos

em contato direto com o material reagente e estarem sujeitos a condições extremas de temperatura, vão sendo paulatinamente consumidos com o seguimento do processo. SILVA (1979) reporta que para cada tonelada de FMP produzida pela MITSUI, são consumidos em média 4,5kg de grafite em cada eletrodo.

Tão logo a temperatura no interior do forno atinja entre 80 e 90°C inicia-se o desprendimento de flúor sob a forma de HF em fase gasosa, emanado dos minerais de apatita. Dado o interesse em obter-se um produto final com teores reduzidos desse composto, essa corrente gasosa é evacuada através de uma válvula de alívio instalada na parte superior do equipamento. A disposição desse rejeito no meio ambiente é precedida da passagem do mesmo por um sistema de lavagem de gases.

Segundo relatos de BRUNO et al. (1985), confirmados depois pelos ensaios exploratórios conduzidos por FERREIRA (2001), a necessidade de temperaturas com tão elevada magnitude durante a fusão acaba por imputar ao sistema, um consumo de energia elétrica da ordem de 1200kWh/t de produto obtido.

O tempo de residência do material no interior da unidade pode variar de 1½ a 2 dias. Vencido esse período, será providenciada sua remoção por meio de um dreno situado cerca de 2m acima do fundo do forno de fusão. À saída, o fundido é resfriado rapidamente por contato direto com um jato de água mantida à temperatura ambiente.

A adoção desse processo de resfriamento encontra fundamentação técnica nos trabalhos realizados por ANDO (1958). Para o autor, o resfriamento lento da carga fundida favorece a recristalização da apatita. Dessa forma, a fim de garantir que a solução iônica gerada resulte solúvel em extratores orgânicos ácidos, ANDO (1958) recomenda que o fundido seja levado ao estado vítreo através do resfriamento instantâneo.

SILVA (1979) relata que para a produção de FMP, a MITSUI despende por ocasião desse resfriamento rápido uma quantidade de água superior em 20 vezes ao fluxo de material fundido que verte do forno.

Por conta do resfriamento instantâneo, uma suspensão com aproximadamente 5% em massa de material sólido, dimensões inferiores a 2mm, aspecto granular e coloração enegrecida acaba sendo gerada.

Da saída do forno, a suspensão é bombeada para tanques de decantação, nos quais providencia-se a remoção de água do produto até que o mesmo atinja teores de sólidos suspensos da ordem de 90%.

Ao deixar o sistema, a fração líquida que compõe o sobrenadante encontra-se a uma temperatura superior aos 40°C; tão logo esse fluxo seja resfriado, o que deverá ocorrer sem qualquer interferência externa, será providenciado seu lançamento em um corpo receptor localizado nas circunvizinhanças da unidade fabril.

O material decantado é, por sua parte, transferido por pás carregadeiras a uma área de armazenamento a céu aberto, onde será empilhado em pequenos montes de forma a facilitar sua secagem natural. Atingido um teor de umidade próximo de 5%, o produto é então novamente transportado, agora para um secador rotativo.

A secagem induzida do FMP é realizada por contato direto com ar, aquecido previamente em uma fornalha por queimadores a gás natural; durante essa operação são consumidos em média 13m<sup>3</sup> de combustível por tonelada de produto.

O tempo de residência do produto no interior do equipamento pode variar de 30 a 40 minutos. A operação de secagem ocorre no sentido co-corrente, ou seja, com o produto e os fumos de combustão fluindo segundo correntes paralelas com mesmo sentido de orientação. Os gases que deixam o secador passam primeiramente por um ciclone, no qual efetua-se a recuperação do material particulado por eles arrastados, para depois então serem dispostos no meio ambiente. O produto que deixa o secador rotativo contém um máximo de umidade de 1%.

Da etapa de secagem, o material é enviado para uma sessão de moagem, onde bolas de aço forjado com diâmetro variando entre 1½ e 2" se encarregarão de triturá-lo até que pelo menos 75% deste seja passante em peneiras de 100 mesh. Cumprida a moagem, o produto é acondicionado em sacos de 50kg e armazenado no depósito de produto acabado.

De acordo com YASUDA & SOUZA (2003), a MITSUI FERTILIZANTES S.A. coloca à disposição do mercado nacional, um termofosfato magnesiano fundido insolúvel em água e de características alcalinas – seu pH está em torno de 8,0 – cuja composição média apresenta os seguintes teores: 18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (sendo cerca de 92% deste solúvel em solução de ácido cítrico a 2%), 20% de CaO, 25% de SiO<sub>2</sub> e 7% de MgO e menos de 1% de F.

## V. MÉTODO DE ANÁLISE E DESENHO AMBIENTAL DE PROCESSOS

### V.1 Introdução

Conforme foi visto no capítulo anterior, para a execução de uma boa Análise de Inventário recomenda-se a formulação de alguns requisitos fundamentais, a saber: conhecimento, o mais detalhado possível, dos processos objeto do estudo de ACV; e elaboração de um fluxograma que represente o mais fielmente possível o sistema de produto. Após terem sido atendidos tais requisitos preparatórios, a execução do ICV consiste, em essência, da coleta e tratamento dos dados.

Muito embora a norma ISO 14041 (ISO, 1998) dedique parte de seu conteúdo à descrição de procedimentos orientativos usados para a elaboração do ICV, esta pode ser conduzida sob diversos enfoques. No entanto, independentemente da forma de abordagem adotada para a realização desse procedimento, o praticante da ACV deverá esperar em qualquer caso um elevado dispêndio de recursos e de tempo para que conclusões consistentes sejam alcançadas.

Cientes desses obstáculos, os pesquisadores do *Grupo de Análisis y Gestión Ambiental – AGA*, da Universitat Rovira i Virgili – URV, de Tarragona – Espanha, decidiram empenhar esforços no sentido de tornar a execução de uma ACV mais ágil e econômica, sem no entanto sacrificar a qualidade e a precisão de seus resultados.

Após intensas pesquisas, a equipe coordenada pelo Prof. Dr. Francesc Castells i Piqué achou-se em condições de propor um método capaz de fazer da elaboração do ICV um procedimento mais eficiente e versátil. O produto desse esforço foi batizado por seus criadores com o nome de *Metodología para el Análisis y Diseño Ambiental de Procesos – MADAP*.

Em linhas gerais, o procedimento desenvolvido pela antes referida equipe de pesquisadores consiste em criar modelos que simulem os processos representados nas unidades de processo do fluxograma; coletar os dados e organizá-los na forma de uma planilha de informações; e criar uma interface computacional que estabeleça a comunicação entre os simuladores de processo e as planilhas de dados de maneira a fornecer o resultado do ICV na forma de *Eco-vetores*. Esta metodologia foi adotada para a elaboração do ICV do presente trabalho e será descrita em detalhes a seguir.

A fim de facilitar o entendimento do leitor esta descrição será iniciada com o “produto final” da metodologia, ou seja, os Eco-vetores.

## V.2 Aplicação do método de Eco-Vetores para a elaboração do ICV

A Metodologia de Eco-vetores foi proposta por CASTELLS et al. (1995) e parte da premissa de que o procedimento de atribuição de aspectos ambientais às correntes que circulam através das fronteiras de um sistema de produto pode ser feito por meio da construção de um *veto*, ao qual são associadas informações relativas ao consumo dos recursos e a disposição de rejeitos.

Dentro ainda da mesma abordagem, quaisquer das correntes que fizerem parte de um sistema de produto terão a si vinculadas um vetor multidimensional – para o qual cada dimensão corresponde a um determinado aspecto ambiental – denominado genericamente *Eco-vetor*.

Assim sendo, a uma corrente de massa genérica ( $M$ ) do sistema de produto cuja quantidade transportada seja expressa, por exemplo, por unidades do Sistema Internacional – SI, portanto [ $kgM/s$ ] será associado um vetor ( $v_M$ ), cujos aspectos ambientais deverão, por sua vez, ser indicados por meio de unidades equivalentes de massa e energia, tais como [ $kg\text{ matéria poluente} / kgM$ ] e [ $kJ\text{ de energia} / kgM$ ], respectivamente.

Para certos aspectos ambientais cujas quantidades não possam ser traduzidas em unidades de massa ou energia – casos da radiação ou intensidade acústica, que no sistema MKS são medidas em [ $W/m^2$ ]), CASTELLS et al. recomendam que seja feito uso da sigla EL, referente ao termo “*Environmental Load*”, o qual, ao ser traduzido à língua portuguesa, pode ser entendido como Carga Ambiental.

Logo, se o aspecto ambiental ‘radiação de energia’ estivesse hipoteticamente associado à corrente mássica ( $M$ ), a quantidade a ele atribuída constaria de ( $v_M$ ) sob as unidades [ $EL / kgM$ ].

Ao dar um tratamento vetorial às interações entre o sistema de produto e o meio ambiente, CASTELLS et al. pretendem que os aspectos ambientais em questão sejam expressos na forma de unidades capazes de ser acumuladas, o que viria a facilitar significativamente a elaboração de futuros balanços de massa e energia. A Figura V.1. mostra um Eco-vetor mássico ( $v_M$ ), no qual estão agrupadas diferentes classes de aspectos ambientais.

A literatura mostra exemplos de listas de aspectos ambientais representados sob uma forma semelhante àquela adotada pelos Eco-vetores, em trabalhos anteriores e posteriores a sua criação, tais como aqueles realizados por BOUSTEAD (1993) e FRISCHKNECHT et al. (1996).

$$v_M = \begin{bmatrix} (\text{kg/kg}) \text{ ou } (\text{EL/kg}) \\ \text{Recursos renováveis} \\ \text{Recursos não renováveis} \\ \text{Emissões para o ar} \\ \text{Emissões para água} \\ \text{Resíduos sólidos} \\ \text{Radiação} \\ M \\ \text{Outros impactos ambientais} \end{bmatrix}$$

**Figura V.1. Exemplo da representação de um Eco-vetor mássico ( $v_M$ )**  
Fonte: CASTELLS et al (1995)

O produto de uma corrente mássica ( $M$ ), expressa em  $[\text{kgM / s}]$  por seu Eco-vetor correspondente ( $v_M$ ), representa uma quantidade de poluente ( $P$ ) – expressa em  $[\text{kg de poluente/s}]$  ou ainda  $[\text{EL/s}]$  – gerada até aquela determinada etapa do ciclo de vida do produto em estudo, como demonstrado a seguir pela equação Eq. 15:

$$M \cdot v_M = P \quad (\text{Eq.15})$$

De maneira análoga à dos Eco-vetores mássicos, é também possível definir-se para um fluxo energético ( $E$ ) qualquer, expresso em unidades do sistema MKS por  $[\text{kJE / s}]$ , um Eco-vetor ( $v_E$ ) em que os aspectos ambientais nele contidos possam ser quantificados, tanto em termos mássicos –  $[\text{kg de matéria poluente / kJE}]$  – e energéticos –  $[\text{kJ de energia consumida / kJE}]$ , quanto na forma genérica de carga ambiental  $[\text{EL / kJE}]$ . Assim, as dimensões que constituem um Eco-vetor energético ( $v_E$ ) apresentam elementos semelhantes àqueles compreendidos nos Eco-vetores mássicos, conforme pode ser visto no esquema constante da Figura V.2.

$$v_E = \begin{bmatrix} (\text{kg/kJ}) \text{ ou } (\text{EL/kJ}) \\ \text{Recursos renováveis} \\ \text{Recursos não - renováveis} \\ \text{Emissões para o ar} \\ \text{Emissões para água} \\ \text{Resíduos sólidos} \\ \text{Radiação} \\ \text{M} \\ \text{outros impactos ambientais} \end{bmatrix}$$

**Figura V.2. Representação de um Eco-vetor energético ( $v_E$ )**

Fonte: CASTELLS et al (1995)

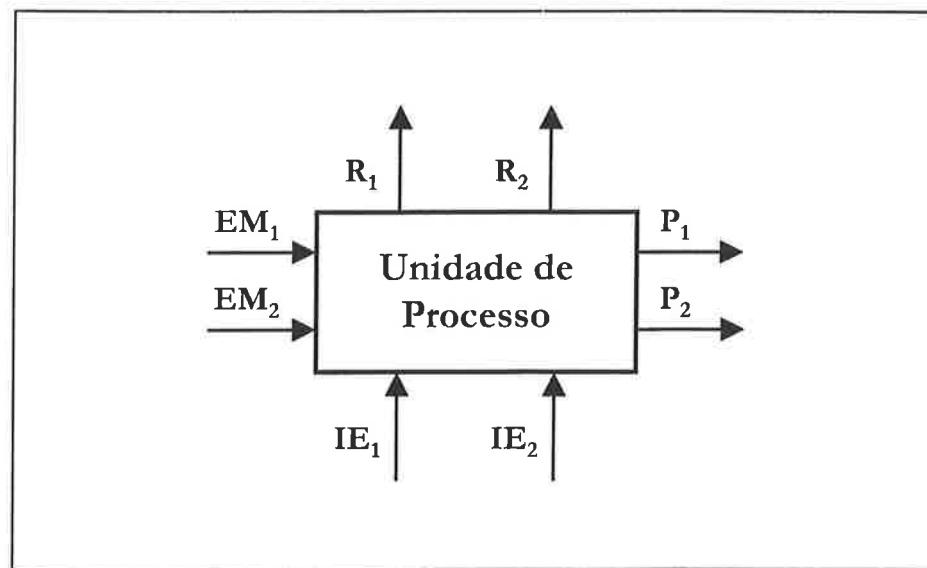
Também o produto de uma corrente de energia ( $E$ ), expressa em  $[KJ/kg]$ , por seu Eco-vetor ( $v_E$ ) correspondente, resulta no fluxo de poluentes representado pelo vetor ( $P$ ) –  $[kg / s]$  ou  $[EL / s]$  – gerados durante a produção de energia, conforme demonstra a equação Eq. 16:

$$E \cdot v_E = P \quad (\text{Eq.16})$$

Como demonstrado pelas equações Eq. 15 e Eq. 16, os aspectos ambientais relacionados às correntes de massa e de energia de um sistema de produto podem ser manipuladas conjuntamente, uma vez que em ambos os casos são gerados vetores ( $P$ ) expressos em unidades comuns.

Raciocinando agora sob outro enfoque, o fato de se lançar mão do recurso de Eco-vetores associados às correntes de entrada e saída de um sistema, garante que os balanços materiais e energéticos que ocorrem no mesmo sejam consistentes. Para que tal afirmativa possa ser justificada, considere-se determinada unidade de processo de um sistema de produto tal como aquela representada a seguir na Figura V.3.

No esquema indicado pela figura acima, as correntes  $EM_1$  e  $EM_2$  representam entradas materiais da unidade de processo, enquanto que as setas identificadas pelos códigos  $IE_1$  e  $IE_2$  referem-se a correntes de energia. De maneira análoga, as correntes  $P_1$  e  $P_2$  que deixam o mesmo sistema, indicam os produtos gerados em decorrência das transformações nele ocorridas, ao passo que  $R_1$  e  $R_2$  caracterizam a geração de rejeitos.



**Figura V.3. Unidade de processo de um sistema de produto**

Fonte: Adaptado de CASTELLS et al. (1995)

Como mencionado anteriormente, de acordo com a metodologia proposta por CASTELLS et al., estão associados às correntes que circulam através das fronteiras do sistema, Eco-vetores que contenham informações referentes ao consumo dos recursos e à geração dos rejeitos inerentes a essas quantidades. Para o exemplo em questão, esses Eco-vetores passam então a ser denominados, respectivamente, por  $v_{EM1}$  e  $v_{EM2}$  para as correntes materiais de entrada;  $v_{IE1}$  e  $v_{IE2}$  para o caso das correntes de energia;  $v_{P1}$  e  $v_{P2}$ , para os produtos e  $v_{R1}$  e  $v_{R2}$  para rejeitos.

Da realização do balanço de aspectos ambientais para a unidade de processo sob avaliação, resultará uma expressão homóloga àquela apresentada a seguir pela equação Eq.17:

$$EM_1*v_{EM1} + EM_2*v_{EM2} + IE_1*v_{IE1} + IE_2*v_{IE2} = P_1*v_{P1} + P_2*v_{P2} + R_1*v_{R1} + R_2*v_{R2} \text{ (Eq.17)}$$

Um sistema de produto compõe-se de diversas unidades de processo. Logo, é bastante razoável supor que ao longo do mesmo, sejam introduzidas  $X$  correntes de matéria e  $Y$  correntes de energia, que acabarão, por sua vez, sendo transformadas em  $Z$  produtos à custa de processamentos nos quais são gerados ainda  $W$  quantidades de rejeitos. Assim, tomando-se por base a abordagem proposta por CASTELLS et al., o balanceamento de cargas ambientais para o referido sistema seria alcançado por meio de uma expressão análoga àquela apresentada a seguir pela equação Eq. 18:

$$\sum_{X=1}^n EM_X * V^{EM}_X + \sum_{Y=1}^n IE_Y * V^{IE}_Y - \sum_{W=1}^n R_W * V^R_W = \sum_{Z=1}^n P_Z * V^P_Z \quad (\text{Eq.18})$$

na qual entende-se por:

EM – correntes de massa que entram no sistema

IE – correntes de energia que entram no sistema

R – corrente de saída de rejeitos

P – correntes de saída de produtos

V – Eco-vetores mássicos e energéticos associados a suas respectivas correntes

Atenção especial deve ser dispensada ao fato de os Eco-vetores associados às correntes de rejeitos serem constituídos por aspectos ambientais de sinais contrários aos das demais correntes ligadas ao sistema, pelo fato destes representarem cargas ambientais impostas sobre o meio ambiente. Por uma questão meramente algébrica CASTELLS et al. recomendam inclusive, que esses mesmos Eco-vetores apresentem sinais negativos.

Tal como apresentado pela equação Eq.18, as cargas ambientais associadas aos produtos serão calculadas pela soma entre as cargas introduzidas juntamente com as correntes que entram no sistema, e aquelas geradas pelas transformações que nele ocorrem.

Caso qualquer das unidades de processo do sistema de produto opere apenas em regime descontínuo, CASTELLS et al. recomendam que os balanços de aspectos ambientais sejam realizados de maneira análoga àquela indicada para os sistemas contínuos; no entanto, para casos como esse os mesmos autores sugerem que seja providenciada previamente uma substituição na base de cálculo. A quantidade de rejeitos deixa de ser expressa por unidade de tempo, para ser então medida por massa de produto gerado, ou seja, *[kg de matéria poluente / kg produto]*.

## V.3 Metodologia MADAP

### V.3.1 Modelagem do sistema de produto

A metodologia se inicia pela modelagem do sistema de produto. Por meio desse procedimento pretende-se que sejam quantificados não apenas os consumos de recursos materiais e energéticos, mas também os rejeitos gerados pelo sistema em estudo.

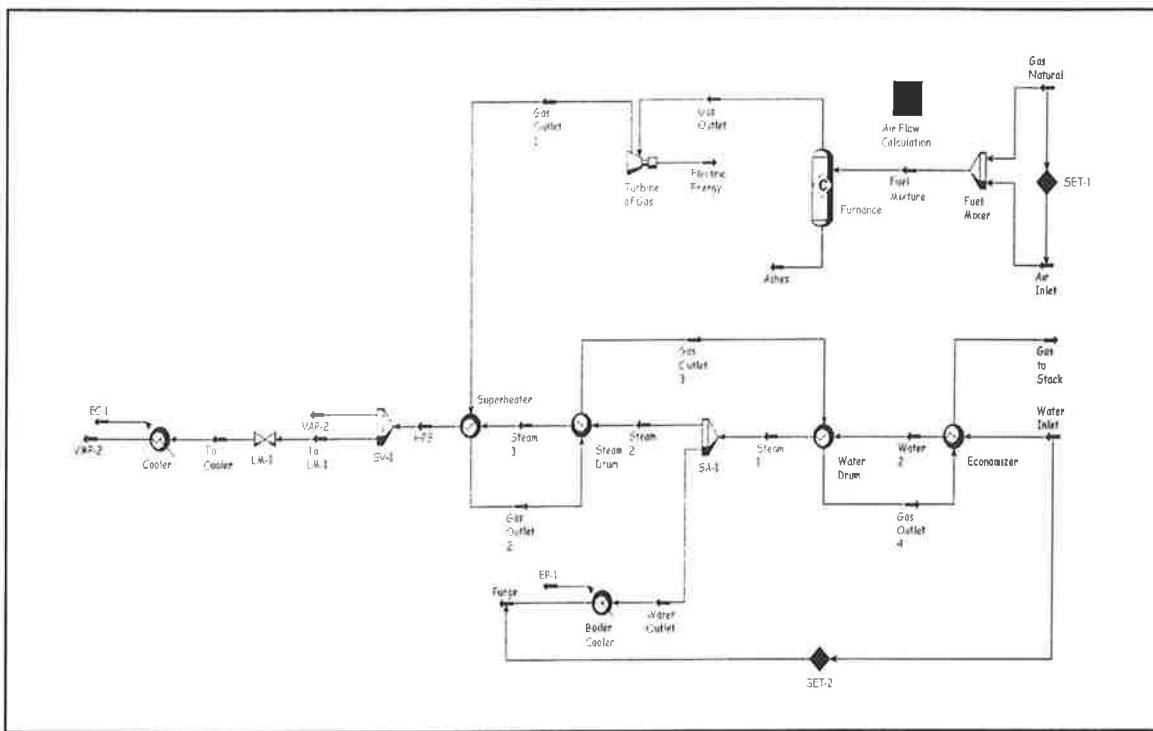
A opção pelo uso de simuladores comerciais de processo durante a elaboração do ICV, acaba sendo justificada pela capacidade demonstrada por esses recursos em prever parâmetros e condições de processo de maneira rápida e segura.

De acordo com HERRERA et al.(2002a), a mesma característica possibilita ainda que tanto o projeto de novos processos, quanto a otimização do funcionamento de instalações já existente sejam realizados com grau satisfatório de eficiência.

Por outro lado, ainda na mesma referência os autores chamam a atenção da comunidade científica para dois aspectos bastante importantes do uso de ferramentas de predição dessa natureza: quando empregada em estudos voltados à determinação do perfil de desempenho ambiental de um sistema, a modelagem de processos deve procurar retratar com o mais elevado grau de fidelidade possível as condições reais de operação do mesmo. Além disso, tendo em vista que a consistência dos resultados proporcionados por qualquer modelo depende da qualidade da informação de que este se serve, torna-se imperiosa a aplicação de procedimentos para a validação dos dados tão logo o modelo esteja constituído.

No esquema que consta da Figura V.4. um exemplo do uso de simuladores comerciais de processo para a elaboração de modelos virtuais que operam em estado estacionário aparece representado.

O modelo em questão refere-se especificamente à unidade de processo de geração de energia elétrica de uma planta de co-geração com ciclo-combinado por turbina a gás, instalada na cidade de Tula – México, concebida originalmente para operar com capacidade nominal de 300000KWh de energia.



**Figura V.4. Simulação do módulo de processo de geração de energia da Central Termelétrica de Tula – México**

Fonte: HERRERA et al. (2002b)

A simulação acima apresentada foi elaborada pelos pesquisadores do grupo AGA com o auxílio do simulador comercial de processos *Hysys Plant*© – versão 2.4.1 (AEA, Technology, 1997).

### V.3.2 Preparação da planilha de dados

A planilha de dados exerce papel de fundamental importância no processo de construção do ICV, já que apenas a partir dela será possível estabelecer uma ligação entre a unidade de simulação de processos e os Eco-vetores do sistema em estudo. Um exemplo de modelo de planilha de dados é representado a seguir na Figura V.5.

Elaborada com o auxílio do *Microsoft®Excel* – um aplicativo disponibilizado no mercado em diversas versões por Microsoft Corporation© – a planilha de dados é normalmente subdividida em duas seções principais: a primeira delas é composta por correntes materiais e energéticas de entrada do sistema, cujos valores devem ser alimentados pelo usuário do recurso computacional.

Volcado a Excel		Volcado a Hysys			
<b>PROCESS INLETS</b>					
<b>Solution - 1</b>		<b>Solution - 2</b>			
Component	Massic Fraction (%)	Component	Massic Fraction (%)		
H <sub>2</sub> O	0,93	H <sub>2</sub> O	0,37		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	0,07	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	0,63		
total	1,000	total	1,000		
Flow (kg/h)	3,00	Flow (kg/h)	66,00		
T (°C)	20,00	T (°C)	20,00		
P (bar)	1,01	P (bar)	1,01		
<b>PROCESS OUTLETS</b>					
<b>Feed</b>		<b>Water Product</b>			
Component	Massic Fraction (%)	Component	Massic Fraction (%)		
H <sub>2</sub> O	0,41	H <sub>2</sub> O	0,99		
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	0,59	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	0,01		
total	1,000	total	1,000		
Flow (kg/h)	107,00	Flow (kg/h)	32,58		
T (°C)	20,00	T (°C)	20,00		
P (bar)	1,01	P (bar)	1,01		
<b>ENERGY CONSUMPTION</b>					
<b>Pump 1: E1</b>		<b>Pump 2: E2</b>			
power (MJ/h)	0,0004	power (MJ/h)	0,0093		
<b>Cooler: E4</b>		<b>Reboiler: E5</b>			
power (MJ/h)	15,06	power (MJ/h)	502,56		
<b>Condenser: E3</b>		<b>Total Energy Comsumption</b>			
power (MJ/h)	490,38	power (MJ/h)	1008,01		

**Figura V.5. Exemplo de planilha de dados para controle de informação**  
Fonte: HERRERA et al. (2002a)

A segunda seção é destinada a receber as correntes de saída do processo. Assim, as células desta serão ocupadas por dados obtidos dos cálculos empreendidos pelo simulador de processos a partir das informações de entrada.

Além das correntes de entrada e saída, uma planilha de dados é composta ainda por dois botões de ação. O acionamento do primeiro desses botões, permite alimentar o simulador de processo com os dados que caracterizam cada uma das correntes que entram no sistema. O segundo botão de ação resgata os resultados dos cálculos realizados pelo simulador, alocando-os em células preestabelecidas durante a construção da interface de transferência, que se localizam na seção de correntes de saída da planilha de dados.

A planilha de dados cuja estrutura aparece representada na Figura V.5. foi elaborada por HERRERA et al. (2002a) com o propósito de avaliar os consumos energéticos do processo de separação de uma mistura etanol-água por destilação. Os dados empregados na construção do modelo que simula o caso em questão, foram coletados junto a uma unidade de destilação de pequeno porte.

### V.3.3. Construção da interface de transferência

Conforme relatado por HERRERA et al. (2002a), o processo de integração de duas ferramentas computacionais será possível somente caso sejam desenvolvidas determinadas estruturas de programação capazes de realizar importação e exportação de informações, usando planilhas de dados como interfaces.

Essas estruturas podem apenas ser construídas via programação de “macros” por meio da qual torna-se possível capturar um dado presente em certo aplicativo e transportá-lo até uma célula previamente definida em outro. Ao ser instalada no novo aplicativo, tal informação pode então ser tratada a fim de proporcionar resultados ao estudo, ou ainda, ser transformada para voltar a ser usada em outra transferência.

Segundo HERRERA et al (2002), a conexão entre a unidade de simulação de processos e a planilha de dados deve ser considerada sob diversos aspectos, dentre os quais dois devem merecer especial atenção. O primeiro deles está ligado à habilidade do aplicativo usado na conexão em ler a informação apresentada por certa ferramenta computacional e codificá-la segundo uma linguagem que permita à outra absorvê-la.

O segundo aspecto refere-se à capacidade desse mesmo aplicativo em efetivar as operações de transferência – ou seja, a importação e a exportação de dados – entre as ferramentas computacionais em ambos os sentidos, sem o que a atualização de informação se tornaria inviável.

### V.3.4. Elaboração do Eco-vetor de processo

A última das etapas da MADAP compreende a elaboração do Eco-vetor do processo, a qual, em termos operacionais, ocorre de maneira idêntica à da elaboração da planilha de dados.

De acordo com HERRERA et al. (2002a), o uso do mesmo expediente pode ser justificado em termos práticos essencialmente por duas razões. A primeira delas é de cunho conceitual, já que se um Eco-vetor é por definição uma lista de aspectos ambientais arranjada segundo a forma matricial, a única forma possível para a representação do mesmo seria uma tabela de dados.

A segunda razão é meramente de ordem operacional; como tanto a planilha de dados quanto o Eco-vetor de cada unidade de processo – e por conseguinte, do sistema de produto como um todo, são construídos em *Microsoft®Excel*, a integração entre ambos acaba sendo sobremaneira facilitada, ficando restrito apenas ao uso do recurso de “*colagem com vínculos*” de que esse aplicativo dispõe.

## **VI. REALIZAÇÃO DOS ESTUDOS DE ACV PARA O TSP E PARA O FMP**

Neste capítulo são apresentados os estudos de Análise de Ciclo de Vida para os fertilizantes fosfatados Superfosfato Triplo e Termofosfato Magnesiano Fundido. A fim de tornar esta exposição mais organizada e atraente, decidiu-se subdividir seu conteúdo em três partes, que correspondem, respectivamente, às etapas de Definição de Objetivos e Escopo, Elaboração do Inventário de Ciclo de Vida e Avaliação de Impactos Ambientais da ACV.

### **VI.1. Definição de objetivos e escopo**

Deu-se início ao presente trabalho científico pelas definições dos objetivos a que o mesmo se propõe, e do escopo de aplicação da metodologia para cada um dos casos sob avaliação. São apresentadas a seguir as premissas orientativas e demais considerações estabelecidas por ocasião da realização destas atividades.

#### **VI.1.1. Definição dos objetivos do estudo**

Os objetivos estabelecidos para o desenvolvimento dos estudos de ACV em questão, coincidem com objetivos desta tese de doutorado, e consistem da avaliação do desempenho ambiental dos fertilizantes fosfatados Superfosfato Triplo (TSP) e Termofosfato Magnesiano Fundido (FMP). Além da formulação dos diagnósticos ambientais dos produtos antes mencionados, o mesmo estudo irá se dedicar também à identificação de oportunidades para a melhoria de desempenho ambiental de seus ciclos produtivos.

No que se refere ao público alvo, esta pesquisa pretende também trazer uma contribuição ao crescimento do setor brasileiro de fertilizantes, fornecendo elementos capazes de incluir a variável ambiental no escopo de critérios para tomada de decisão de projetos voltados à ampliação e à remodelação do parque industrial existente.

#### **VI.1.2. Definição de escopo**

A atividade de definição de escopo compreenderá a formulação de premissas e de elementos necessários à realização das ACVs em questão.

Por conta disso, serão estabelecidos neste tópico: a função de ambos os produtos; suas unidades funcionais e fluxos de referência; o enfoque usado para a estruturação dos sistemas de produto; a definição das fronteiras dos mesmos sistemas; os critérios de qualidade de dados; os procedimentos empregados durante a alocação de cargas ambientais; as categorias de impacto selecionadas para o estudo e o método utilizado para suas avaliações; as condições necessárias para a realização de uma análise crítica dos resultados obtidos e finalmente, o tipo e o formato do relatório final.

#### **VI.1.2.1. Função dos produtos**

Considerando-se que para o caso em questão a ACV será utilizada para uma comparação ambiental entre dois produtos, deve-se necessariamente atribuir a ambos os bens de consumo sob avaliação uma mesma função.

Por conta disso, para efeito de aplicação da metodologia, selecionou-se como função tanto do TSP quanto do FMP, a capacidade de fornecer o elemento fósforo ao solo segundo uma forma que o permita ser assimilado para o crescimento de culturas.

#### **VI.1.2.2. Unidade funcional e fluxo de referência**

Para a definição de uma *Unidade Funcional (UF)* capaz de atender à função acima mencionada, partiu-se do número aleatório 1000 ao qual foi posteriormente associada a recomendação de adubação para o algodão – cerca de 40 kg/ha. Dessa abordagem resultou finalmente, o valor 41,66 (calculado pela relação 1000/24). Assim sendo, a unidade funcional empregada para os estudos de ACV de ambos os fertilizantes fosfatados foi: *fornecer 41,66 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em forma assimilável pelas plantas*.

Uma vez estabelecida a unidade funcional foram então calculados os fluxos de referência, ou seja, as quantidades de cada um dos dois fertilizantes necessárias para suprir as quantidades de pentóxido de fósforo estipulada pela unidade funcional.

Considerando que o teor no TSP é de 45% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o seu fluxo de referência será igual a 92,59 kg de TSP. Para o FMP, cujo teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> é igual a 20%, o fluxo de referência será igual a 208,33 kg de FMP.

### **VI.1.2.3. Sistemas de produto**

O enfoque utilizado para a definição dos sistemas de produto estabelecidos no presente estudo é conhecido entre os praticantes da ACV como do “berço ao portão da fábrica”, um termo originado a partir da tradução da expressão inglesa “*cradle to gate*”.

Em outras palavras, isto significa que as etapas do ciclo de vida dos produtos a serem consideradas, serão apenas as de extração dos recursos naturais e as de todas as transformações industriais necessárias para gerar os produtos.

Decidiu-se desconsiderar as etapas de uso e disposição dos fertilizantes em razão de ser esta uma tese desenvolvida em um Programa de Pós-graduação em Engenharia Química e a avaliação destas etapas ser mais adequadamente estudada por pesquisadores da área agronômica. Observe-se que este fato não implica que as etapas de uso e disposição final, sejam excluídas do projeto maior de comparação das rotas úmida e seca, referido no capítulo de Introdução.

#### **VI.1.2.3.1. Sistema de produto do TSP**

A Figura VI.1. apresenta um diagrama de blocos representativo do modelo adotado no presente trabalho para o sistema de produto do TSP. Um exame da mesma irá indicar que o referido sistema de produto é constituído pelos seguintes subsistemas:

- lavra da rocha fosfática para as produções de  $H_3PO_4$  e de TSP;
- transporte da rocha até a usina de beneficiamento;
- beneficiamento da rocha fosfática produzindo o concentrado fosfático;
- transporte do concentrado até as unidades de produção de  $H_3PO_4$  e TSP;
- produção de  $H_2SO_4$ ;
- produção de  $H_3PO_4$ ;
- manufatura do TSP;
- geração de gás natural e
- geração de energia elétrica.

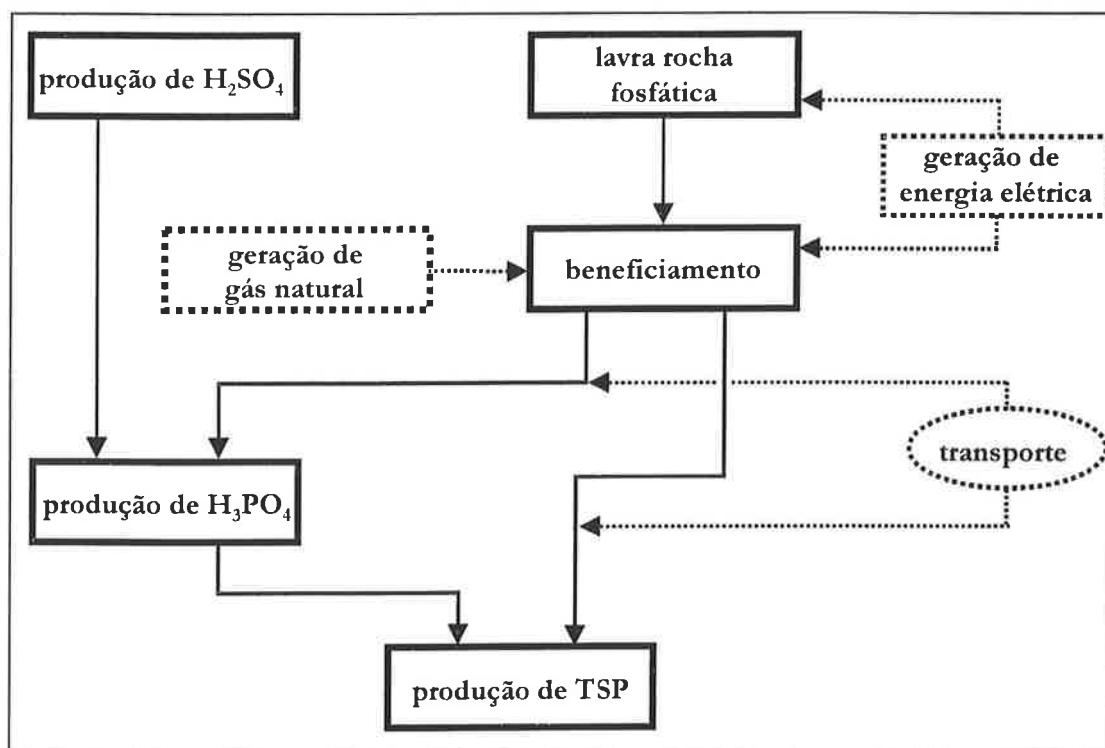


Figura VI.1. Diagrama do sistema de produto de TSP

Apenas a título de esclarecimento é importante informar que os subsistemas expressos por linhas cheias referem-se ao fluxo principal da produção do fertilizante em questão, enquanto que aqueles indicados por linhas tracejadas representam os subsistemas auxiliares de geração de energia elétrica, transporte e geração de gás natural.

O modelo representativo para o TSP se inicia pelo *subsistema de mineração de rocha fosfática* para as produções tanto de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> quanto de TSP. Tal como foi dado a saber ao longo do Capítulo IV. – de Revisão da Literatura, o presente modelo baseou-se nos procedimentos utilizados pela BUNGE em sua mina localizada no Município de Cajati (SP), na qual a referida extração é realizada com o auxílio de explosivos.

O subsistema de lavra da rocha inclui, além da extração propriamente dita do mineral de apatita, também as operações de britagem primária e secundária, bem como a homogeneização do material.

O subsistema de beneficiamento da rocha fosfatada compreende as operações de moagem do mineral de apatita, remoção da magnetita – também conhecida como desmagnetização, retirada de finos – ou deslamagem, condicionamento do material, flotação, desaguamento, filtração e finalmente, secagem do concentrado.

O subsistema de produção de ácido sulfúrico inclui o subsistema relativo à obtenção do enxofre elementar, bem como as operações do processo de fabricação do ácido, quais sejam: fusão e filtração do enxofre, secagem do ar atmosférico, queima do enxofre, conversão do dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e absorção do trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ) em água.

Já o subsistema de produção de ácido fosfórico é formado, por sua vez, pelas operações de reação do concentrado fosfatado com o ácido sulfúrico, filtração da suspensão de fosfogesso em ácido fosfórico e concentração da solução de ácido.

O subsistema de manufatura do TSP é composto das operações constantes das três etapas de reação, quais sejam: ataque do concentrado fosfatado por ácido fosfórico no misturador; da etapa que se desenvolve ao longo da correia do reator contínuo “run-of-pile”; e da cura do material. Além destas foram também incluídas operações envolvidas no acabamento do produto.

O subsistema de geração de energia elétrica baseou-se na composição da matriz energética nacional. Para tanto, foram consideradas as formas hidrelétrica e termelétrica a partir da queima de óleo combustível para sua elaboração. No que se refere à energia de origem hidrelétrica, foram considerados aspectos relacionados à construção e à operação do empreendimento.

No tocante à geração termelétrica de energia, o modelo em questão levou em conta as operações de exploração, extração, distribuição e refino do petróleo, bem como o transporte e a queima do óleo combustível em turbinas de ciclo-combinado.

O subsistema de geração de gás natural é constituído, de sua parte, pelas operações de extração, produção, purificação, transporte e combustão do gás natural. Tal como no caso anterior do subsistema de geração de energia, foram considerados neste caso aspectos relacionados à infra-estrutura para a construção das instalações e equipamentos empregados ao longo desses processamentos.

Finalmente, o subsistema de transporte foi concebido levando-se em conta dois grandes grupos de operações: o transporte de insumos em si, e a infra-estrutura para sua realização. Quanto à infra-estrutura foram particularmente contempladas a produção do veículo – e portanto de todos os materiais envolvidos em tal atividade – e a construção das vias de rodagem onde se desenvolve a referida operação, à qual estão também relacionados os bens de capital que delas fazem parte.

#### **VI.1.2.3.2 Sistema de produto para o FMP**

A Figura VI.2. traz o diagrama de blocos representativo do modelo adotado no presente trabalho para representar o sistema de produto do FMP, por meio do qual verifica-se que o sistema de produto é constituído pelos seguintes subsistemas:

- lavra da rocha fosfática;
- britagem do material minerado;
- transporte da rocha até a unidade de produção do FMP;
- manufatura de FMP;
- geração de gás natural e
- geração de energia elétrica.

Tal como no caso anterior do sistema de produto do TSP, as linhas cheias indicam os subsistemas que perfazem o fluxo principal de processamento do referido fertilizante, enquanto que para representar os subsistemas auxiliares foram utilizadas linhas tracejadas.

O subsistema de lavra da rocha restringiu-se apenas à mineração em si da rocha de apatita. Tal como ocorreu no caso antes descrito para o sistema de produto de TSP, considerou-se para efeito de elaboração do presente modelo que a referida operação se dá pela instalação de cargas explosivas na área de lavra, tal como esta é realizada pela BUNGE em Cajati.

O subsistema denominado *britagem do material minerado* contemplou, por sua parte, as operações de cominuição e classificação da apatita. A modelagem dessas transformações baseou-se, uma vez mais, nas práticas adotadas pela BUNGE na mina de Cajati.

O *subsistema de produção de FMP* inclui tanto o subsistema de obtenção do serpentinito quanto às operações do processo de manufatura do fertilizante, quais sejam: fusão da mistura de matérias-primas, resfriamento rápido do material fundido, moagem e secagem do produto. A definição do presente modelo tomou por base os processamentos realizados pela MITSUI em sua planta de produção de FMP instalada em Poços de Caldas (MG).

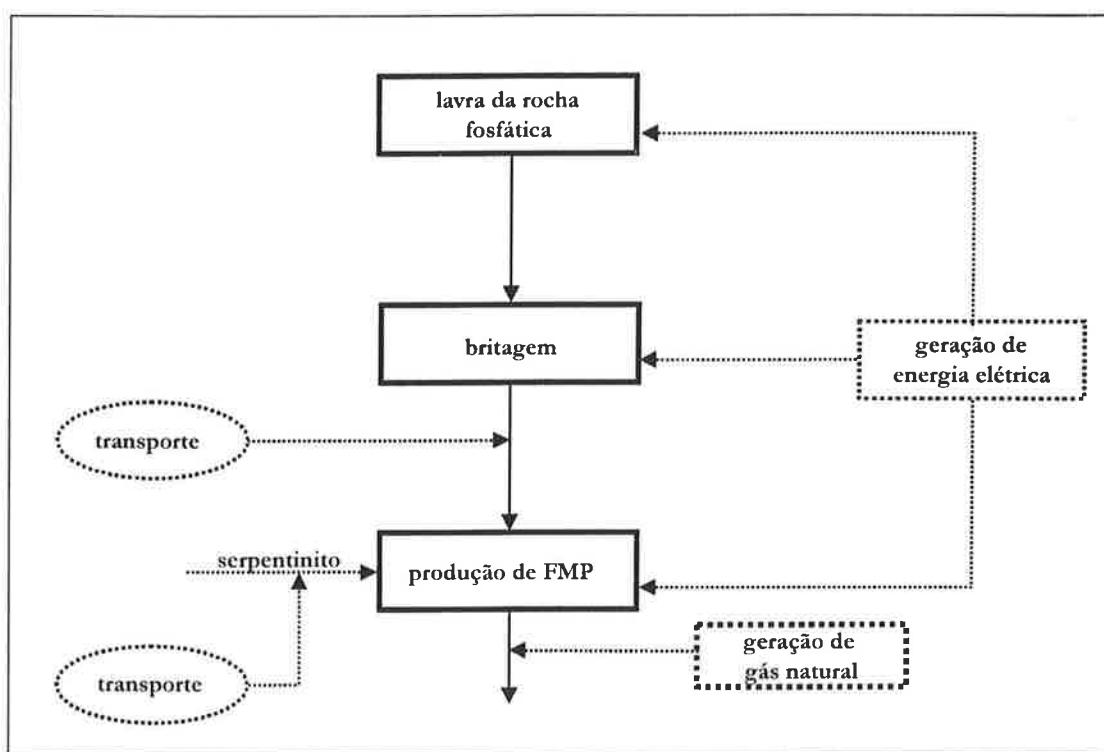


Figura IV.2. Diagrama do sistema de produto de FMP

Finalmente, os subsistemas de geração de gás natural, de geração de energia elétrica e de transporte seguiram a mesma filosofia de concepção empregada no caso do sistema de produto do TSP.

#### **VI.1.2.4. Fronteiras**

A definição das fronteiras do sistema consiste, em última análise, em excluir do sistema de produto os subsistemas que não serão considerados no estudo de ACV. Assim, passam a ser apresentados a seguir os subsistemas que foram desconsiderados para os casos de que se compõe o presente trabalho acadêmico, assim como as razões que motivaram tais decisões.

##### **VI.1.2.4.1. Fronteiras do sistema de produto do TSP**

Na etapa de lavra da rocha fosfatada foi excluído o subsistema da dinamite, ou seja, não foram considerados a fabricação do explosivo, o seu transporte e os aspectos ambientais associados à geração de energia mecânica decorrente da explosão. Tal decisão foi motivada pelo fato de a dinamite representar parcela muito pequena na quantidade total de materiais que entram no sistema.

O subsistema de obtenção do enxofre elementar foi excluído pelo fato de cerca de 85% do enxofre elementar consumido no Brasil ser de origem importada, o que dificultaria sobremaneira a identificação da origem do insumo. Tendo em vista o caráter do presente trabalho – uma tese de doutorado – considerou-se que esse esforço adicional extrapolaria o escopo de execução do mesmo.

Finalmente, no subsistema de beneficiamento houve-se por bem que fossem excluídas as operações inerentes à produção e transporte de aditivos. As razões para tal decisão são semelhantes àquelas que levaram o subsistema da dinamite a ser desconsiderado.

##### **VI.1.2.4.2. Fronteiras do sistema de produto do FMP**

Na manufatura do FMP decidiu-se pela exclusão do subsistema de obtenção do serpentinito em razão da falta de informações consistentes que possibilitassem a elaboração do ICV.

Quanto às fontes de sílica e magnésio utilizadas como fundentes de processo, a dificuldade para a obtenção de informações consistentes e precisas sobre a lavra e o processamento prévio do serpentinito, fizeram com que essas unidades de processo acabassem sendo excluídas do estudo.

Ainda com relação a tal insumo, o modelo em questão houve por bem restringir-se apenas à *unidade de processo de transporte de serpentinito*.

#### **VI.1.2.5. Critérios de qualidade dos dados**

A fim de garantir a consistência e a representatividade dos resultados obtidos pelas ACVs ora em desenvolvimento, foram adotados preliminarmente à coleta, os critérios de qualidade de dados propostos na norma NBR ISO 14040 (2001).

A baixa freqüência de amostragens utilizadas na caracterização de correntes líquidas e gasosas de rejeitos em ambos os estudos, não deixou outra alternativa a não ser a de considerar dados primários com até quinze anos de idade. Essa decisão teve como desdobramento imediato a instauração de um processo cuidadoso de avaliação de informações, o qual passou a ser conduzido preliminarmente ao procedimento de coleta, no intuito de avaliar as condições operacionais em que cada dado fora obtido. Consta ainda da mesma análise, uma investigação das tecnologias de que se valem as plantas sob avaliação, realizada essencialmente à guisa de evitar desconformidades entre o escopo tecnológico pretendido e os dados levantados.

Como relatado no Capítulo V, uma das condições necessárias à composição dos modelos de sistema de produto era a de que os dados empregados para esse fim fossem coletados apenas para condições regulares de processo, nas quais os níveis de produção não excedessem, se possível, a capacidade nominal das instalações. A partir dessa decisão, deixaram de ser consideradas para o presente estudo, situações anormais de processo, como paradas emergenciais ou programadas e suas respectivas repartidas.

A opção por avaliar os sistemas de produto de TSP e de FMP apenas quando em situações regulares de operação baseia-se no fato de ser essa a condição na qual esses mesmos processamentos se desenvolvem por períodos de tempo mais longos, tornando portanto bastante representativa a identificação de oportunidades para a melhoria de seu desempenho ambiental.

Com essa medida buscou-se evitar que eventos considerados anômalos, tais como flutuações de produção, desvios operacionais, paradas programadas e não programadas, bem como suas respectivas repartidas, fossem incluídos nos escopos desses estudos.

Finalmente, empregou-se como critério tecnológico para a coleta dos dados a média aritmética dos dados coletados no campo. Tal abordagem foi adotada para corroborar com os objetivos previstos para este trabalho acadêmico.

A presente exposição não estaria de todo completa, se uma última observação deixasse de ser realizada. Como a elaboração dos ICVs do TSP e do FMP foi levada a cabo seguindo a metodologia MADAP, descrita por HERRERA et al. (2002) – a qual prevê o uso de simuladores comerciais de processo para a realização dessa atividade – os valores de uma parcela de aspectos ambientais de ambos os sistemas foi obtida por meio de algoritmos de cálculo contidos nesses programas.

Deve ser dito em favor da precisão, da consistência e do rigor que balizaram a realização desse trabalho, que muito embora gerados por algoritmos numéricos, esses dados secundários foram, em todos os casos possíveis, confrontados com valores reais de operação, ou com estimativas de projeto.

#### **VI.1.2.6. Procedimentos para a alocação de cargas ambientais**

Como relatado no Capítulo IV de Revisão Bibliográfica deste documento, a aplicação de procedimentos de alocação só terá sentido, caso as unidades de processo de sistema em estudo gerem mais de um produto ao longo de seu desenvolvimento.

No caso do sistema de produto do TSP, essa condição pode ser encontrada em três situações: nas produções do ácido sulfúrico, do ácido fosfórico e na manufatura do TSP.

Como foi dado a saber ainda naquela ocasião, o processo de dupla absorção – DA, usado para a produção de ácido sulfúrico apresenta características exotérmicas. Por conta disso, uma parte significativa do calor gerado – da ordem de 60% – costuma ser recuperada na forma de vapor de água superaquecido, sendo introduzido em uma turbina para produzir energia elétrica, antes de deixar esse subsistema na forma de vapor ainda superaquecido de baixa pressão.

Assim sendo, como afora o ácido sulfúrico esse mesmo processamento gera ainda vapor e eletricidade, foi empregado para esse caso o *critério de alocação por energia*, o qual se baseia na ponderação das entalpias dos produtos acima indicados para distribuir as cargas ambientais identificadas no referido subsistema. Os fatores de alocação aplicados para tal subsistema estão contidos no *Anexo A8a*.

Durante a produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, grande quantidade de flúor na forma de SiF<sub>4</sub> acaba, via de regra, sendo emanada do reator de processo.

Para reduzir os impactos ambientais decorrentes dessa emissão, o SiF<sub>4</sub> passa por um lavador de gases no qual este é transformado em ácido hexafluorsilíssico (H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>) que, por sua vez, encontra uso como insumo intermediário nos processos de manufatura de criolita sintética, fluoreto de alumínio, bem como de diversos outros fluorsilicatos. Diante do quadro apresentado uma *alocação por massa* entre o H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e o H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> foi realizada. Os fatores de alocação referentes ao mesmo subsistema aparecem indicados no *Anexo A9a*.

Por fim, ao longo da manufatura do TSP um fenômeno semelhante àquele antes descrito para o caso do ácido fosfórico é também constatado. Assim, mais uma vez nessa situação foi realizada uma alocação de cargas ambientais por massa, nesse caso porém entre o TSP e o H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>. Os fatores de alocação relacionados a este subsistema estão contidos no *Anexo A10a*.

O sistema de produto para o FMP não gera subprodutos em qualquer de seus subsistemas. Assim, este se encontra desobrigado da aplicação de quaisquer critérios de alocação.

#### **VI.1.2.7. Categorias de impacto e sua metodologia de avaliação**

Como não poderia deixar de ser, os objetivos selecionados para a realização desta tese de doutorado exerceram influências significativas sobre os procedimentos usados para a definição do escopo de estudo das ACVs a ele vinculadas.

Partindo-se da premissa de que o referido estudo visa não apenas comparar os processamentos do TSP e do FMP em termos ambientais, como também identificar oportunidades possíveis para a melhoria de seus desempenhos ambientais, a etapa de avaliação dos impactos dessas ACVs será conduzida de forma a serem obtidos os Perfis de Impacto de ambos os produtos.

A fim de conferir a devida representatividade a esses perfis, optou-se por eleger o maior número possível de categorias de impacto, para as quais os aspectos ambientais identificados e quantificados na etapa de elaboração de ICVs pudessem estar relacionados. Essas categorias estão indicadas a seguir:

- Potencial de Aquecimento Global (PAG)
- Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO)
- Potencial de Toxicidade Humana (PTH)
- Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa)
- Potencial de Acidificação (PAc) e
- Potencial de Eutrofização (PEu)

A opção por realizar uma abordagem baseada no estabelecimento de perfis ambientais, aliada à especificidade das categorias de impacto antes indicadas, foi sem dúvida determinante para a seleção do modelo de avaliação a ser utilizado no estudo. Assim, optou-se pelo método *CML 2 baseline 2000*, proposto pelos pesquisadores do *Centre of Environmental Science – CML* da Universidade de Leiden – Holanda.

De acordo com os responsáveis por sua criação, o *CML 2 baseline 2000* é um método baseado na elaboração de indicadores do tipo “*midpoint*”, que como antes mencionado restringem-se em sua grande maioria, aos efeitos primários provocados pela disposição (ou consumo) de determinado aspecto ambiental em seu entorno.

Detalhes adicionais sobre a forma como o *CML 2 baseline 2000* procede a avaliação de impactos serão apresentados mais adiante neste mesmo capítulo, por ocasião do detalhamento dessa etapa da ACV.

#### **VI.1.2.8. Análise crítica dos resultados obtidos**

Tendo em vista o caráter acadêmico que permeia o desenvolvimento do presente estudo optou-se pela não realização de sua análise crítica. Entretanto, a fim de conferir-lhe a representatividade devida, recomenda-se desde já que antes que deste se faça uso para quaisquer finalidades, tal procedimento seja cumprido segundo as recomendações previstas pela norma NBR ISO 14040 (2001).

### **VI.1.2.9. Tipo e formato do relatório final dos estudos**

Como no item anterior, pretende-se que o documento gerado em decorrência da presente tese de doutorado possa ser capaz de substituir o relatório final previsto pela norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001).

Para tanto, procurou-se demonstrar por meio dos relatos que a compõem, que os estudos de ACV realizados para o TSP e para o FMP foram conduzidos em consonância com os procedimentos previstos pela referida norma, a fim de satisfazer os requisitos de transparência, clareza, completeza e precisão por ela determinados.

## **VI.2. Elaboração dos inventários de Ciclo de Vida do TSP e do FMP**

Como foi visto no capítulo IV a execução da etapa de Análise de Inventário é dividida em três conjuntos de procedimentos:

- preparação para a coleta de dados;
- coleta de dados e
- tratamento dos dados.

Considerando que no presente trabalho adotou-se a metodologia MADAP para a elaboração do ICV, a preparação para a coleta consistiu, em essência, da construção dos modelos simuladores dos diferentes processos envolvidos nas fronteiras dos sistemas de produto. Desta forma, neste capítulo será apresentada inicialmente uma descrição da construção dos modelos de simulação dos processos e, em seguida, a coleta e tratamento dos dados.

### **VI.2.1. Modelos simuladores**

O uso de simuladores comerciais para a elaboração de Eco-vetores na forma como contemplado pela MADAP ocorreu apenas para o caso do subsistema de produção de ácido sulfúrico. A atividade em questão iniciou-se pelo conhecimento do processo de produção do referido ácido mineral, no que se refere à tecnologia de que se valem as industrias do setor brasileiro de fertilizante para tal processamento.

Concluída essa etapa, partiu-se então para a elaboração do fluxograma de processos, a que se seguiram as atividades de identificação e de coleta dos dados que representassem as transformações do referido subsistema. Como antes mencionado, as diversas informações relativas à produção do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> foram levantadas para condições regulares de operação.

Após a coleta, passou-se então à construção do modelo propriamente dito. Empregou-se para essa atividade o simulador comercial de processos *Hysys.Plant*© (AEA, Technology, 1997) em sua versão 2.4.1.. O modelo gerado pelo simulador em questão para o subsistema de produção de ácido sulfúrico encontra-se representado no *Anexo A.1*

Cumprindo os passos para a aplicação da MADAP proposta por HERRERA et al. (2002a), elaborou-se a seguir uma planilha de dados a partir da qual o modelo simulado seria operado. Nessa planilha, que consta do *Anexo A.2*, estão indicados parâmetros e condições operacionais a partir dos quais foi possível construir o Ecovetor do processo de produção de ácido sulfúrico.

A aplicação da MADAP foi completada com a construção, via programação de “macros”, de uma interface de transferência dos dados usada para estabelecer a ligação entre o modelo simulado e a planilha de dados. O código de programação que representa essa interface aparece representado no *Anexo A.3*.

Como mencionado no início da presente descrição, o uso da MADAP para os casos contemplados neste trabalho acadêmico ficou restrito apenas ao subsistema de produção de ácido sulfúrico. As razões para que a aplicação da referida metodologia não se estendesse a outros processamentos contemplados pelos sistemas de produto sob estudo são todas de ordem operacional.

Inicialmente, deve-se argumentar que a simulação do subsistema de produção de ácido sulfúrico foi desenvolvida durante o estágio de treinamento do autor junto ao grupo de *Analisis y Gestión Ambiental* – AGA, da Universitat Rovira i Virgili de Tarragona – Espanha. Tendo em vista que nesta região da Catalunha encontra-se boa parte da indústria petroquímica do país, e que o simulador *Hysys.Plant*© (AEA, Technology, 1997) foi concebido para modelar processos relativos a esse segmento produtivo, a opção pelo referido recurso computacional foi imediata.

No entanto, deve-se também argumentar que em virtude da especificidade a que se destina, o simulador *Hysys.Plant*© não dispõe de uma biblioteca de dados para produtos inorgânicos, tão apurada quanto aquela requerida para construção dos modelos compreendidos nos sistemas de produto do TSP e do FMP.

Por outro lado, a elaboração de um modelo simulado tal como aquele gerado para a produção de ácido sulfúrico torna essencial um domínio pleno das tecnologias de processo que se pretende simular. Além disso, deve também estar disponível uma gama variada de dados e de condições de operação que façam garantir a consistência do modelo simulado gerado. Esses dois requisitos não foram, por diversos motivos, atendidos nos níveis de profundidade exigidos por um recurso da envergadura de um simulador de processos.

Deve-se dizer por fim, que o objetivo maior da realização de um treinamento junto ao grupo AGA, referente à absorção de uma metodologia para a elaboração do ICV, foi alcançado em sua plenitude. Tanto isso é verdade que os produtos de tal transferência de conhecimentos forneceram o embasamento necessário à elaboração deste trabalho acadêmico.

### **VI.2.2. Coleta de dados**

A aplicação da metodologia MADAP faz necessário o levantamento de dados de processo para a simulação dos mesmos; nestas condições, a etapa da coleta de dados realizada por ocasião do presente trabalho, inclui além da identificação e quantificação dos aspectos ambientais, também estas mesmas informações.

#### **VI.2.2.1. Subsistema – lavra da rocha fosfatada**

As modelagens relativas à lavra da rocha tanto para a produção de ácido fosfórico quanto para a manufatura de TSP foram baseadas nos mesmos dados, por ocorrerem de maneiras idênticas. Assim, as premissas e suposições que passarão a ser descritas a seguir foram aplicadas em ambos os casos.

O conteúdo de fósforo do mineral apatítico extraído junto ao meio ambiente foi estimado pelo valor médio das capacidades de fornecimento desse elemento por parte das jazidas brasileiras, cujos levantamentos foram realizados por CEKINSKI (1990). Quanto ao consumo de energia elétrica da mineração, foram consideradas as demandas individuais das duas etapas de britagem, assim como da homogeneização do mineral. Os dados que representam os consumos antes discriminados foram coletados junto aos estudos de BRUNO et al. (1985).

Quanto ao consumo de água, foram considerados os dispêndios ocorridos ao longo da britagem e da homogeneização da rocha. Foram levados em conta na quantificação desse aspecto ambiental os dados médios de consumo das unidades de mineração da FOSFÉRTIL e da COPEBRÁS, obtidos de contatos realizados junto a essas empresas.

Finalmente, as emissões de material particulado originadas na lavra da rocha foram determinadas a partir de dados de amostragens efetuadas pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB, do Estado de São Paulo, os quais encontram-se compilados na forma de uma Nota Técnica (CETESB, 2001) produzida por tal agência. São quantificadas nesse documento, as emissões de pós, ocorridas ao longo das operações de lavra, britagem, classificação e homogeneização da rocha fosfática. Constam ainda do mesmo arrazoado, valores referentes às perdas sólidas geradas como decorrência do transporte do mesmo recurso natural dentro da área de mineração, o qual é realizado por correias transportadoras e elevadores de canecas.

Encontram-se representados nos *Anexos A.4 e A5*, os Eco-vetores de cargas ambientais do subsistema de lavra da rocha fosfatada para as produções de TSP e de ácido fosfórico. São apresentados a seguir, os dados e informações coletados para representar os subsistemas em questão.

- *Composição da rocha fosfática (% massa):*
  - apatita (como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) = 10,11%
  - magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) = 15,00%
  - calcita (como CaO) = 62,00%
- Consumo total de água na mineração da rocha: 1,39m<sup>3</sup>/t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>
- Consumo total de energia elétrica na mineração: 225,7 MJ/ t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

- Emissões atmosféricas:  
material particulado: 0,18 kg/ t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> presente na rocha fosfática
- Eficiência de recuperação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na lavra: 85%

#### **VI.2.2.2. Subsistema – beneficiamento da rocha fosfatada**

Tal como para o subsistema de lavra da apatita, as informações apresentadas a seguir serviram para modelar o subsistema de beneficiamento da rocha nos casos em que esta se destina à produção de ácido fosfórico e à manufatura de TSP.

O valor total de consumo energético apontado para este módulo, corresponde à soma entre as médias das demandas elétricas das operações então relacionadas, e os consumos energéticos dispensados aos recalques de água fresca e recuperada.

O perfil energético do beneficiamento da rocha fosfática foi traçado a partir dos dados levantados por BRUNO et al. (1985). Antes mesmo de serem incorporadas ao modelo, tais informações passaram por avaliações de consistência, as quais foram realizadas tanto por meio de balanços energéticos, quanto por comparação direta com valores colhidos na literatura.

As informações referentes aos consumos de aditivos para o condicionamento da rocha fosfática – ou seja, os agentes coletores e depressores e o NaOH – bem como as gerações de resíduos sólidos de magnetita, calcita e não-apatita – originados respectivamente nas operações de desmagnetização, deslamagem e flotação, foram fornecidas por técnicos responsáveis pelas plantas de concentração da FOSFÉRTIL e da COPEBRÁS.

Os valores admitidos para os consumos de água nova e de água recuperada são igualmente dados secundários calculados por balanços materiais. Os resultados obtidos tanto no caso do H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> quanto para o TSP, encontraram-se dentro da faixa de variação esperada para essa variável, a qual segundo KULAY (2000), comprehende um intervalo entre 6 e 12m<sup>3</sup> por tonelada de concentrado fosfático beneficiado.

O produto da aplicação de tais considerações pode ser visto nos *Anexos A6 e A7* deste documento, no que se refere respectivamente aos beneficiamentos de rocha para as produções de ácido fosfórico e de TSP. A seguir são apresentados os dados que possibilitaram a modelagem do subsistema em questão.

- Teor de fósforo (como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) no concentrado beneficiado: 32,00%
- Eficiência de recuperação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no beneficiamento: 60%
- Umidade da rocha fosfática britada: 0,22%
- Consumo de água nova: 9,0m<sup>3</sup>/t concentrado fosfático
- Consumo de água recuperada: 25,8m<sup>3</sup>/t concentrado fosfático
- Consumo de aditivos:
  - agentes coletores = 1,97 kg/t concentrado fosfático
  - agentes depressores = 2,73 kg/t concentrado fosfático
  - hidróxido de sódio (NaOH) = 1,23 kg/t concentrado fosfático
- Consumo total de energia elétrica no beneficiamento: 561 MJ/ t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>
- Geração de efluentes líquidos:
  - teor médio de sólidos no efluente da desmagnetização = 23,05%
  - teor médio de sólidos no efluente da deslamagem = 2,93%
  - teor médio de sólidos no efluente de pós-filtração = 37,19%
- Variáveis envolvidas na operação de secagem do concentrado fosfático:
  - umidade do concentrado fosfático pré-secagem = 12,50%
  - umidade do concentrado fosfático pós-secagem = 1,20%
  - temperatura do concentrado fosfático à entrada do secador = 20°C
  - pressão de operação do sistema: 101,32 kPa
  - temperatura de ebulação da água: 100°C
  - calor específico da água à entrada do secador: 4,17KJ/kg °C
  - calor específico da água à sua temperatura de ebulação: 4,19KJ/kg °C
  - calor específico do concentrado à entrada do secador: 0,783KJ/kg °C
  - calor específico do concentrado a 100°C: 0,838KJ/kg °C
  - entalpia de ebulação da água nas condições de processo: 2257,0 KJ/kg
  - poder calorífico superior do gás natural: 49,09 MJ/kg de gás natural

### **VI.2.2.3. Subsistema – produção de ácido sulfúrico**

Os valores de SO<sub>2</sub> e névoa de SO<sub>3</sub> que foram usados para retratar o perfil de emissões atmosféricas deste subsistema, são provenientes de medições de campo efetuadas por técnicos do Escritório Regional da CETESB, localizado no Município de Cubatão (SP), para as seguintes empresas: COPEBRÁS, Ultrafértil e SERRANA, a qual integra atualmente o grupo BUNGE Fertilizantes S.A..

Os dados referentes a essas emissões foram submetidos a uma avaliação quanto à sua idade e às condições operacionais da planta de processamento no momento da amostragem antes de serem incorporados ao modelo.

Quanto à idade dos dados, foram admitidas apenas emissões registradas por amostragens ocorridas no período compreendido entre 1994 e 1999; outros valores mais atualizados encontram-se, ao menos por hora, indisponíveis.

Assim, as emissões atmosféricas de SO<sub>2</sub> e de névoa de SO<sub>3</sub> amostradas em condições definitivamente atípicas, tais como paradas e partidas de planta, ou mesmo em regimes de produção muito aquém da capacidade nominal da instalação, foram expurgadas do espaço amostral considerado para este estudo.

A partir dos dados selecionados pela aplicação dos critérios acima descritos foram obtidas médias, cujos totais acabaram então sendo aproveitados na pesquisa. Muito embora o indicador estatístico relacionado ao desvio-padrão da média para as emissões atmosféricas de névoa de SO<sub>3</sub> fosse considerado elevado ( $\sigma/m = 17,8\%$ ) o valor médio obtido para a amostra desse aspecto ambiental foi mantido para efeito do estudo.

Quanto às gerações de resíduos sólidos de borra de enxofre contaminado e de catalisador de pentóxido de vanádio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), foram empregados dados médios dos Inventários de Resíduos Sólidos da Ultrafértil e da COPEBRÁS. Como em situações anteriores, as informações relativas a tais resíduos foram obtidas junto ao Escritório Regional da CETESB, em Cubatão, e correspondem ao período compreendido entre 1995 e 1999.

Finalmente, para estimar as quantidades de vapor e energia elétrica a serem geradas por uma planta de produção do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a custa de recuperação de calor, foram utilizados os levantamentos realizados por BRUNO et al. (1985). As informações selecionadas para compor o modelo, correspondem ao valor médio das gerações de vapor superaquecido de baixa pressão e de eletricidade por turbina a vapor, de cinco unidades de produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> instaladas no Pólo Petroquímico de Cubatão. Em todos os casos, verificou-se que essas utilidades eram aproveitadas nas produções de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e de TSP, fato que constitui condição necessária à sua utilização no modelo.

A seguir são apresentados os dados coletados para o subsistema de produção do ácido sulfúrico, cujos Eco-vetores encontram-se representados mais adiante pelos *Anexos A8 e A8a*.

- Composição do enxofre elementar (% massa):  
enxofre (S) = 96,17%  
contaminantes = 1,82%  
umidade = 2,01%
- Composição do ar atmosférico (% massa):  
Oxigênio (O<sub>2</sub>) = 26,7%  
Nitrogênio (N<sub>2</sub>) = 71,3%  
umidade = 2,0%
- Consumo de água para a produção de vapor:  
Vazão = 113,71 kg/h  
Pressão = 20,0 kg/cm<sup>2</sup>  
Temperatura = 20°C
- Consumo de água de processo (para acerto de concentração do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>):  
Vazão = 19,34 kg/h  
Pressão = 3,0 kg/cm<sup>2</sup>  
Temperatura = 20°C
- Consumo de energia elétrica na planta: 3,44 KJ/kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98%)
- Concentração final do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>: 98% em massa

- Emissões atmosféricas:
  - Gases de SO<sub>2</sub>: 0,26 kg/h
  - Névoa de SO<sub>3</sub>: 0,0056 kg/h
- Borra de enxofre pós-filtração (média mensal): 8,13 kg/kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98%)
- Resíduo de catalisador de pentóxido de vanádio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) (média mensal): 61,24 kg/kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98%)
- Quantidade de energia recuperada: 3,82 MJ/kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98%)

#### **VI.2.2.4. Subsistema – produção de ácido fosfórico**

O modelo constituído para representar o *subsistema de produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>* foi concebido em termos semelhantes ao da produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. A despeito do fato de não ter sido empregado qualquer simulador de processos, a metodologia MADAP foi exercitada nos seus demais elementos. A fim de que a substituição de tal recurso computacional ocorresse sem prejuízo de qualidade para o estudo, utilizou-se na elaboração dos balanços de massa e de energia inerentes à produção do H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, o *Microsoft®Excel*, um aplicativo disponibilizado sob diversas versões por Microsoft Corporation©.

Quanto ao tipo de informações para sua confecção, o referido modelo contou em sua quase totalidade com dados secundários. Essa limitação pode ser imputada em essência, à indisponibilidade de valores consistentes para retratar a geração dos rejeitos no processo.

As amostragens de emissões atmosféricas de fluoretos e material particulado realizadas pelo Escritório Regional da CETESB em Cubatão, correspondiam no caso em questão, a dados consolidados de diferentes plantas cujos regimes de operação apresentavam-se bastante diversificados.

Diferentemente do ocorrido com os subsistemas anteriormente descritos, esse fato impossibilitou o estabelecimento de quaisquer correlações entre essas emissões e os diversos parâmetros de processo capazes de justificá-las.

No que se refere à geração de resíduos sólidos, particularmente para o caso do fosfogesso, não se encontravam disponíveis nos Inventários de Resíduos Sólidos das empresas contatadas, dados, ainda que aproximados, da composição centesimal desse rejeito.

Dificuldade semelhante foi observada no que se refere ao efluente líquido que deixa a estação de tratamento das empresas pesquisadas. Como não poderia deixar de ser, as unidades fabris dispõem de uma única estação para o tratamento de todos os seus despejos industriais. Assim, torna-se praticamente inviável conhecer, em meio à composição do efluente tratado, que parcela concerne ao processo de produção de  $H_3PO_4$ .

Diante das limitações apresentadas, admitiu-se como melhor aproximação disponível para levar a cabo a construção do Eco-vetor desse subsistema, o modelo proposto por BECKER (1983) no qual as correntes de matéria e energia relativas à fabricação de  $H_3PO_4$  são calculadas por balanços numéricos.

Afora a composição do concentrado fosfático, os demais dados e condições de processo que alimentaram esses balanços foram extraídos de fontes bibliográficas especializadas, tais como os relatos apresentados pelo próprio BECKER (1983) e as publicações veiculadas por EFMA, respectivamente, durante os anos de 1995 e 2000. O Escritório Regional da CETESB, em Cubatão pôde colaborar nesse caso, apenas com dados que caracterizavam os efluentes líquidos da COPEBRÁS, os quais foram incorporados integralmente ao modelo.

Nesse caso em particular, foram estimados com base na literatura, taxas de remoção de inorgânicos na estação de tratamento de efluentes. Muito embora essa seja uma aproximação bastante válida na ausência de valores mais consistentes, é evidente que o modelo de cálculo utilizado desconsidera a presença de despejos de outras unidades industriais; portanto, os efeitos que os mesmos poderiam provocar sobre o tratamento de efluentes quando em associação às perdas da planta de  $H_3PO_4$ , tal como ocorre na prática, acabaram também sendo desprezados.

Finalmente, no que se refere aos consumos de energia elétrica e de vapor, a modelagem da produção de  $H_3PO_4$  baseou-se, tal como ocorre na quase totalidade das plantas brasileiras, no fato de que o fornecimento desses insumos energéticos é proveniente, em sua plenitude, da planta de produção de  $H_2SO_4$ .

O Eco-vetor resultante da modelagem do subsistema de produção de ácido fosfórico pode ser visto no *Anexo A9*. A seguir são apresentados os dados coletados para o subsistema de produção do ácido fosfórico.

- Composição do concentrado fosfático (% massa):  
fósforo (como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) = 32,00%  
óxido de cálcio (CaO) = 49,00%  
sílica (SiO<sub>2</sub>) = 3,00%  
óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 0,70%  
óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 0,70%  
óxido de magnésio (MgO) = 0,50%  
dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) = 1,13%  
flúor (F) = 3,60%
- Umidade do concentrado fosfático: 1,20%
- Teor de SiO<sub>2</sub> como quartzo (% massa): 50%
- Eficiência global de recuperação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 95,5%
- Concentração do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> usado na digestão do concentrado: 98%
- Teor de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> livre no produto ácido (% massa): 1,75%
- Volume ocupado pela fase sólida no reator (% volume): 25%
- Concentração de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no produto ácido (% massa): 30%
- Peso específico da fase líquida no interior do reator: 1,30g/cm<sup>3</sup> (a 72°C)
- Concentração de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na corrente de reciclo (% massa): 17,5%
- Peso específico do sulfato de cálcio hidratado: 2,32g/cm<sup>3</sup> (base seca)
- Óxido de cálcio (CaO) residual presente no produto ácido: 5,0kg/m<sup>3</sup>
- Taxa de retenção de água na torta de filtração (% massa): 26,5%
- Fatores de dissolução de materiais componentes do concentrado fosfático na solução de ataque:  
fator de dissolução de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 80%

fator de dissolução de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  = 90%

fator de dissolução de  $\text{MgO}$  = 100%

fator de dissolução de F = 60%

- Calor de reação a ser removido: 184,11 Mcal/t  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (98%)
- Calor de vaporização da água a 101,32 kPa: 556,14 Mcal/t  $\text{H}_2\text{O}$
- Consumo de vapor de baixa pressão para o conjunto reator–“*flash cooler*”: 0,15 t / t  $\text{P}_2\text{O}_5$  produzida
- Entalpia de vapor de baixa pressão: 2796,23 KJ / kg vapor
- Consumo de água no condensador ligado ao conjunto reator–“*flash cooler*”: 6,0 t / t  $\text{P}_2\text{O}_5$  produzida
- Taxa de fluoretos vaporizada no conjunto reator–“*flash cooler*”: 7% (fração do total solubilizado)
- Taxa de remoção de fluoretos no lavador de gases do conjunto reator–“*flash cooler*”: 93% (com relação ao total de flúor gerado)
- Taxa de remoção de fluoretos no condensador ligado ao conjunto reator–“*flash cooler*”: 6% (com relação ao total de flúor gerado)
- Teor de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na solução de ácido hexafluorsilíssico gerada a partir do abatimento dos fumos emanados pelo conjunto reator–“*flash cooler*” (% massa): 0,01%
- Concentração de ácido hexafluorsilíssico após o primeiro sistema de abatimento de gases (referente ao conjunto reator–“*flash cooler*”): 2%
- Teor de fluoretos precipitados com o  $\text{H}_3\text{PO}_4$  30% massa (% massa): 2%
- Perdas de fósforo no processo (medidas na forma de %  $\text{P}_2\text{O}_5$ ):  
 $\text{P}_2\text{O}_5$  complexado = 3,0%  
Filtração ineficiente = 1,0%  
Não ataque do concentrado fosfático = 0,5%
- Consumos elétricos na produção de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (30% massa):  
Moagem do concentrado fosfático = 0,14 GJ / t de  $\text{P}_2\text{O}_5$  produzida

Produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (30% massa)= 0,07 GJ / t de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> produzida

- Emissões atmosféricas:  
material particulado gerado no conjunto reator–“*flash cooler*” durante a produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (30% massa) = 41,5g / t de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> produzida
- Número de estágios de evaporação: 3
- Teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na solução de ácido hexafluorsilíssico gerada a partir do abatimento dos fumos emanados pelos evaporadores (% massa): 0,10%
- Teor de fluoretos precipitados com o H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 52% massa (% massa): 23%
- Taxa de remoção de fluoretos no lavador de gases ligados aos evaporadores: 93% (com relação ao total de flúor gerado)
- Taxa de remoção de fluoretos no condensador ligado aos evaporadores: 6% (com relação ao total de flúor gerado)
- Concentração de ácido hexafluorsilíssico após segundo sistema de abatimento de gases (referente aos evaporadores): 20%
- Consumo elétrico da produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (52% massa):  
Valor total: 0,48 GJ / t de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> produzida
- Eficiência de evaporação de fluoretos por estágio:
  - 1º estágio = 10%
  - 2º estágio = 35%
  - 3º estágio = 40%
- Consumo de vapor de baixa pressão durante a operação de concentração do ácido a 52% massa: 1,77 t / t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> produzida
- Consumo de água no condensador ligado ao conjunto de evaporadores para concentração do ácido a 52% massa : 6,0 t / t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> produzida
- Composição estimada do H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (52% massa):  
P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 52%  
SO<sub>4</sub> = 2,75%  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 1,05%  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 0,88%

$MgO = 0,72\%$

$F = 1,14\%$

$CaO = 0,21\%$

$SiO_2 = 0,04\%$

- Composição estimada do efluente líquido pós-tratamento:

$PO_4^{3-} = 0,0035 \text{ g/h}$

$Ca^{2+} = 3,67 \text{ g/h}$

$Fe^{3+} = 0,10 \text{ g/h}$

$Al^{3+} = 0,10 \text{ g/h}$

$Mg^{2+} = 0,15 \text{ g/h}$

$H_2SiF_6 = 0,03 \text{ g/h}$

#### **VI.2.2.5. Subsistema – manufatura do TSP**

Para o estabelecimento do modelo representativo do *subsistema de produção de TSP*, cujo respectivo Eco-vetor de cargas ambientais encontra-se no *Anexo A10* deste documento, optou-se por uma abordagem na qual a MADAP foi novamente empregada com o auxílio do aplicativo *Microsoft®Excel*. Entretanto, diferentemente do caso anterior, os dados que balizaram a elaboração do referido modelo foram em sua grande maioria de origem primária.

Os valores para emissões atmosféricas de fluoretos e de material particulado foram coletados junto ao histórico de amostragens realizado pelo Escritório Regional da CETESB em Cubatão, para a planta de produção de TSP da COPEBRÁS.

A caracterização de compostos de fósforo para os lançamentos de efluentes líquidos desse processo encontrava-se igualmente disponível. Para esse caso, lançou-se mão novamente de valores de literatura para estabelecer a taxa média de remoção dessas substâncias na estação de tratamento.

Já os consumos elétricos despendidos para o acionamento dos equipamentos que constituem a instalação foram obtidos dos levantamentos realizados por BRUNO et al. (1985), à exceção do consumo energético destinado à moagem do concentrado fosfático, o qual foi, por sua vez, coletado em IFDC (1982).

Finalmente, um balanço de energia foi realizado para determinar o consumo de vapor de baixa pressão dispensado para o aquecimento do  $H_3PO_4$ , previamente ao seu uso para a digestão do concentrado fosfático. Nesse caso, os valores dos calores específicos para o fluido em questão, tanto à temperatura ambiente quanto após seu aquecimento com vapor foram também obtidos de BRUNO et al. (1985).

Encontram-se indicados a seguir, os dados coletados para o subsistema de manufatura do TSP.

- Composição do concentrado fosfático (% massa):
  - fósforo (como  $P_2O_5$ ) = 32,00%
  - óxido de cálcio ( $CaO$ ) = 49,00%
  - sílica ( $SiO_2$ ) = 3,00%
  - óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) = 0,70%
  - óxido de ferro ( $Fe_2O_3$ ) = 0,70%
  - óxido de magnésio ( $MgO$ ) = 0,50%
  - dióxido de carbono ( $CO_2$ ) = 1,13%
  - flúor (F) = 3,60%
- Composição estimada do  $H_3PO_4$  (52% massa):
  - $P_2O_5$  = 52%
  - $SO_4$  = 2,75%
  - $Fe_2O_3$  = 1,05%
  - $Al_2O_3$  = 0,88%
  - $MgO$  = 0,72%
  - F = 1,14%
  - $CaO$  = 0,21%
  - $SiO_2$  = 0,04%
- Relação  $P_2O_5:CaO$  = 1,0 : 2,50
- Eficiência de recuperação de  $P_2O_5$  na manufatura do TSP: 95%
- Consumo total de água no lavador de gases acoplado ao reator de processo:  $25,0m^3/t$  TSP

- Consumo elétrico da produção de TSP:  
acionamento de máquinas: 0,16 GJ / t TSP  
moagem do concentrado fosfático: 0,41 GJ / t TSP
- Composição estimada do TSP:  
 $P_2O_5 = 46\%$   
 $F^- = 0,90\%$
- Eficiência de remoção de fosfatos na ETE: 88%
- Emissões atmosféricas:  
material particulado por ocasião da cominuição do concentrado de rocha  
 $= 38,4g / t$  de concentrado fosfático
- material particulado do reator de produção de TSP pós-tratamento =  
 $258g / t$  de concentrado fosfático  
fluoretos emanados do reator de produção de TSP pós-tratamento =  
 $5,1g / t$  TSP.

### **VI.2.3. Sistema de produto do FMP**

O modelo que representa o sistema de produto do FMP é de elaboração mais simples que aquele elaborado para o TSP e antes apresentado. Essa assertiva se justifica principalmente pelo fato de apenas a MITSUI FERTILIZANTES S.A. permanecer como única fabricante desse produto em escala econômica no país.

A abordagem dispensada à elaboração do modelo para o sistema de produto do FMP seguiu, em linhas gerais, a mesma filosofia que balizou a estruturação do modelo representativo para o TSP. Por conta disso, serão apresentados por ocasião desse detalhamento, apenas as particularizações determinadas para o presente caso.

#### **VI.2.3.1. Subsistema – lavra e britagem da rocha fosfatada**

Admitiu-se como ponto de partida, que a rocha fosfática empregada como matéria-prima para a fabricação de FMP seria fornecida em sua totalidade pela antiga ARAFÉRTIL, hoje também parte integrante do grupo BUNGE Fertilizantes S.A., cuja mina de extração está localizada na cidade de Araxá (MG). A opção da MITSUI por servir-se dessa fonte em específico, reside no fato de a rocha fosfática dela obtida

conter entre 24 e 28% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o que se constitui em uma vantagem processual bastante considerável. Muito embora essa condição não altere em nada a forma de operação de lavra da apatita, o subsistema de beneficiamento da rocha acaba por restringir-se a tão somente, uma cominuição simples do recurso natural.

A determinação do consumo de energia dispensado especificamente para essa operação baseou-se nos dados médios coletados dos levantamentos de BRUNO et al. (1985).

Ainda no que se refere ao *subsistema de britagem*, os valores das emissões de material particulado usados para a confecção do modelo em questão, são originários de informações constantes da Nota Técnica elaborada pela CETESB (2001). Dessa referência foram também retirados subsídios para justificar o dado de eficiência de moagem do material empregado no presente estudo. Os Eco-vetores referentes à lavra do mineral de apatita e da britagem da rocha constam dos *Anexos A11 e A12*.

A seguir são apresentados os dados coletados para os subsistemas de lavra e de britagem da rocha fosfática.

### **Lavra da rocha fosfática**

- Composição da rocha fosfática (% massa):
  - fósforo (como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) = 28,00%
  - óxido de cálcio (CaO) = 47,03%
  - sílica (SiO<sub>2</sub>) = 0,46%
  - óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 0,88%
  - óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 2,98%
  - óxido de magnésio (MgO) = 0,14%
  - dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) = 2,49%
  - flúor (F) = 2,32%
- Consumo total de água na mineração da rocha: 0,14m<sup>3</sup>/t rocha britada
- Consumo total de energia elétrica na mineração: 225,7 MJ/ t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>
- Emissões atmosféricas:
  - material particulado: 0,19 kg/ t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na rocha fosfática
- Eficiência de recuperação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na lavra: 95%

### ***Britagem da rocha fosfática***

- Eficiência de recuperação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no beneficiamento: 99%
- Consumo total de energia elétrica na britagem: 43,5 MJ/ t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na rocha
- Emissões atmosféricas:  
material particulado = 48,4g / t P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na rocha

#### **VI.2.3.2. Subsistema – produção do FMP**

O *subsistema de produção de FMP*, cujo Eco-vetor aparece indicado no *Anexo A13* deste documento, foi modelado por meio de dados coletados de diversas fontes. Para estabelecer as emissões atmosféricas de fluoretos originadas no reator de fusão foram adotados valores levantados por ANDO (1961), os quais foram posteriormente confirmados por GUARDANI (1983) e ratificados por CEKINSKI (1990).

O total de água consumida no resfriamento instantâneo do material fundido origina-se por sua parte dos estudos realizados por GUARDANI (1982), os quais acabaram sendo também comprovados depois por BRUNO et al. (1985).

Já o dado de consumo de energia para a fusão do material, considerado como um dos pontos fundamentais à elaboração do modelo, foi obtido a partir da média entre os valores dos experimentos realizados por FERREIRA (2001). A seguir são apresentados os dados coletados para o subsistema de produção do FMP.

- Composição do concentrado fosfático (% massa):  
fósforo (como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) = 28,00%  
óxido de cálcio (CaO) = 47,03%  
sílica (SiO<sub>2</sub>) = 0,46%  
óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 0,88%  
óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 2,98%  
óxido de magnésio (MgO) = 0,14%  
dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) = 2,49%  
flúor (F) = 2,32%
- Umidade da rocha fosfática: 0,20%
- Composição estimada do serpentinito (% massa):

fósforo (como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) = 0,0%

óxido de cálcio (CaO) = 1,17%

sílica (SiO<sub>2</sub>) = 41,80%

óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 2,14%

óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 7,66%

óxido de magnésio (MgO) = 37,77%

dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) = 2,49%

- Eficiência de recuperação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na manufatura do FMP: 96,7%
- Quantidades de reagentes alimentadas ao forno:
  - rocha fosfática: 60 partes
  - serpentinito: 40 partes
- Fatores de dissolução de componentes do fundido em água:
  - fator de dissolução de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 10%
  - fator de dissolução de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 10%
  - fator de dissolução de F = 10%
- Consumo total de água para resfriamento rápido do material fundido que deixa o forno: 20,0m<sup>3</sup>/t FMP
- Consumo elétrico da produção de FMP:
  - acionamento de máquinas: 1,08 GJ / t FMP
  - fusão da mistura reacional: 3,42 GJ / t FMP
- Composição estimada do TSP:

P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 20%
- Emissões atmosféricas:

fluoretos durante a fusão (% massa do total admitido ao sistema na forma de rocha fosfática) = 30%
- Eficiência de remoção de fosfatos na ETE: 88%
- Eficiência de remoção de sais de ferro na ETE: 90%
- Eficiência de remoção de sais de alumínio na ETE: 80%
- Eficiência de remoção de fluoretos na ETE: 60%

#### **VI.2.4. Subsistema – geração de gás natural**

Para efeito do presente trabalho considerou-se que a secagem do concentrado fosfático e a secagem do FMP são realizadas pela combustão de gás natural. Assim como no caso da água, o consumo desse combustível foi estimado por balanço energético, para o qual foram considerados dados extraídos de PERRY & CHILTON (1973). Usando-se como critérios a composição média aproximada do gás natural brasileiro e as tecnologias empregadas para esse processamento, selecionou-se em SimaPro 5 (PréConsultants, 2002) uma base de dados capaz de representar com a consistência devida o perfil de aspectos ambientais das etapas de extração, refino e distribuição contidas no ciclo de vida desse produto.

Novamente nesse caso, a ausência de dados genuinamente nacionais capazes de retratar o perfil de aspectos ambientais do gás natural, aliada à importância dessas unidades de processo para o modelo em questão, foram determinantes na tomada de tal decisão.

Assim como nas situações descritas para os subsistemas de geração de energia elétrica e de transporte, algumas adaptações foram feitas à base de dados de SimaPro 5 a fim de torná-la ainda mais representativa quanto à forma como esse processamento ocorre no Brasil. Esses critérios serão objeto de exposição futura.

Tal como indicado antes na descrição dos sistemas de produto do TSP e do FMP, o subsistema de geração do gás natural é constituído, respectivamente, pelos subsistemas de extração, produção, purificação, transporte, distribuição em âmbito regional e combustão do gás natural.

*Os subsistemas de extração e de produção de gás natural seguiram uma filosofia de concepção bastante semelhante àquela empregada para o sistema de produto de produção de eletricidade por meio da queima de óleo combustível no que se refere a essas operações. Dessa forma, no que se refere à exploração de gás, foram consideradas apenas extrações realizadas no mar, com o intuito de simular dentro do possível a forma como tal prática é conduzida no país. Além disso, tal como no caso já descrito, foram ainda levados em conta na presente situação, aspectos relacionados à construção das plataformas e das tubulações usadas para a transferência do produto para a terra.*

São também parte integrante desse módulo a geração de rejeitos ocorrida durante a perfuração dos poços de exploração, e o consumo de recursos naturais, tais como a barita e a bentonita, empregados regularmente nesse processamento.

Quanto à *produção de gás*, supôs-se para efeito de elaboração do modelo, apenas uma vez mais as operações ocorridas no mar; também nesse caso houve-se por bem considerar o consumo energético imputado a tal operação.

No que se refere à *purificação do gás*, foram contempladas as operações de eliminação de água e de óleo, bem como as remoções de hidrocarbonetos de elevado peso molecular e de compostos reduzidos de enxofre. Particularmente com relação a esses últimos, estimou-se em 35% a parcela do total de gás a ser purificado na qual são encontradas concentrações de H<sub>2</sub>S superiores a 1% em volume.

A modelagem dos *subsistemas de transporte* levou em conta os módulos de construção de tubulações e linhas de distribuição, bem como de transporte rodoviário realizado em caminhões tanque, tal como no caso do sistema de produto do óleo combustível. Entretanto, tendo em vista a extensão das linhas e o grau de volatilidade do fluido circulante, foram incluídas no presente caso as perdas gasosas de CH<sub>4</sub>, por falhas de vedação e estanqueidade dos sistemas de distribuição.

Já para a distribuição em âmbito regional, no que se refere à infra-estrutura de construção das linhas, foram considerados os processos de produção do aço, do ferro fundido e do polietileno. Além destes, estão também contempladas as produções de concreto – para o encapsulamento das tubulações – e do betume, este último, usado como agente de vedação em flanges e conexões. Por fim, são também considerados na relação de aspectos ambientais desse mesmo subsistema, o consumo de energia e as perdas de gás por vazamentos. Tal como para o óleo combustível, admitiu-se como premissa para o caso ora descrito que a *combustão do gás natural* é realizada em instalações de tecnologia de ciclo-combinado. Baseando-se em tal fato, foram então selecionados os materiais de construção relacionados à infra-estrutura das instalações, e definido o consumo de energia despendido para sua montagem. Além disso, a adoção de sistemas de ciclo-combinado foi decisiva na determinação das emissões atmosféricas e do lançamento de efluentes líquidos decorrentes da queima do gás natural. Os *Anexos A14 e A15* mostram, respectivamente, os subsistemas de produção de gás natural para os sistemas de produto de TSP e de FMP.

## **VI.2.5. Subsistema – geração de energia elétrica**

Considerando-se o fato de que a energia elétrica consumida nos sistemas de produto estudados é obtida da concessionária de energia, selecionou-se junto ao programa computacional *Tool for Environmental Analysis and Management* (TEAM), comercializado por Ecobilan Group (Ecobilan Group, 1998), uma base de dados capaz de representar de maneira consistente os aspectos ambientais relacionados às operações de geração, distribuição e transmissão de energia elétrica no Brasil.

Essa opção deveu-se, em essência, a dois fatores preponderantes, e por que não, complementares: a ausência momentânea de dados precisos e confiáveis capazes de retratar o perfil de aspectos ambientais desse produto e a importância do subsistema em questão para o modelo ora em desenvolvimento.

Antes de sua incorporação ao modelo, a base de dados selecionada passou por ajustes de estrutura, realizados com o intuito de torná-la mais representativa quanto à forma como a geração de eletricidade ocorre no país.

O procedimento de seleção da base de dados para o subsistema em questão, foi conduzido por meio da aplicação de critérios objetivos, criados, acima de tudo, para minimizar possíveis distorções nos resultados obtidos pelo estudo, geradas em decorrência de sua utilização. Os critérios empregados na definição do subsistema de geração de energia levaram em conta a composição da matriz energética nacional, as capacidades e tensões das instalações de distribuição de eletricidade e a composição de elementos usados para sua transmissão, tais como postes, isoladores, cabos e transformadores. Ainda no presente capítulo será apresentada uma descrição detalhada da estrutura de que se compõe a referida base de dados.

Admitiu-se como premissa do estudo que a totalidade de energia elétrica consumida pelo sistema de produto de FMP fosse proveniente da concessionária. Por conta dessa consideração, o modelo do *subsistema de geração de energia elétrica* seguiu um procedimento análogo àquele utilizado para os módulos de lavra e de beneficiamento de rocha do sistema TSP. O resultado desse processo foi a seleção de uma base de dados com características idênticas às dessa última para o presente caso.

Foram levados em conta para efeito de avaliação das bases de dados de TEAM, aspectos operacionais inerentes ao referido processamento, tais como: a composição da matriz energética brasileira, as capacidades e tensões das unidades de distribuição de eletricidade e até as características básicas dos elementos usados para sua transmissão, como postes, isoladores, cabos, e transformadores.

Dentre esses critérios aquele que de fato particulariza a geração de energia no Brasil refere-se à composição da matriz energética. Considerando-se que as bases de dados disponíveis em TEAM eram datadas do ano de 1996, buscou-se identificar no Balanço Energético Nacional – BEN (MME, 1996) as fontes possíveis de produção de energia primária e seus respectivos percentuais de contribuição que compunham a referida matriz à época. O produto desse levantamento aparece representado a seguir na Tabela VI.1.

**Tabela VI.1. Composição da matriz energética brasileira em 1996**

<b>Fontes de produção de energia primária</b>	<b>(%) de contribuição por fonte</b>
<b>hidreletricidade</b>	<b>91,70</b>
<b>óleo combustível</b>	<b>3,08</b>
<b>carvão</b>	<b>1,64</b>
<b>nuclear</b>	<b>0,84</b>
<b>gás natural</b>	<b>0,25</b>
<b>outros</b>	<b>2,49</b>

Fonte: Adaptado de Balanço Energético Nacional – 1996 (MME, 1996)

Pelos dados acima indicados, é possível perceber uma ampla predominância da geração de energia de origem hidrelétrica sobre as demais fontes de obtenção. Tal resultado não causa de fato qualquer surpresa tendo em vista a extensa malha fluvial que se distribui ao longo do território nacional.

Além disso, dentre as diversas formas de produção de eletricidade pela via termelétrica, aquela obtida por meio da queima de óleo combustível apresentava parcela de contribuição mais significativa.

O item denominado genericamente “outros”, compreende as fontes menos usuais de obtenção de energia, como a solar, a geotérmica, a de queima de biomassa e de produtos de origem animal, e a de incineração de resíduos sólidos com elevado valor de poder calorífico.

Diante desse quadro, decidiu-se que geração de energia elétrica no país teria uma representação adequada do ponto de vista quantitativo, caso fossem levadas em conta para a composição da matriz em questão apenas as duas primeiras fontes acima citadas. Assim, foram extraídas do programa TEAM, bases de dados correspondentes à geração de energia de origem hidrelétrica e à produção de eletricidade proveniente da queima de óleo combustível.

Os subsistemas que compõem esses mesmos sistemas de produto, juntamente com as principais particularidades que balizaram suas elaborações são apresentadas nos tópicos que se seguem.

#### **VI.2.5.1. Geração de energia de origem hidrelétrica**

O subsistema para geração de energia hidrelétrica disponibilizado por TEAM é composto por dois subsistemas: construção do empreendimento e operação das instalações.

O *subsistema de construção do empreendimento* leva em conta para efeito de sua elaboração, os módulos de produção de explosivos, cimento, cascalho e aço, bem como o consumo de óleo diesel e de energia, despendidos por ocasião da realização da obra. O transporte desde os centros fornecedores de insumos até a área onde se instala o canteiro de obras também é contemplado nesse sistema de produto.

O subsistema de operação das instalações comprehende, por sua vez, aspectos ambientais relacionados ao consumo de eletricidade e ao uso da terra para a instalação do reservatório. Os cálculos de produção de eletricidade foram realizados para o presente caso, tomando-se por premissa que a eficiência das turbinas usadas para a geração de eletricidade apresentam um rendimento médio de 70%.

Tendo em vista o clima brasileiro, tropical na maioria de seu território, foram adicionados à base de dados em questão, dados relativos às emissões atmosféricas de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, originárias de processos microbiológicos que se desenvolvem no lago da barragem.

Por outro lado, quaisquer efeitos tanto hidrológicos quanto hidrogeológicos causados em decorrência da instalação do empreendimento não foram levados em conta na elaboração da referida base de dados. A justificativa para tal ação reside no fato de que a quantificação de tais aspectos ambientais depende, em muitos casos das condições do local onde a barragem foi instalada.

#### **VI.2.5.2. Produção de eletricidade pela queima de óleo combustível**

A base de dados de TEAM na qual é representada a produção de eletricidade pela queima de óleo combustível, foi constituída a partir de um sistema de produto formado pelos seguintes subsistemas: exploração de petróleo, produção de óleo cru, transporte, refino, distribuição em âmbito regional e, finalmente, queima do óleo combustível para a geração de eletricidade.

O *subsistema de exploração de petróleo* levou em conta apenas as operações de extração realizadas no mar, uma das características predominantes no caso brasileiro. Além disso, foram também considerados para a presente situação aspectos relacionados à construção das plataformas e das tubulações usadas na transferência do produto para a terra. São também contempladas no mesmo módulo a geração de rejeitos decorrentes da perfuração dos poços de exploração, assim como os consumos de barita e de bentonita despendidos em tal processamento.

Fazem parte do *subsistema de produção de óleo cru* as operações de remoção de gás natural e de água salobra que se encontram associados ao petróleo extraído, bem como o consumo energético imputado a tal operação.

Para efeito de modelagem do *subsistema de transporte*, foram observados os módulos de construção de tubulações e linhas de distribuição, e de transporte pela via rodoviária, o qual é realizado por meio de caminhões tanque.

O transporte ferroviário do óleo cru, cujo uso é bastante freqüente na Europa, foi desconsiderado para efeito do presente estudo, e portanto, os aspectos ambientais dele decorrentes acabaram por ser excluídos da base de dados em questão.

Especial atenção foi dispensada ao *subsistema para o refino do óleo*, pelo fato de suas instalações serem, em geral, bastante complexas. Para que possam ser produzidos a partir do óleo cru, certos produtos como gasolina, óleo combustível leve ou mesmo betume, é necessário contar no interior da unidade de refino com equipamentos que realizem processos tais como destilação – atmosférica e a vácuo, reforma de gases e craqueamento, tanto térmico, quanto catalítico.

Diante dessa situação, foi realizada para efeito de modelagem do subsistema em questão, uma análise detalhada da tecnologia e dos métodos de operação de diversas refinarias européias atualmente em funcionamento. Com os resultados de tais levantamentos, foram então definidos aspectos importantes ligados ao refino do óleo, como materiais de consumo do processo, necessidade de aditivos e de insumos auxiliares, itens de infra-estrutura, dispêndio de energia e geração de rejeitos, que por sua vez compuseram a base de dados no que se refere ao módulo em questão.

Foi dispensada para o caso do *subsistema de distribuição em âmbito regional* uma abordagem semelhante àquela empregada no transporte de material. Assim, fizeram parte desta, os módulos de infra-estrutura para unidades de estocagem e distribuição no nível local e o consumo energia realizado na movimentação de fluídos. As emissões atmosféricas decorrentes de vazamentos e de escapes de gás foram também incluídas no estudo.

A modelagem do *subsistema de queima de óleo combustível* tomou por premissa que as instalações destinadas a essa forma de processamento sejam, no que se refere à tecnologia, do tipo ciclo-combinado. Baseando-se nesse fato, foram então selecionados dados de infra-estrutura das unidades geradoras e dos consumos de energia elétrica para essa classe de instalações.

De outra forma, dada a diversidade de tipos de óleo usados em processos para produção de eletricidade, optou-se por considerar que o combustível empregado na operação em questão seria formado por uma mistura de óleos leves e pesados. As composições aproximadas desses fluidos são apresentadas a seguir na Tabela VI.2.

Os dados em questão correspondem à média dos perfis de composição de diversos tipos de óleos combustíveis gerados por refinarias européias.

**Tabela VI.2. Composição dos óleos combustíveis leve e pesado, empregados na geração de energia elétrica**

Componente	Tipo de óleo combustível	
	Leve	Pesado
Constituintes Principais (%)		
C	86,20	85,00
H	13,40	11,00
O	0,00	1,00
N	0,014	0,45
S	0,14	2,40
Constituintes Secundários (ppm)		
Al	nd	nd
As	nd	0,8
Ca	nd	5,0
Cd	nd	2,0
Cl	4,0	90,0
Co	nd	2,0
Cr	nd	1,0
Cu	0,03	3,0
F	0,4	9,0
Fe	nd	11,0
Hg	0,02	0,006
Mo	nd	1,0
Na	nd	46,0
Ni	nd	40,0
P	nd	nd
Pb	nd	3,5
Se	nd	0,75
Si	nd	nd
V	nd	160,0
Zn	0,03	2,5

Fonte: Adaptado TEAM (Ecobilan Group, 1998)

(\*): nd: dado não disponível

No caso particular das emissões atmosféricas geradas no módulo em questão, considerou-se para fins de elaboração de base de dados, que os gases que deixam o sistema não são provenientes de processo de combustão completa.

Os Eco-vetores referentes á geração de energia elétrica consumida pelos sistemas de produto de TSP e de FMP constam, respectivamente, dos *Anexos A16* e *A17* deste documento.

#### **VI.2.6. Subsistema – transporte**

Como foi visto nos itens precedentes, decidiu-se considerar o transporte nas seguintes etapas dos sistemas de produto estudados:

- sistema de produto do TSP:
  - o transporte do material lavrado até o britador primário e
  - o transporte do concentrado fosfático da usina de beneficiamento até os sítios de produção de ácido fosfórico e de TSP
- sistema de produto do FMP:
  - o transporte da rocha fosfática da mina até o sítio de produção do FMP e
  - o transporte do serpentinito da mina até o sítio de produção do FMP.

O modelo brasileiro de transporte de cargas está calcado principalmente no uso da via rodoviária. Para a coleta de dados do subsistema de transporte admitiu-se que o mesmo era efetuado em caminhão movido a óleo diesel, com capacidade para 28 t, em via não pavimentada no caso do transporte da rocha fosfática até o britador primário e em vias pavimentadas nos outros casos; nestas condições de operação o consumo médio de óleo diesel foi estimado em 2,2km/l.

Considerando a ausência momentânea de dados precisos e confiáveis para retratar o perfil de aspectos ambientais associados ao transporte no Brasil e a importância deste subsistema para o modelo ora em desenvolvimento, selecionou-se em SimaPro 5 (PréConsultants, 2002), uma base de dados já constituída, que fosse capaz de representar com a maior consistência possível o subsistema de transporte.

Antes de sua incorporação ao modelo, a base de dados selecionada passou por ajustes de estrutura, realizados com o intuito de torná-la mais representativa quanto à forma como o transporte ocorre no país.

A seleção da base de dados que pudesse representar adequadamente os deslocamentos de insumos ocorridos tanto no sistema de produto do TSP como no do FMP teve forçosamente que observar critérios bastante precisos de seleção.

Constatou-se que o fato de se considerar o transporte por via pavimentada ou não pavimentada não exerceu qualquer influência sobre o processo de seleção das alternativas disponíveis em SimaPro 5.

O produto da aplicação de tais critérios sobre as bases de dados de SimaPro 5 (PréConsultants, 2002) resultou em um subsistema formado por três subsistemas: a construção do veículo de carga, a infra-estrutura onde deverá dar-se o deslocamento e finalmente, a operação de transporte em si.

O *subsistema* relativo à *construção do veículo* é constituído por módulos de consumo de energia elétrica e de produção dos seguintes materiais: tintas, alumínio não reciclado, chumbo, vidro, borracha adesiva, painéis de madeira, cobre, papel, aço, polietileno de alta densidade, polipropileno e óleo diesel.

*A infra-estrutura para a realização do transporte* foi modelada com grande dificuldade, tendo em vista a total indisponibilidade de informações quanto aos elementos que dela fazem parte. Assim, foram desconsideradas passagens de nível, pontes e túneis que eventualmente se encontrassem ao longo dos trajetos. De fato, no presente modelo foram apenas considerados aspectos como tipo de piso, elementos usados na separação de faixas de sentidos opostos, demarcação de zonas de acostamento e sinalização. Mesmo em meio a todas essas simplificações, foram selecionados para compor o referido subsistema os módulos de consumo de energia elétrica e das produções de concreto não reforçado, cascalho, polietileno de alta densidade, aço, diesel e refino de betume.

Finalmente, a operação de transporte propriamente dita foi observada sob dois enfoques: o transporte de insumos em si e a estocagem de combustíveis disposta ao longo das vias de circulação.

Quanto ao transporte, foram consideradas todas as etapas relacionadas ao ciclo de vida do óleo diesel que precedem seu uso. A descrição dos elementos que as constituem é idêntica àquela já apresentada para o caso do óleo combustível, fato que portanto desobriga uma vez mais sua reprodução.

Por outro lado, os dados do perfil de aspectos ambientais para a estocagem de combustíveis foram colhidos a partir dos seguintes módulos de consumo de energia elétrica e de produção de diesel usada para a manufatura de equipamentos: concreto não reforçado, aço, refino de betume, cascalho e areia.

A seguir são apresentados os dados coletados para todos os casos de transporte selecionados no presente trabalho.

#### **VI.2.6.1. Transporte da rocha fosfática - mina ao britador**

- Distância percorrida entre a mina e a britagem primária: 12,4 km
- Eficiência de recuperação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no transporte: 100%
- Consumo de energia durante o transporte da rocha: 22,8 kJ/kg rocha fosfática transportada

O Eco-vetor do transporte da rocha fosfática desde a mina até o britador para as produções de ácido fosfórico e de TSP constam, respectivamente, dos *Anexos A18* e *A19*.

#### **VI.2.6.2. Transporte do concentrado fosfático – usina às fábricas de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>/TSP**

- Distância percorrida entre a mina e a usina de concentração: 775 km
- Eficiência de recuperação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no transporte: 96,5%
- Consumo de energia durante o transporte da rocha: 1426 KJ/kg rocha fosfática transportada

A definição da distância total a ser percorrida pelo concentrado fosfático foi realizada tomando-se por critério a situação menos favorável. Inicialmente, fixou-se como destino final da carga o Pólo Petroquímico de Cubatão (SP), onde se concentra a quase totalidade das plantas de produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e TSP selecionadas como fontes de informação para o estudo. De posse desse dado, partiu-se então para a realização de um estudo logístico, que buscou determinar a maior extensão entre o município mencionado e os locais onde o beneficiamento do mineral de apatita é praticado em escala industrial.

Em resposta a esse levantamento, determinou-se que a origem dos transportes de concentrado a ser adotada no modelo está localizada em Catalão (GO), cidade na qual encontra-se a área de extração da COPEBRÁS. Para a determinação da distância a ser percorrida entre os dois pontos anteriormente definidos, fez-se uso do Guia 4Rodas Brasil (2003).

Os Eco-vetores que representam os transportes de concentrado fosfático desde a usina de beneficiamento e as plantas de produção de ácido fosfórico e de TSP encontram-se no *Anexo A20* e *A21*.

#### **VI.2.6.3. Transporte de rocha fosfática – mina à fábrica de FMP**

- Distância entre a mina e a unidade de produção de FMP: 406 km
- Eficiência de recuperação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no transporte: 98%
- Consumo de energia durante o transporte da rocha: 747 KJ/kg rocha fosfática transportada

Ao elaborar-se o modelo para o *transporte de rocha fosfática* foi dado enfoque semelhante; no entanto, esse deslocamento tem como ponto inicial a cidade de Araxá (MG) – onde se desenvolve a lavra da rocha – e vai terminar em Poços de Caldas. Também para o presente caso, as informações descritas em BARBOSA (1980) serviram como referência para a estimativa de perdas de material particulado dessa operação.

O Eco-vetor do transporte da rocha fosfática desde a mina localizada em Araxá (MG) e a planta de produção de FMP da MITSUI encontra-se apresentado no *Anexo A22*.

#### **VI.2.6.4. Transporte de serpentinito – mina à fábrica de FMP**

- Distância percorrida entre a mina e a usina de concentração: 211 km
- Eficiência de recuperação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no transporte: 95%
- Consumo de energia durante o transporte da rocha: 388 KJ/kg rocha fosfática transportada

Nessa situação em particular, considerou-se que o serpentinito é transportado desde Niquelândia (GO) até a cidade de Poços de Caldas (MG), na qual encontra-se localizada a unidade da MITSUI de produção de FMP. Da mesma forma que para o caso do transporte no sistema de produto de TSP, fez-se uso na presente situação, do Guia 4Rodas (2003) para estabelecimento das distâncias compreendidas entre ambas as localidades. O Eco-vetor do transporte do serpentinito desde a mina localizada em Niquelândia (GO) e a planta de produção de FMP da MITSUI é apresentado no *Anexo A23*.

Constam dos *Anexos A24 e A25* os Eco-vetores consolidados dos subsistemas de transporte respectivamente para os sistemas de produto de TSP e FMP.

Concluída a etapa de Inventário para o presente estudo, foram geradas, tal como recomenda a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2001), tabelas consolidadas de aspectos ambientais para os sistemas de produto de TSP e de FMP. Estas tabelas são apresentadas respectivamente nos *Anexos A26 e A27*.

### **VI. 3. Avaliação de Impactos Ambientais**

Os objetivos a que se propõe o presente estudo exerceram forte influência tanto sobre a estruturação, quanto sobre a realização da atividade de Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida (AICV).

O fato do estudo ora em desenvolvimento concentrar-se em avaliar o desempenho ambiental do TSP e do FMP, fez com que duas decisões de cunho estrutural fossem tomadas: apresentar os resultados da AICV na forma de *Perfis de Impacto Ambiental*; e selecionar um modelo para a avaliação de impactos que, além de consistente, pudesse também descrever os efeitos sobre o meio ambiente e a saúde humana causados ao longo desses processamentos de forma tal, que futuras ações gerenciais visando suas melhorias pudessem ser tomadas.

Para que fosse possível fornecer um quadro preciso do desempenho ambiental de ambos os sistemas de produto, entendeu-se ser mais adequado que os Perfis de Impacto dos produtos fossem constituídos por indicadores do tipo “*midpoint*”.

Por conta disso, foram eleitos como potenciais de impacto para a realização da AICV deste estudo: Aquecimento Global (PAG), Depleção de Camada de Ozônio (PDCO), Toxicidade Humana (PTH), Ecotoxicidade Aquática (PEa), Acidificação (PAc) e Eutrofização (PEu).

Diante de tal decisão, restava apenas selecionar dentre os modelos existentes, aquele cuja filosofia de concepção fosse mais adequada ao quadro então instaurado. Após avaliar todas alternativas disponíveis, decidiu-se então optar pelo método *CML 2 baseline 2000*, proposto pelos pesquisadores do *Centre of Environmental Science – CML*, da Universidade de Leiden – Holanda.

O *CML 2 baseline 2000* é, em linhas gerais, uma atualização de outro método de avaliação de impactos denominado “*CML 1992*”, o qual foi por sua vez publicado no Guia Holandês para ACV pelo CML no mesmo ano de sua criação. A diferença principal entre ambos reside no fato de o *CML 2 baseline 2000* dispor de modelos mais precisos para a definição dos fatores de equivalência das categorias de impacto a ele relacionadas que seu predecessor.

Assim como a totalidade dos métodos concebidos para realizar avaliação de impactos ambientais, o *CML baseline 2000* opera definindo para cada uma das categorias de impacto por ele abrangidas – todas do tipo “*midpoint*” – um indicador padrão. Apresenta-se a seguir, ainda que de maneira sumarizada, uma descrição das categorias de impacto selecionadas para a AICV do presente estudo, tal como estas são abordadas pelo método *CML baseline 2000*.

#### *A) Aquecimento Global*

O Aquecimento Global, que pode resultar em efeitos adversos significativos sobre o ecossistema, a saúde e o bem estar humanos, está relacionado à emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera. O modelo de caracterização proposto pelo *Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC)* foi selecionado para o presente caso com o intuito de determinar os fatores de equivalência desse impacto.

Tais fatores, cujo horizonte temporal têm alcance de 100 anos, são expressos como *Potencial de Aquecimento Global (PAG100)*, na forma de kg CO<sub>2</sub>/kg emissão. O escopo geográfico deste indicador é de escala global.

### *B) Depleção de Camada de Ozônio*

Em virtude da Depleção de Camada de Ozônio, uma fração excedente de radiação do tipo UV-B atinge a superfície da Terra. Dependendo de fatores diversos ligados ao tempo, à condição e à intensidade, a exposição a tais radiações pode causar efeitos danosos irreversíveis sobre a saúde humana, os ecossistemas terrestres e aquáticos, os ciclos biogeoquímicos e até sobre certos materiais.

O modelo de caracterização utilizado para medir impactos dessa natureza foi desenvolvido pela *Organização Meteorológica Mundial (WMO)* e define o *Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO)* para os mais diferentes gases em termos de kg CFC-11 equivalente/kg emissão. O escopo geográfico do PDCO é mundial e seu horizonte temporal é infinito.

### *C) Toxicidade Humana*

Esta categoria refere-se aos efeitos causados por substâncias tóxicas sobre a saúde humana medidos na antroposfera, fato que exclui os efeitos tóxicos gerados em decorrência de exposições ocorridas no ambiente de trabalho.

Os fatores que caracterizam a Toxicidade Humana, descritos como *Potencial de Toxicidade Humana (PTH)*, são calculados por meio de modelos do tipo dose-resposta, cujos horizontes temporais serão normalmente infinitos. O valor de PTH para uma dada substância será expresso em kg de 1,4-diclorobenzeno equivalente/kg emissão. O escopo geográfico do efeito em questão, é determinado, em síntese, pela capacidade de dispersão da substância, podendo, portanto, variar de local a global.

### *D) Ecotoxicidade Aquática*

O indicador de Ecotoxicidade Aquática trata de impactos provocados sobre ecossistemas de águas doces, como resultado da emissão de substâncias tóxicas para o ar, a água e o solo. De maneira análoga à empregada para a Toxicidade Humana, o *Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa)* será calculado também com base em um modelo de dose-resposta, por meio do qual se pode estimar os efeitos causados por substâncias tóxicas aos meios em questão, para um horizonte de tempo infinito.

Assim como no caso anterior, os fatores de caracterização do PEA serão expressos em kg de 1,4-diclorobenzeno equivalente/kg emissão. Tal indicador pode ser aplicado às escalas local, regional, continental e mesmo à escala global.

#### **E) Acidificação**

Substâncias acidificantes causam, em geral, sérios impactos sobre solo, águas subterrâneas, águas superficiais, organismos, ecossistemas e materiais (em particular para edificações).

Os *Potenciais de Acidificação (PAc)* de emissões atmosféricas são calculados, para o método *CML baseline 2000*, pelo modelo de dispersão *RAINS10* adaptado, o qual descreve não apenas os mecanismos de dispersão das substâncias enquadradas nessa categoria, mas também, a forma como ocorre sua deposição.

Os PAc são expressos em kg de SO<sub>2</sub> equivalentes/kg emissão, seu horizonte temporal é infinito e a escala geográfica varia entre local e continental.

#### **F) Eutrofização**

O efeito adverso da Eutrofização – o qual pode também ser conhecido como Nutriferação – compreende os impactos causados em decorrência do nível excessivo de nutrientes presentes no meio-ambiente em virtude da disposição de rejeitos no ar, na água e no solo.

O estabelecimento do chamado *Potencial de Eutrofização (PEu)* baseia-se em um procedimento estequiométrico proposto por HEIJUNGS (1992), cujos resultados são expressos em kgPO<sub>4</sub> equivalentes/kg emissão.

A abordagem dispensada pelo autor para o trato de tal problema ambiental desconsidera a forma de dispersão de nutrientes no meio onde estes são dispostos. O modelo proposto por HEIJUNGS traz como vantagens um limite temporal infinito e uma escala geográfica variável entre local e continental.

A aplicação do *CML baseline 2000* aos casos em estudo foi realizada com o auxílio de SimaPro 5 (PréConsultants, 2002), um programa computacional concebido especificamente para a realização de estudos de ACV. Deve-se acrescentar aqui que a filosofia de criação do SimaPro 5 baseia-se nas recomendações e procedimentos técnicos descritos na norma ISO 14042 (2000).

A Tabela VI.3. mostra os resultados obtidos durante a etapa de Avaliação de Impactos Ambientais para os sistemas de produto de TSP e de FMP.

**Tabela VI.3. Avaliação de Impactos Ambientais provocados pelos sistemas de produto de TSP e FMP**

Categoria de Impacto	Unidade	TSP (45%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	FMP (20%P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )
Potencial de Aquecimento Global (PAG)	kg CO <sub>2</sub> eq.	42	160
Potencial de Dep. Camada Ozônio (PDCO)	kg CFC 11 eq.	5,2E-6	9,8E-6
Potencial de Toxicidade Humana (PTH)	kg 1,4-DB eq.	5,5	11,1
Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa)	kg 1,4-DB eq	0,28	0,93
Potencial de Acidificação (PAc)	kg SO <sub>2</sub> eq.	0,28	0,20
Potencial de Eutrofização (PEu)	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq.	0,87	0,12

Em uma avaliação preliminar dos resultados obtidos, pode-se constatar que o TSP demonstrou desempenho ambiental superior ao do FMP para todas as categorias de impacto selecionadas afora os Potenciais de Acidificação e de Eutrofização.

No caso particular do Potencial de Aquecimento Global, o FMP mostrou ser cerca de quatro vezes mais agressivo que seu homólogo fosfatado. Esse quadro se repete também para a Ecotoxicidade Aquática; desde o ponto de vista dessa categoria de impactos, a produção 41,66kgP<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de TSP traz efeitos lesivos sobre o meio ambiente com uma magnitude 3,3 vezes menor que se o mesmo elemento fosse disponibilizado como FMP.

Por outro lado, sob o ponto de vista de Eutrofização, por meio da qual podem ser medidos os impactos referentes às perdas de fósforo de ambos os processamentos, o FMP mostrou-se significativamente menos impactante que o TSP.

Uma análise de fato mais aprofundada dos resultados obtidos, na qual são apontados inclusive os subsistemas a imporem contribuições mais significativas para cada categoria de impacto terá lugar a seguir no Capítulo VII. deste documento.

## **VII. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO AMBIENTAL**

No presente capítulo é realizada a discussão dos resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia de ACV para os sistemas de produto de TSP e de FMP, no que se refere aos efeitos tanto sobre o meio ambiente quanto sobre a saúde humana, causados em decorrência das produções desses fertilizantes fosfatados. Dentro ainda dessa atividade, são também identificadas os subsistemas que impõem contribuições significativas para os impactos ambientais selecionados no presente estudo. Por meio desta abordagem, pretende-se que sejam preenchidos os objetivos a que se propôs esta tese de doutorado.

### **VII.1. Avaliação de desempenho do sistema de produto de TSP**

Na Figura VII.1. encontra-se representado um diagrama o sistema de produto de TSP no que se refere aos seus principais consumos de matéria e de energia. Observando-se este diagrama, gerado a partir do programa computacional SimaPro 5 (PréConsultants, 2002) é possível notar que os subsistemas nele indicados aparecem representados de maneira estratificada.

Tal abordagem foi concebida intencionalmente para que fossem evidenciadas as participações de processos auxiliares utilizados pelo processamento do fertilizante fosfatado em questão, tais como as gerações de energia elétrica e de gás natural, e o transporte de insumos.

Constam ainda da mesma figura indicações do ácido sulfúrico, da eletricidade e do vapor superaquecido que foram produzidos em decorrência do desenvolvimento da etapa de produção de  $H_2SO_4$ . No caso particular da eletricidade, é possível notar que o referido insumo encontra aproveitamento em dois pontos distintos do sistema de produto, os quais serão respectivamente a produção de  $H_3PO_4$  e a manufatura de TSP.

Diante do quadro acima exposto e a fim de que seja facilitado o entendimento da discussão dos resultados de impacto ambiental do referido sistema de produto, apresenta-se a seguir na Tabela VII.1, a correlação entre os subsistemas que foram definidos para o sistema de TSP, e os módulos constantes da figura em questão.

**Tabela VII.1. Correlação entre as unidades do sistema de produto de TSP e o diagrama gerado por SimaPro 5 (PreConsultants, 2002)**

Subsistema	Módulo gerado por SimaPro 5 (PreConsultants, 2002)
Lavra do mineral de apatita (produção de TSP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rocha Fosfática britada 1</li> <li>• Matriz Elétrica Brasil (1996)</li> </ul>
Transporte da rocha fosfática (produção de TSP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte caminhões 28t</li> <li>• RF britada transportada 1</li> </ul>
Beneficiamento (produção de TSP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matriz Elétrica Brasil (1996)</li> <li>• Produção de Gás Natural</li> <li>• Matriz Elétrica Brasil (1996)</li> <li>• Concentrado Fosfático 1</li> </ul>
Transporte do concentrado (produção de TSP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte caminhões 28t</li> <li>• CF Transportado 1</li> </ul>
Lavra do mineral de apatita (produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rocha Fosfática britada 2</li> <li>• Matriz Elétrica Brasil (1996)</li> </ul>
Transporte da rocha fosfática (produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte caminhões 28t</li> <li>• RF britada transportada 2</li> </ul>
Beneficiamento (produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matriz Elétrica Brasil (1996)</li> <li>• Produção de Gás Natural</li> <li>• Matriz Elétrica Brasil (1996)</li> <li>• Concentrado Fosfático 2</li> </ul>
Transporte do concentrado (produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte caminhões 28t</li> <li>• CF Transportado 2</li> </ul>
Produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></li> </ul>
Produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></li> <li>• H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</li> <li>• Vapor superaquecido (produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</li> <li>• Eletricidade (produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)</li> </ul>
Geração de energia elétrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matriz Elétrica Brasil (1996)</li> </ul>
Geração de gás natural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produção de Gás Natural</li> </ul>
Manufatura de TSP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TSP (45%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</li> </ul>

Cabe também mencionar que os totais de matéria e de energia apontados na Figura VII.1. foram calculados para um fluxo de referência de 92,59kg de TSP, que corresponde ao total desse produto estabelecido para a presente comparação.

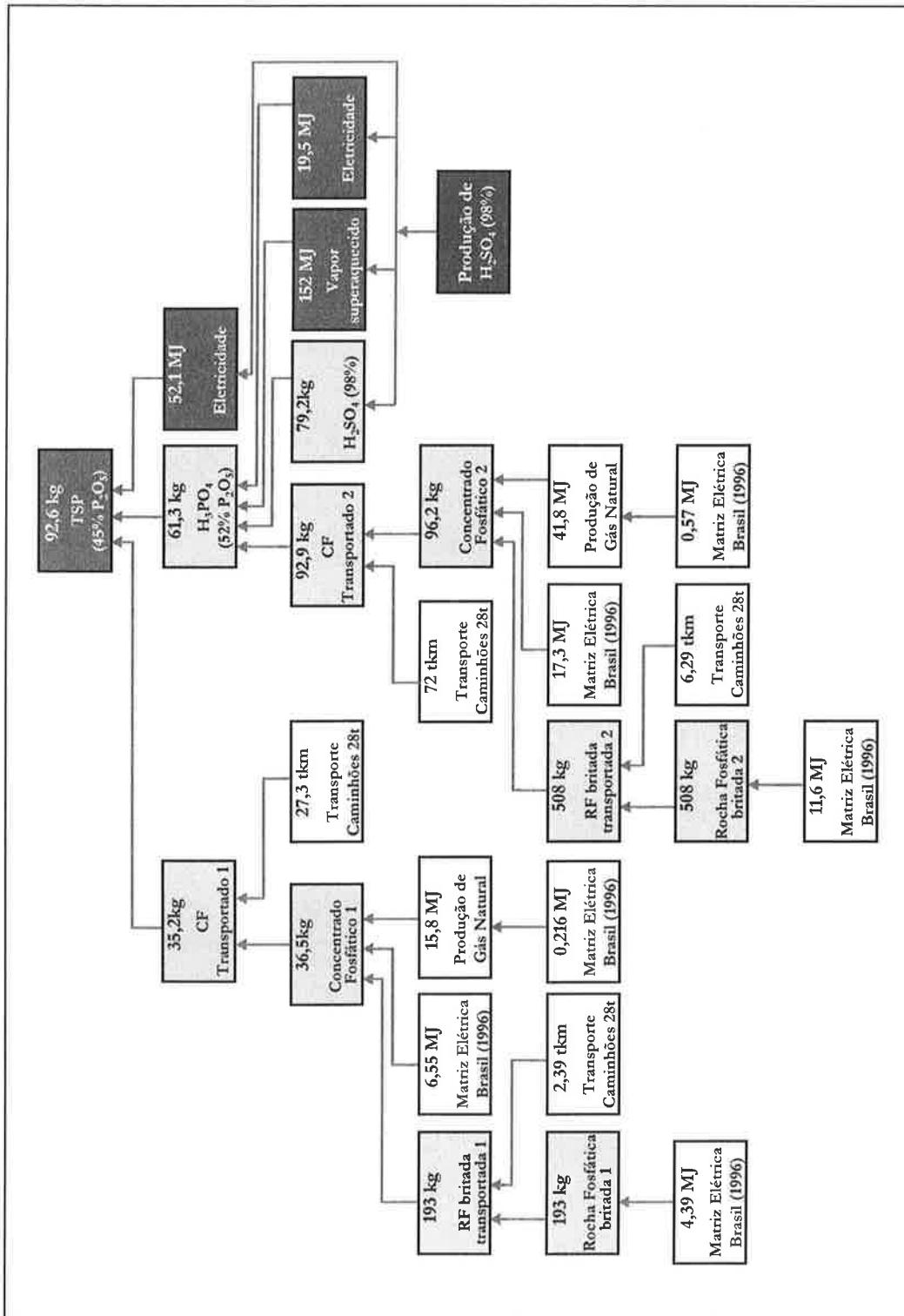


Figura VII.1. Distribuição de consumos materiais e energéticos para o sistema de produto de TSP

Como já foi dado a saber, a avaliação dos impactos ambientais causados pelo sistema de produto de TSP foi realizada tomando-se com referência o método *CML 2 baseline 2000* o qual encontra-se disponível no programa computacional SimaPro 5 (PreConsultants, 2002). Sob um ponto de vista meramente executivo, estabeleceu-se como critério para levar a cabo essa atividade, que aqueles impactos ambientais cujas contribuições montassem menos de 1,0% do total alcançado para sua respectiva categoria seriam desconsiderados pelo estudo. Passam a ser comentados a seguir, os resultados obtidos em decorrência dessa análise.

#### **VII.1.1. Potencial de Aquecimento Global (PAG)**

Tal como indicado anteriormente na Tabela VI.3., a contribuição do sistema de produto de TSP para efeito de PAG é de 42kg CO<sub>2</sub> eq.. A forma como esse total encontra-se distribuído pelos subsistemas que compõem o referido sistema aparece representada a seguir na Tabela VII.2.

**Tabela VII.2. Contribuições individualizadas por subsistema do sistema de produto de TSP para o PAG**

<b>Sistema de Produto de TSP</b>			
<b>Potencial de Aquecimento Global (PAG) - kg CO<sub>2</sub> eq.</b>			
<b>Substância</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub> (fóssil)</b>	<b>outros</b>
<b>meio receptor</b>	<b>ar</b>	<b>ar</b>	<b>-</b>
<b>Unidade de Processo</b>			
lavra da rocha fosfática - TSP	0	0.57	0.019
transporte rocha fosfática - TSP	0.060	0	0.0059
concentração rocha fosfática - TSP	0	9.7	0.036
transporte concentrado fosfatado - TSP	0.69	0	0.068
lavra da rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0	1.5	0.02
transporte rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.16	0	0.015
concentração rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0	25.5	0.13
transporte concentrado fosfatado - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1.81	0	0.18
produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	0	0
produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1.05	0	0
manufatura de TSP	0.40	0	0

Observando-se os resultados acima indicados, pode-se notar que as principais contribuições para a referida categoria de impactos ocorrem por conta das emissões atmosféricas de CO<sub>2</sub> e de CO<sub>2</sub> de origem fóssil.

As emissões de CO<sub>2</sub> indicadas na tabela VII.2 referem-se à disposição desse gás decorrentes de todas as outras fontes que não a queima de combustíveis fósseis, enquanto que aquelas indicadas na coluna CO<sub>2</sub> (fóssil) referem-se ao CO<sub>2</sub> gerado pela queima de combustíveis fósseis. Os valores expressos na coluna “outros” da tabela VII.2 referem-se às emissões de todos os outros gases (que não o CO<sub>2</sub>) que podem contribuir para o aquecimento global, expressos na unidade kg CO<sub>2</sub> equivalentes.

Uma avaliação individualizada dos valores obtidos, indica que os subsistemas que respondem pelas maiores contribuições para o PAG do sistema são os processos de beneficiamento de rocha para as produções de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> – cujo valor em termos de CO<sub>2</sub> de origem fóssil chega a 25,5kg CO<sub>2</sub> eq. – e de TSP – com 9,7kg CO<sub>2</sub> eq. gerados também como CO<sub>2</sub> fóssil.

Para que tais valores pudessem ser justificados de forma adequada, buscou-se uma abordagem mais detalhada do sistema em estudo. Para tanto, lançou-se mão do perfil de distribuição de PAG do sistema TSP apresentado na Figura VII.2.

De acordo com os dados deste diagrama, as contribuições mais significativas em termos de aquecimento global que tem lugar no beneficiamento são introduzidas por meio da produção de gás natural. No que se refere ao beneficiamento da rocha visando a produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> esse valor alcança a marca de 23,3kgCO<sub>2</sub>eq., ao passo que a concentração para efeito da manufatura do TSP contribui com 8,82 kgCO<sub>2</sub>eq.

Tal como mencionado no Capítulo IV – referente à Revisão da Literatura – consome-se gás natural na operação de beneficiamento da rocha a fim de remover umidade presente na mesma e antes de submete-la à digestão por ácidos minerais. Depreende-se por conta disso, que parte das emissões de CO<sub>2</sub> de origem fóssil advém dessa operação. Por outra parte, o modelo estabelecido para representar o subsistema de geração de gás natural conta, entre outras, com a operação de purificação do gás, por meio da qual os hidrocarbonetos de elevado peso molecular, associados a esse combustível fóssil são separados. Antes de serem dispostos no meio ambiente esse hidrocarbonetos são decompostos em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O por processos de combustão.

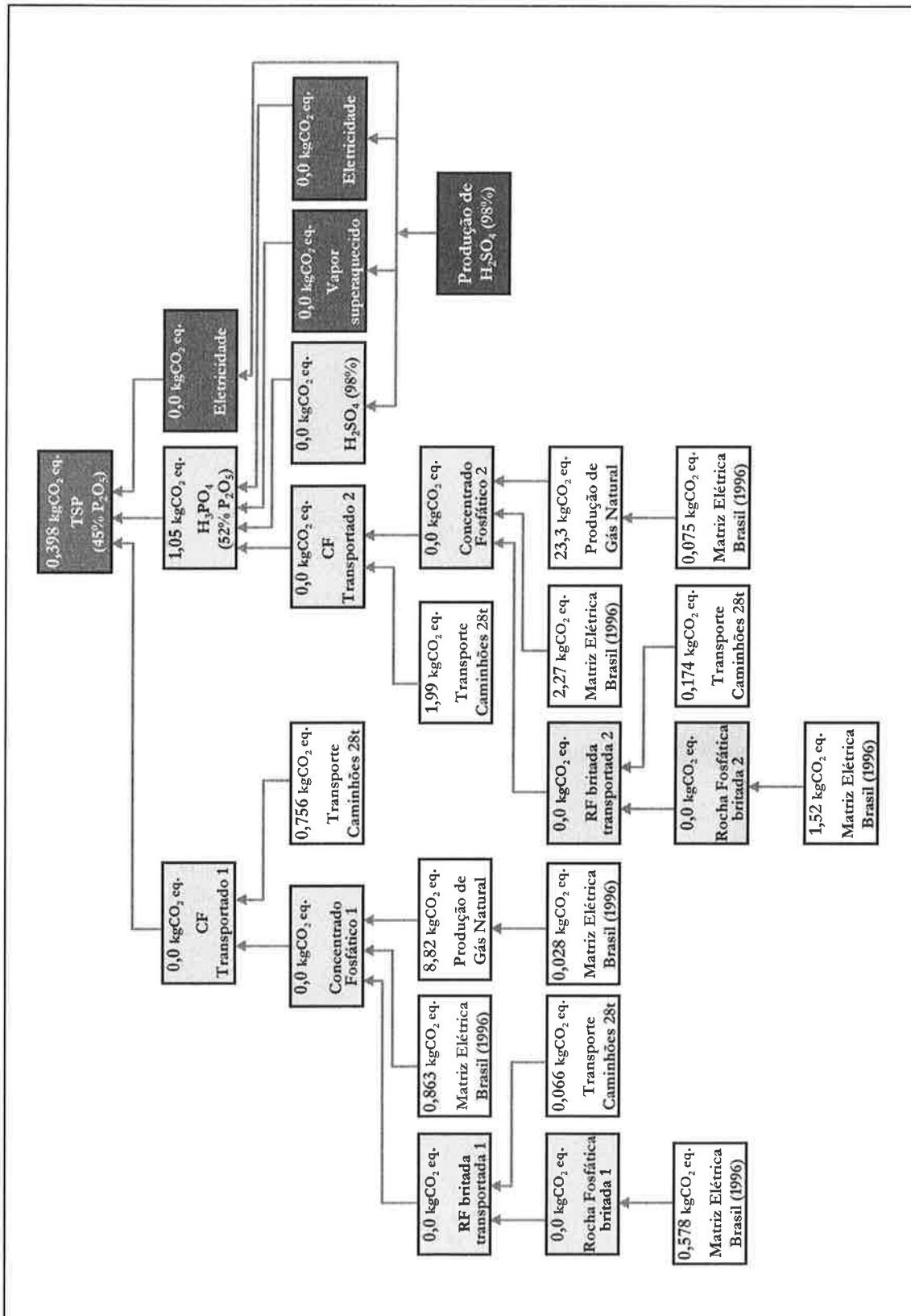


Figura VII.2. Perfil de distribuição do Potencial de Aquecimento Global (PAG) para o sistema de produto de TSP

Podem também exercer influência sobre os resultados de PAG, ainda que na forma de contribuições mais discretas, as emissões de CO<sub>2</sub> relativas à produção dos bens de capital empregados para a produção de gás natural e à geração de energia consumida no mesmo processamento.

Ainda que pouco representativas se comparadas aos valores já apresentados, merecem especial referência as contribuições para o PAG originadas nos subsistemas de produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> – 1,05kg CO<sub>2</sub> eq. – e de manufatura de TSP – 0,40kg CO<sub>2</sub> eq.

As emissões de CO<sub>2</sub> que provocam tais impactos, ocorrem em ambos os casos por conta do desprendimento do CO<sub>2</sub> presente no mineral de apatita quando a mesma é submetida aos ataques de ácido sulfúrico, para a produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, e do próprio ácido fosfórico no caso do TSP.

### VII.1.2. Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO)

Tal como apresentado na Tabela VI.3., o sistema de produto de TSP apresenta um Potencial de Depleção de Camada de Ozônio de 5,2E-6kgCFC11 eq.. As parcelas individualizadas que perfazem esse valor encontram-se indicadas na Tabela VII.3.

**Tabela VII.3. Contribuições individualizadas por subsistema do sistema de produto de TSP para o PDCO**

Sistema de Produto de TSP			
Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO) - kg CFC 11 eq.			
Substância	CFC-114	HALON-1301	outros
meio receptor	ar	ar	-
Unidade de Processo			
lavra da rocha fosfática - TSP	0	2.75E-08	2.00E-11
transporte rocha fosfática - TSP	4.10E-09	1.04E-07	1.10E-09
concentração rocha fosfática - TSP	0	4.71E-08	6.00E-12
transporte concentrado fosfatado - TSP	4.69E-08	1.19E-06	7.48E-09
lavra da rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0	7.25E-08	2.00E-11
transporte rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1.08E-08	2.74E-07	1.61E-09
concentração rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0	1.24E-07	6.00E-12
transporte concentrado fosfatado - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1.23E-07	3.13E-06	1.48E-08
produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	0	0
produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0	0	0
manufatura de TSP	0	0	0

De acordo com a Tabela VII.3, os principais impactos ambientais referentes à Depleção de Camada de Ozônio são originados por meio de emissões atmosféricas de HALON 1301 e de CFC 114.

HALON 1301 é o nome pelo qual o composto químico bromotrifluometano ( $\text{CF}_3\text{Br}$ ) é conhecido no mercado consumidor. Por conta de sua capacidade em atuar como seqüestrante de oxigênio, o  $\text{CF}_3\text{Br}$  encontra uso freqüente em sistemas de proteção contra incêndio, na conservação de equipamentos eletrônicos e de centros de comunicação, e na indústria bélica aeronáutica.

Por outro lado, as mesmas propriedades que o credenciam para tais funções, acabam também por fazer deste, um composto altamente agressivo para a camada de ozônio que envolve o planeta. Segundo relatos de HEIJUNGS (1992) o potencial degradação do HALON 1301 é doze vezes superior àquele apresentado pelo CFC11, o produto da família dos clorofluorcarbonos usado justamente como referência para representar esse impacto ambiental.

Já o diclorofluoretano ( $\text{CClF}_2\text{CClF}_2$ ), conhecido comercialmente por CFC114 é um gás usado tanto como fluido refrigerante em sistemas de ar condicionado, quanto como insumo para a fabricação de determinados polímeros de larga utilização no mercado, como o poliuretano expandido, as espumas fenólicas e de polietileno estruturado e as poliolefinas. Da mesma forma que seus homólogos da família dos clorofluorcarbonos, a emissão de CFC114 para a atmosfera resulta em marcante diminuição da camada de ozônio. Como relatado por HEIJUNGS (1992), o fator de equivalência do CFC114 com relação ao CFC 11 é de 0,85.

Muito embora o sistema de produto de TSP apresente impactos em termos de PDCO da ordem de miligramas de CFC 11 eq., os resultados que aparecem descritos na Tabela VII.3. dão conta que as maiores contribuições relacionadas a esse efeito ambiental ocorrem durante o transporte de insumos. Segundo a avaliação feita por meio do método *CML baseline 2000*, a somatória das parcelas referentes às emissões de HALON 1301 e de CFC 114 para o transporte de concentrado para a produção de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  contribuiu com 3,25E-6 kg CFC 11 eq. – cerca de 62,5% do total de impactos do sistema em termos de PDCO. Por sua parte, coube ao transporte de concentrado para fins de manufatura de TSP uma contribuição de 1,24E-6 kg CFC 11 eq., a qual correspondeu a 23,9% do montante total de impactos.

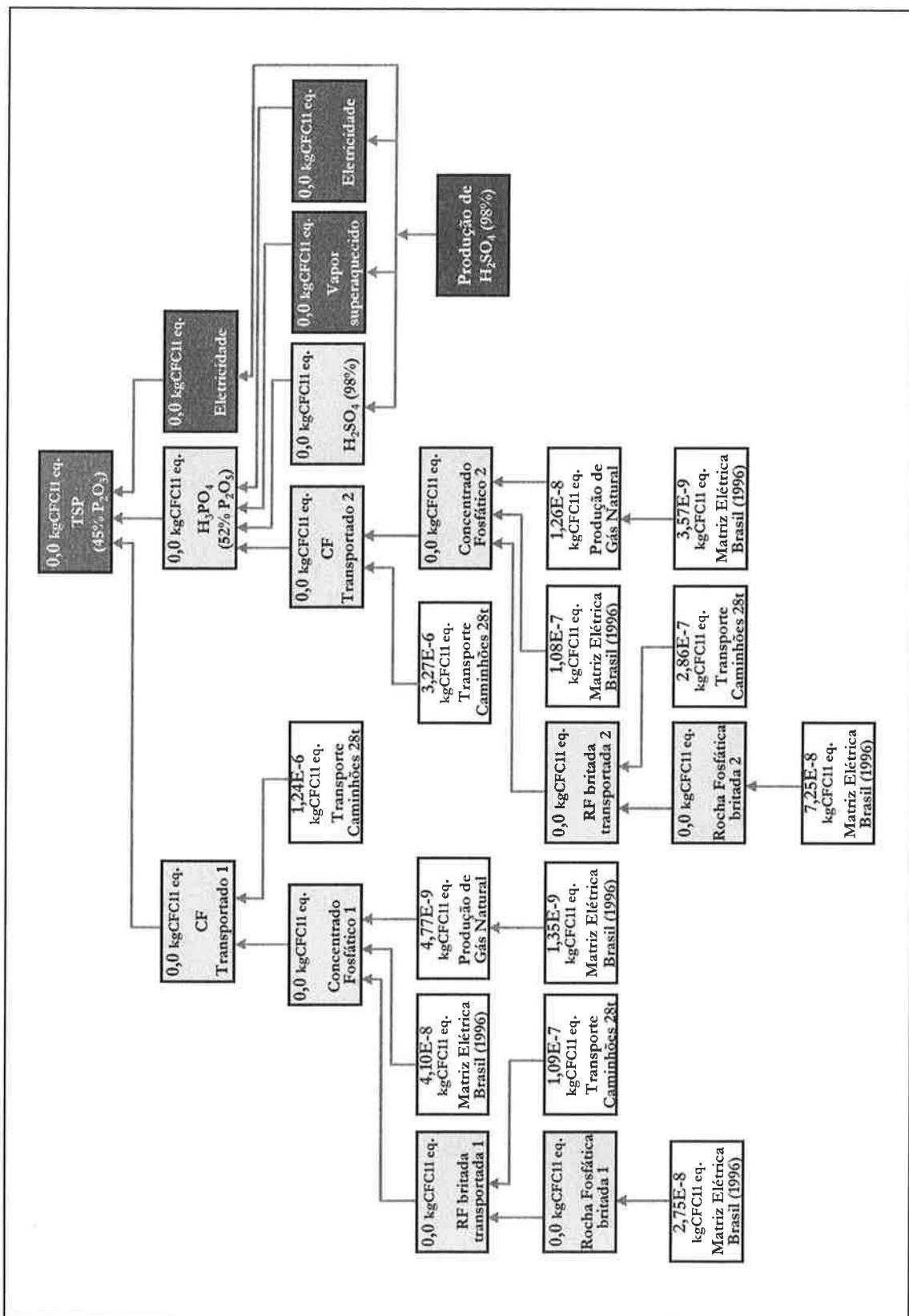


Figura VII.3. Perfil de distribuição do Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO) para o sistema de produto de TSP

No diagrama apresentado pela Figura VII.3, as contribuições para o PDCO são discriminadas para todos os subsistemas do sistema de produto de TSP. Mais uma vez nesse caso pode-se constatar a supremacia das unidades de transporte sobre as demais constituintes do sistema.

Muito embora com contribuições bastante inferiores às do HALON 1301 para ambos os casos, a geração do CFC 114 pode ser justificada por emissões fugitivas, e vazamentos, ocorridos nos processamentos dos polímeros usados para a manufatura de elementos dos quais se compõe o veículo de transporte. Nessa categoria estão, por exemplo, incluídos os painéis de operação e os estofamentos.

O fim a que em geral se destina o HALON 1301, como fluído de aspersão em sistemas de proteção contra incêndio, faz da identificação dos pontos potenciais de perda desse gás para atmosfera uma tarefa bastante difícil. De qualquer maneira, suas contribuições mais significativas permanecem relacionadas, assim como no caso do CFC114, ao transporte de concentrado de rocha fosfática.

### VII.1.3. Potencial de Toxicidade Humana (PTH)

De acordo com a Tabela VI.3., o Potencial de Toxicidade Humana do sistema de produto de TSP é de 5,5kg 1,4-Diclorobenzeno (DB). Tal como se pode constatar pelos resultados constantes da Tabela VII.4 indicada a seguir, esse total é produto da influência de uma gama bastante variada de substâncias, dispostas no ambiente sob a forma de emissões atmosféricas e de lançamentos de efluentes líquidos.

Pelos resultados apresentados na referida tabela, o sistema de produto de TSP apresenta contribuições bastante significativas em termos de Potencial de Toxicidade Humana por meio das emissões atmosféricas de arsênico (As), de benzeno ( $C_6H_6$ ), de níquel (Ni) e de hidrocarbonetos poliaromáticos (PHAs), assim como do lançamento de efluentes líquidos também de PHAs e de selênio (Se).

A somatória dos efeitos da disposição de tais substâncias no meio ambiente, alcança o valor de 3,88kg 1,4-DB, o qual corresponde a aproximadamente 70,5% do total de impactos medido para a categoria em questão.

Tabela VII.4. Contribuições individualizadas por unidade de processo do sistema de produto de TSP para PTH

Substância meio receptor	Sistema de Produto de TSP										Potencial de Toxicidade Humana (PTH) - kg 1,4-DB				
											Unidade de Processo				
	As	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Cd	HF	Ni	PHAs	Se	SO	SOx	V	Ba	PHAs	Sc	águas	Outros
	ar	ar	ar	ar	ar	ar	ar	ar	ar	ar	ar	ar	águas	águas	-
lavra da rocha fosfática - TSP	0.0034	4.54E-04	0.0023	0.0012	0.010	9.63E-04	4.35E-04	5.98E-05	0	0.0074	0.0018	0.0042	5.58E-05	5.00E-04	
transporte rocha fosfática - TSP	0.050	0.0092	0.0027	0.0028	0.0061	1.76E-05	0.0012	0	4.09E-05	0.0029	0.0061	0.0065	0.018		
concentração rocha fosfática - TSP	0.0053	0.012	0.0036	0.0019	0.016	0.085	9.19E-04	1.12E-04	0	0.011	0.0030	0.0064	8.61E-05	0.0019	
transporte conc. fosfatado - TSP	0.57	0.093	0.031	0.032	0.070	0.18	0.014	0	4.66E-04	0.033	0.033	0.070	0.075	0.030	
lavra da rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.0088	0.0012	0.0059	0.0031	0.027	0.0026	0.0012	1.57E-04	0	0.020	0.0046	0.011	1.47E-04	0.0013	
transporte rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.13	0.022	0.0072	0.0073	0.016	4.64E-05	0.0032	0	1.08E-04	0.0077	0.0076	0.016	0.017	0.048	
concentração rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.014	0.031	0.0094	0.0051	0.043	0.22	0.0024	2.96E-04	0	0.030	0.0081	0.018	2.27E-04	0.0039	
transporte conc. fosfatado - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1.49	0.25	0.082	0.084	0.19	0.47	0.037	0	0.0012	0.088	0.087	0.18	0.20	0.089	
produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0.015	2.96E-04	0	0	0	0	0	
produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
manufatura de TSP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

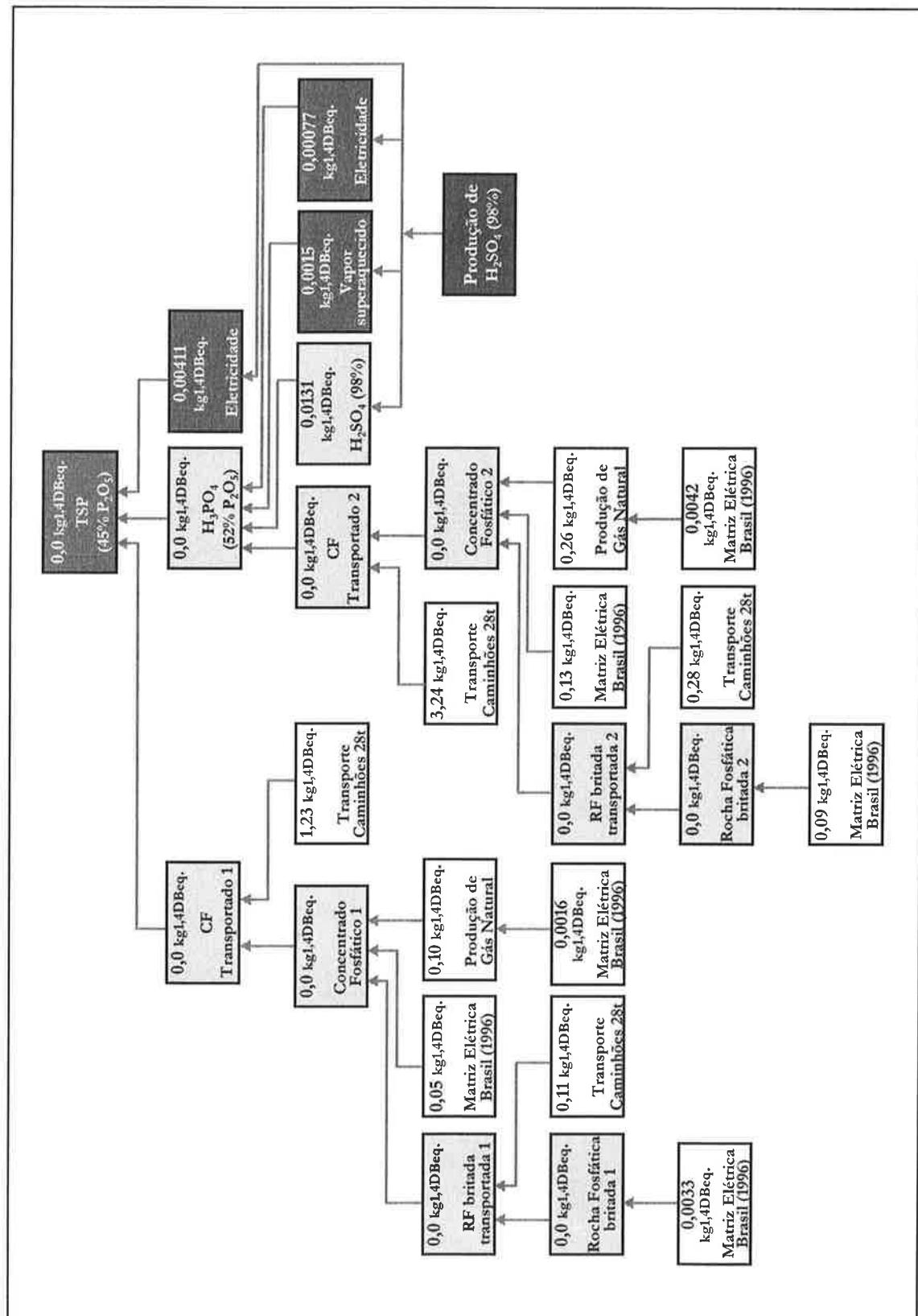


Figura VII.4. Perfil de distribuição do Potencial de Toxicidade Humana (PTH) para o sistema de produto de TSP

Observando-se a Figura VII.4, é possível notar que também para o caso da PTH os subsistemas do sistema de produto de TSP que trazem contribuições mais marcantes são aquelas relacionadas ao transporte de concentrado fosfático para a produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>.

A realização de uma análise sob tal enfoque, indica que do total de 3,25 kg 1,4-DB atribuídos ao sistema de produto pelos referidos subsistemas, 2,78 kg 1,4-DB – equivalentes a cerca de 86%, portanto – estão relacionados à disposição na natureza, das substâncias anteriormente citadas.

As explicações para tão marcante predominância residem nas elevadas perdas de metais pesados, ocorridas tanto por conta da produção de veículo de transporte, quanto das vias de rodagem.

Tal como apresentado no Capítulo VI – referente à definição dos modelos que representam os sistemas de produto – o subsistema de transporte que foi selecionado em SimaPro 5 (PreConsultants, 2002) é constituído de diversos módulos de produção de materiais. Quanto à fabricação do veículo, foram levadas em conta para efeito de composição desse modelo, as produções de alumínio não reciclado, de chumbo, de cobre e de aço, nas quais o descarte de metais para o ar, a água e o solo são práticas inerentes ao processo. Valendo-se de enfoque semelhante, a modelagem da infraestrutura necessária ao desenvolvimento da operação de transporte baseou-se nas produções de concreto não reforçado, de aço, e do refino de betume, onde perdas de mesma natureza são também usuais.

De maneira complementar, o fato de a composição do óleo diesel empregado para a movimentação dos veículos apresentar quantidades elevadas de PHAs, é capaz de justificar os impactos causados em termos de PTH pela disposição dessa classe de compostos tanto na forma de emissões para o ar, quanto de despejos líquidos.

#### **VII.1.4. Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa)**

Por meio da presente avaliação, chegou-se à conclusão que a produção de 92,59kg de TSP (45%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) provoca sobre o meio ambiente um impacto de 0,28kg 1,4-DB medido em termos de PEa. A Tabela VII.5. apresentada a seguir, traz dados discriminados por subsistema do sistema de produto em questão, para as substâncias que exercem contribuição em categoria de impacto.

Tabela VII.5. Contribuições individualizadas por unidade de processo do sistema de produto de TSP para PEA

Substância meio receptor	Sistema de Produto de TSP									
	Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa) kg 1.4-DB									
	Ni ar	V ar	Ba água	Cd água	Cu água	Ni água	PHAs água	Se água	V água	Zn água
Unidade de Processo										
lavra da rocha fosfática - TSP	1.82E-04	0.0020	6.42E-04	6.29E-07	5.13E-08	2.03E-06	1.50E-05	4.20E-04	2.89E-06	2.33E-05
transporte rocha fosfática - TSP	1.10E-04	8.18E-04	0.0011	4.20E-04	1.55E-04	1.97E-04	4.06E-04	6.10E-04	3.36E-04	0.0011
concentração rocha fosfática - TSP	2.90E-04	0.0032	0.0011	1.64E-06	1.70E-05	2.36E-05	7.72E-05	6.63E-04	4.46E-06	3.59E-05
transporte concentrado fosfatado - TSP	0.0013	0.0094	0.012	0.0048	0.0018	0.0023	0.0047	0.0070	0.0039	0.012
lavra da rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	4.80E-04	0.0054	0.0017	1.65E-06	1.34E-07	5.36E-06	3.03E-05	0.0011	7.63E-06	6.15E-05
transporte rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	2.91E-04	0.0022	0.0028	0.0011	4.08E-04	5.20E-04	0.0011	0.0016	8.90E-04	0.0028
concentração rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	7.66E-04	0.0085	0.0029	4.33E-06	4.47E-05	6.25E-05	2.04E-04	0.0018	1.18E-05	9.48E-05
transporte concentrado fosfatado - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.0033	0.025	0.032	0.013	0.0047	0.0059	0.012	0.018	0.010	0.032
produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
manufatura de TSP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

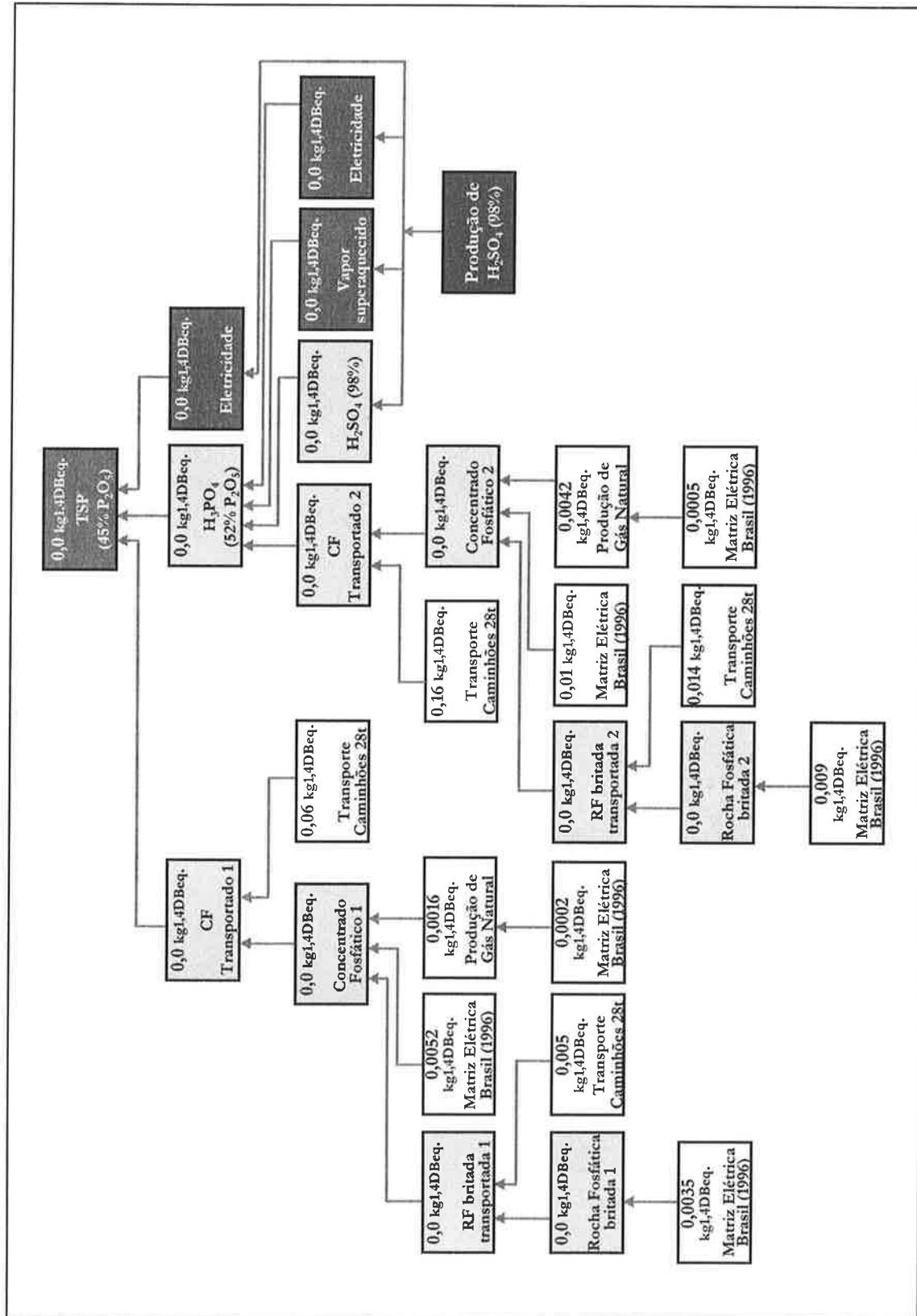


Figura VII.5. Perfil de distribuição do Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa) para o sistema de produto de TSP

Tendo em vista os resultados antes apresentados é possível depreender que as contribuições mais significativas para a Ecotoxicidade Aquática são decorrentes da presença de bário (Ba), cádmio (Cd), níquel (Ni) e Vanádio (V) nos efluentes líquidos.

Caso somados, os efeitos provocados pela disposição desses metais no meio ambiente alcançariam a marca de 0,14kg 1,4-DB, ou seja, precisamente a metade do valor total de desempenho do sistema no que se refere a essa categoria.

Sob o enfoque de identificação de oportunidade de melhoria de desempenho, uma análise do diagrama constante da Figura VII.5 indica que, tal como no caso do PTH, as atividades de transporte da rocha e do concentrado fosfático para fabricação de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e de TSP são as maiores contribuintes para a ecotoxicidade aquática.

A somatória das contribuições desses quatro subsistemas, monta cerca de 0,24kg 1,4-DB. Cerca de 92% desse total é referente aos transportes de concentrado entre a usina de beneficiamento e os centros de produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e de TSP, enquanto que na fração complementar - cerca de 8% - estão compreendidos os deslocamentos desde a mina e a unidade de concentração. A razão principal para tamanha diferença está atrelada ao fato de a relação entre a distância e a quantidade de material transportado desde a área de mineração até a planta de beneficiamento, ser perto de doze vezes menor que aquela estabelecida pelos volumes de concentrado que se trasladam da concentração aos centros de produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e de TSP.

Os motivos pelos quais as atividades de transporte revelam elevados níveis de contribuição no tocante ao PEa são idênticos àquelas já apresentadas para o caso da toxicidade humana, ou seja, perdas significativas de metais nos efluentes líquidos, ao longo das etapas de produção de veículo e implantação da infra-estrutura necessária ao desenvolvimento da atividade de transporte.

#### **VII.1.5. Potencial de Acidificação (PAc)**

No que se refere ao impacto ambiental de Acidificação, o sistema de produto de TSP apresentou uma contribuição de 0,28kg SO<sub>2</sub> eq. Como mostra a Tabela VII.6, as emissões atmosféricas de gases de NO<sub>2</sub>, de SO<sub>2</sub> e de SOx foram decisivas para a composição desse resultado. Basta ver que a somatória das contribuições tão somente dessas três substâncias confere um valor superior a 84% do total obtido para o efeito ambiental em questão.

**Tabela VII.6. Contribuições individualizadas por subsistema do sistema de produto de TSP para o PAc**

<b>Sistema de Produto de TSP</b>				
<b>Potencial de Acidificação (PAc) - kg SO<sub>2</sub> eq.</b>				
<b>Substância</b>	<b>NOx</b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>SO<sub>x</sub></b>	<b>outros</b>
<b>meio receptor</b>	<b>ar</b>	<b>ar</b>	<b>ar</b>	<b>-</b>
<b>Unidade de Processo</b>				
lavra da rocha fosfática - TSP	0	6.20E-04	0	1.90E-04
transporte rocha fosfática - TSP	1.40E-04	0	4.30E-04	1.80E-05
concentração rocha fosfática - TSP	0	0.0012	0	5.56E-04
transporte concentrado fosfatado - TSP	0.0016	0	0.0049	2.00E-04
lavra da rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0	0.0016	0	4.90E-04
transporte rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	3.62E-04	0	0.0011	4.80E-05
concentração rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0	0.0031	0	0.0015
transporte concentrado fosfatado - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0.0041	0	0.013	5.60E-04
produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	0.20	0.0043	0.040
produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0	0	0	0
manufatura de TSP	0	0	0	0

Com referência as emissões de NOx – cuja contribuição total é de 0,0062kg SO<sub>2</sub> eq. – as parcelas mais representativas vinculam-se, como em casos já avaliados, ao transporte do concentrado. Na presente situação, os óxidos de nitrogênio são gerados em virtude da queima de óleo diesel, o qual conta em sua composição com teores médios de N da ordem de 0,25% em massa.

Os impactos mais significativos em termos de PAc são causados por emissões de SO<sub>2</sub>, para o qual a contribuição total monta 0,21 kg SO<sub>2</sub> eq.. Perto de 97% desse valor pode ser atribuído à produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, por conta das perdas gassosas inerentes ao processo de Dupla Absorção e Duplo Contato (DA/DC).

Por fim, os subsistemas referentes ao transporte do concentrado fosfático para as fabricações de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e TSP, e a produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> revelaram-se como principais contribuidores em termos de PAc, no que se refere às emissões gasosas de SOx.

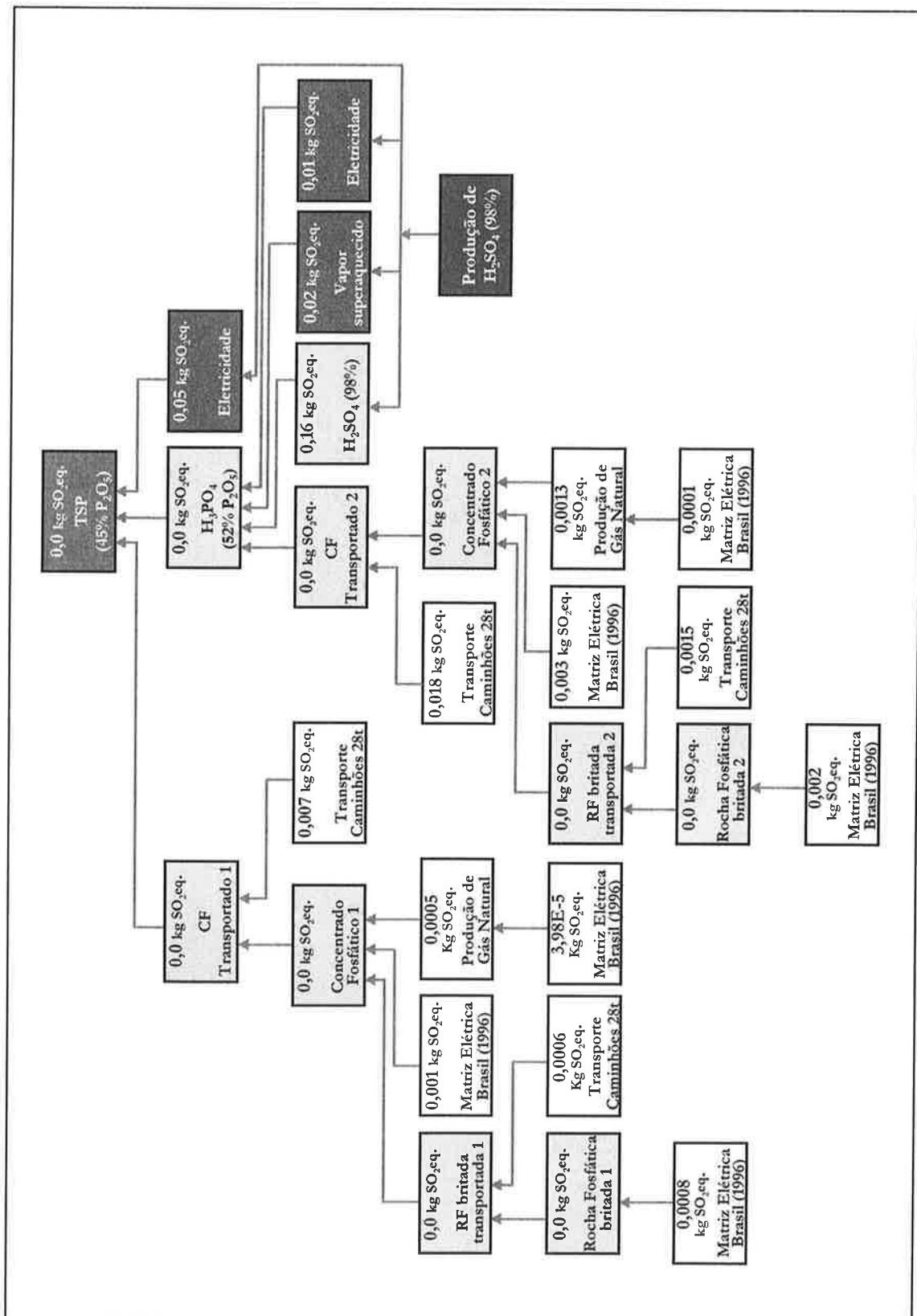


Figura VII.6. Perfil de distribuição do Potencial de Acidificação (PAc) para o sistema de produto de TSP

Assim como já houvera sido constatado antes para os gases de NOx, o uso de óleo diesel com teores de S maiores que 1,5% em massa é também capaz de justificar os resultados de emissão de óxidos de enxofre apresentados na Tabela VII.6.

Os impactos causados pela produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> são, por sua vez, decorrentes das emissões de névoas de SO<sub>3</sub> das unidades de absorção que constituem o processo DA/DC.

A Figura VII.6. traz o diagrama da distribuição do Potencial de Acidificação ao longo dos subsistemas do sistema de produto de TSP. Um exame desse esquema fará notar que foram associadas à eletricidade e ao vapor superaquecido que deixam o subsistema de produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, parcelas do total de impactos ambientais causados pelo sistema em termos de PAc.

Tal como apresentado no Capítulo IV os processos ditos de contato, dentre os quais está incluída a tecnologia DA, primam por recuperar até 60% de toda a energia gerada em função da transformação de enxofre elementar em H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, sob as formas de vapor e de energia elétrica. Como no presente caso essas mesmas utilidades são aproveitas por outros processos, a elas deve ser atribuída a condição de produto da fabricação de ácido sulfúrico, credenciando-as, assim, a repartir com o próprio H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (98%) as cargas ambientais decorrentes do referido processamento.

#### VII.1.6. Potencial de Eutrofização (PEu)

De acordo com os dados constantes da Tabela VI.3., o sistema de produto de TSP apresenta uma contribuição de 0,87 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq. para efeito de PEu. Segundo os dados apresentados pela Tabela VII.7, as maiores parcelas de contribuição para efeito em questão, ocorrem pela disposição de compostos fosfatados no meio ambiente.

Ainda segundo essa análise, as perdas de compostos fosfatados dissolvidos em correntes de despejos líquidos impõem uma carga ambiental de 0,17 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq. Por outro lado, os sais de fósforo descartados em associação com os demais resíduos sólidos, gerados no processo respondem por 0,70 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq, ou seja, 80,5% do total de contribuição para o impacto em questão.

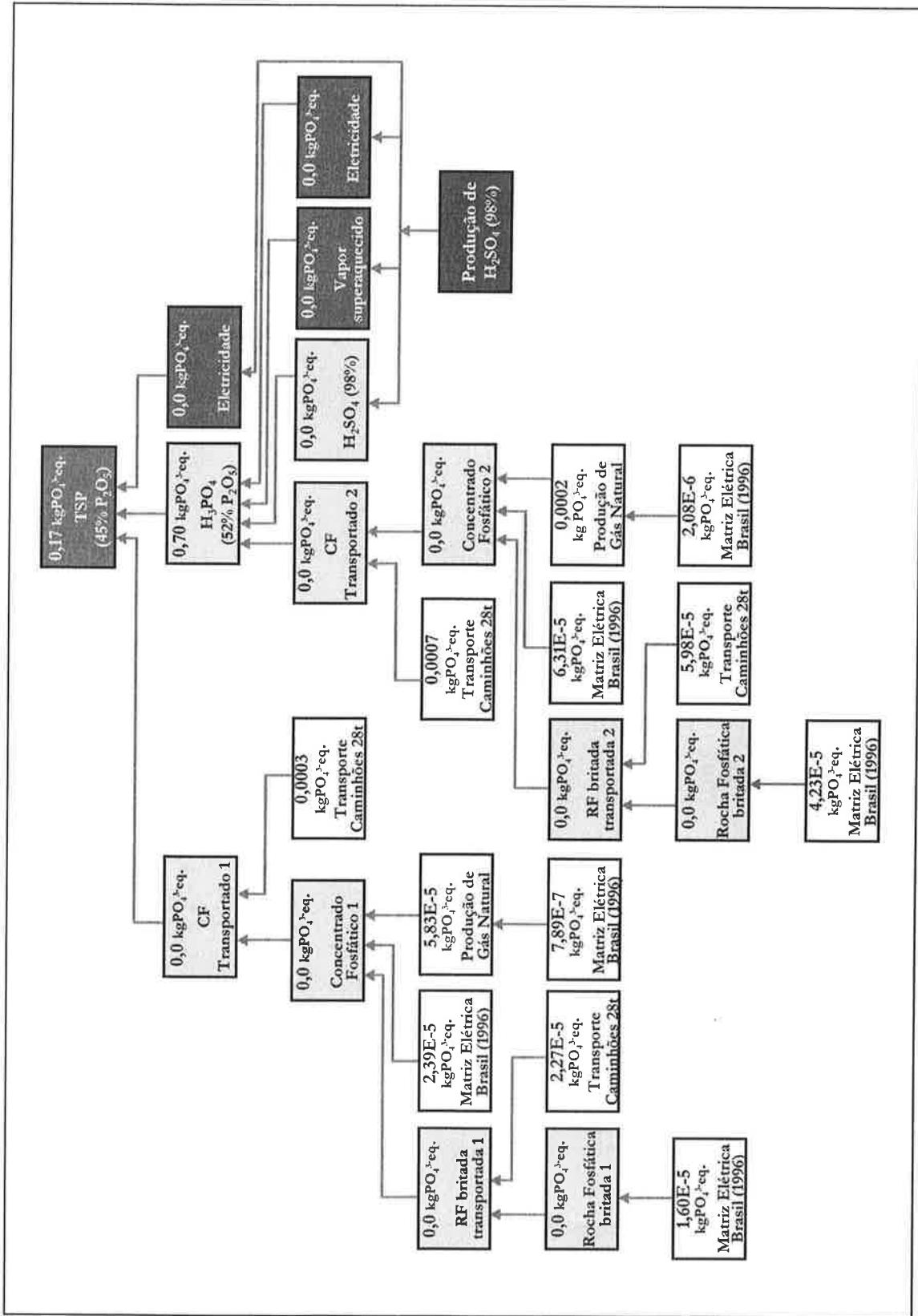
**Tabela VII.7. Contribuições individualizadas por subsistema do sistema de produto de TSP para o PEu**

<b>Sistema de Produto de TSP</b>			
<b>Potencial de Eutrofização (PEu) - kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq.</b>			
<b>Substância</b>	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	<b>outros</b>
<b>meio receptor</b>	<b>água</b>	<b>solo</b>	<b>-</b>
<b>Unidade de Processo</b>			
lavra da rocha fosfática - TSP	2,39E-10	0	1,60E-05
transporte rocha fosfática - TSP	1,43E-06	0	2,13E-05
concentração rocha fosfática - TSP	4,51E-08	0	8,30E-05
transporte concentrado fosfatado - TSP	1,64E-05	0	2,43E-04
lavra da rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	6,31E-10	0	4,23E-05
transporte rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	3,78E-06	0	5,60E-05
concentração rocha fosfática - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1,19E-07	0	2,19E-04
transporte concentrado fosfatado - H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	4,32E-05	0	6,41E-04
produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0	0	0
produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	3,07E-06	0,70	0
manufatura de TSP	0,17	0	0

Como indicado na Figura VII.7, as etapas do sistema de produto em estudo que mais contribuem para o PEu são a produção de ácido fosfórico e a manufatura de TSP.

O subsistema de produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> tem suas perdas de fosfatos associadas à geração de fosfogesso. Tal como apresentado no capítulo de Revisão da Literatura, cada tonelada de fosfogesso contém em média 6,5kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; tendo em vista que a forma de disposição desse resíduo sólido favorece a lixiviação da fração solúvel, os fosfatos nela contidos acabam se transferindo para o solo e para o lençol feático, trazendo como decorrência problemas de eutrofização de nível local.

No caso da manufatura de TSP, os impactos ambientais relativos ao PEu são decorrentes das perdas de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> contidos na corrente de efluentes líquidos da planta.



Figuras VII.7. Perfil de distribuição do Potencial de Eutrofização (PEu) para o sistema de produto de TSP

## VII.2. Avaliação de desempenho do sistema de produto de FMP

Tal como no caso anterior, o sistema de produto de FMP é representado de maneira estratificada pela Figura VII.2. Nesse diagrama, também elaborado com o auxílio do programa SimaPro 5 (PréConsultantes, 2002), são descritos os pontos de interação entre as etapas compreendidas na transformação do mineral apatítico e os processos auxiliares necessários a tal processamento do FMP, como as gerações de energia elétrica e de gás natural, e o transporte de insumos.

Visando manter a uniformidade do presente documento, apresenta-se a seguir na Tabela VII.8, a correlação entre os subsistemas definidos para o sistema de FMP e os módulos constantes da figura em questão.

**Tabela VII.8. Correlação entre as unidades do sistema de produto de FMP e o diagrama gerado por SimaPro 5 (PreConsultants, 2002)**

Subsistema	Módulo gerado por SimaPro 5 (PreConsultants, 2002)
Lavra da rocha fosfática	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rocha Fosfática lavrada</li><li>• Matriz Elétrica Brasil (1996)</li></ul>
Transporte da rocha fosfática até a unidade de produção de FMP	<ul style="list-style-type: none"><li>• Transporte caminhões 28t</li><li>• RF transportada</li></ul>
Britagem da rocha para acerto de granulometria	<ul style="list-style-type: none"><li>• Matriz Elétrica Brasil (1996)</li><li>• Rocha Fosfática britada</li></ul>
Transporte do serpentinito até a unidade de produção de FMP	<ul style="list-style-type: none"><li>• Transporte caminhões 28t</li><li>• Serpentinito transportado</li></ul>
Geração de energia elétrica	<ul style="list-style-type: none"><li>• Matriz Elétrica Brasil (1996)</li></ul>
Geração de gás natural	<ul style="list-style-type: none"><li>• Produção de Gás Natural</li></ul>
Manufatura do FMP	<ul style="list-style-type: none"><li>• FMP (20%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</li></ul>

As quantidades de matéria e de energia que constam da Figura VII.8. foram estabelecidas para um fluxo de referência de 208,33kg de FMP, o qual refere-se ao total de produto para o que foi realizado o presente estudo.

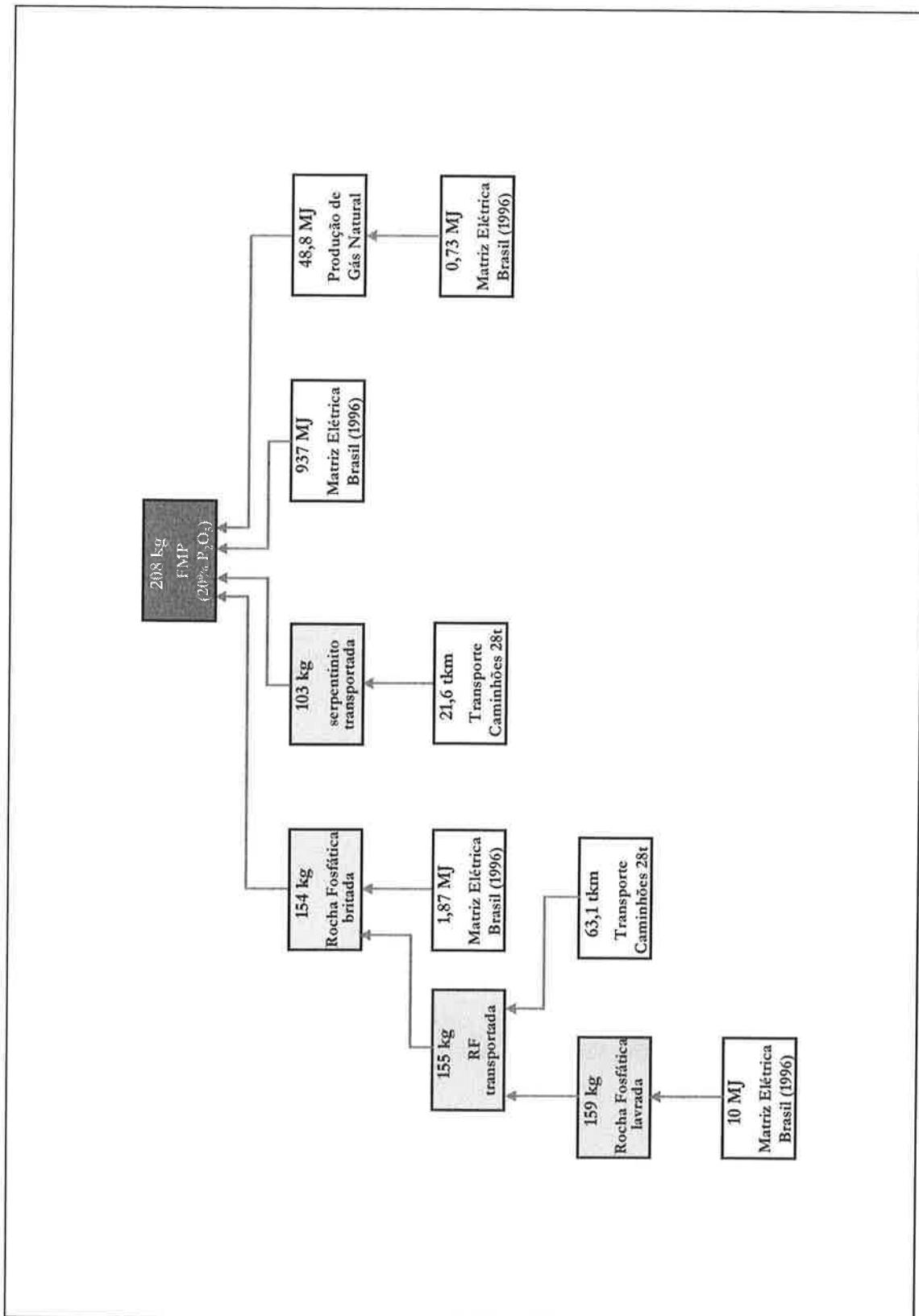


Figura VII.8. Distribuição de consumos materiais e energéticos para o sistema de produto de FMP

### VII.2.1. Potencial de Aquecimento Global (PAG)

A contribuição do sistema de produto de FMP em termos de PAG é de 160kg CO<sub>2</sub> eq.. A distribuição das parcelas que compõem esse total pelos subsistemas desse sistema de produto é representada a seguir pela Tabela VII.9.

**Tabela VII.9. Contribuições individualizadas por subsistema do sistema de produto de FMP para o PAG**

Sistema de Produto de FMP				
Potencial de Aquecimento Global (PAG) - kg CO <sub>2</sub> eq.				
Substância	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CFC-14	outros
meio receptor	ar	ar	ar	-
Unidade de Processo				
lavra da rocha fosfática	1,29	0,02	0	6,55E-04
transporte rocha fosfática	1,59	0,11	0,023	0,019
tratamento da rocha fosfática	0,24	0,0040	0	1,22E-04
transporte de serpentinito	0,55	0,039	0,0079	0,0065
manufatura de FMP	154	1,98	0	0,13

Ao fazer-se uma análise dos resultados acima indicados é possível perceber que as principais contribuições do sistema para o PAG estão por conta das emissões atmosféricas de CO<sub>2</sub>, que respondem por aproximadamente 157kg CO<sub>2</sub> eq., de CH<sub>4</sub> com 2,15 kg CO<sub>2</sub> eq e de CFC 14 (0,03kg CO<sub>2</sub> eq).

Olhando agora sob outro enfoque, o subsistema para o qual são imputadas as maiores contribuições em termos de aquecimento global é a manufatura de FMP. Sua contribuição atinge um valor acumulado de 156kg CO<sub>2</sub> eq.

Para que uma identificação adequada dos focos geradores desse impacto fosse realizada, empregou-se para o presente caso uma abordagem estratificada, por meio da qual foram observados individualmente os subsistemas que constituem o sistema FMP. Para tanto fez-se uso do perfil de distribuição de PAG apresentado a seguir pela Figura VII.9.

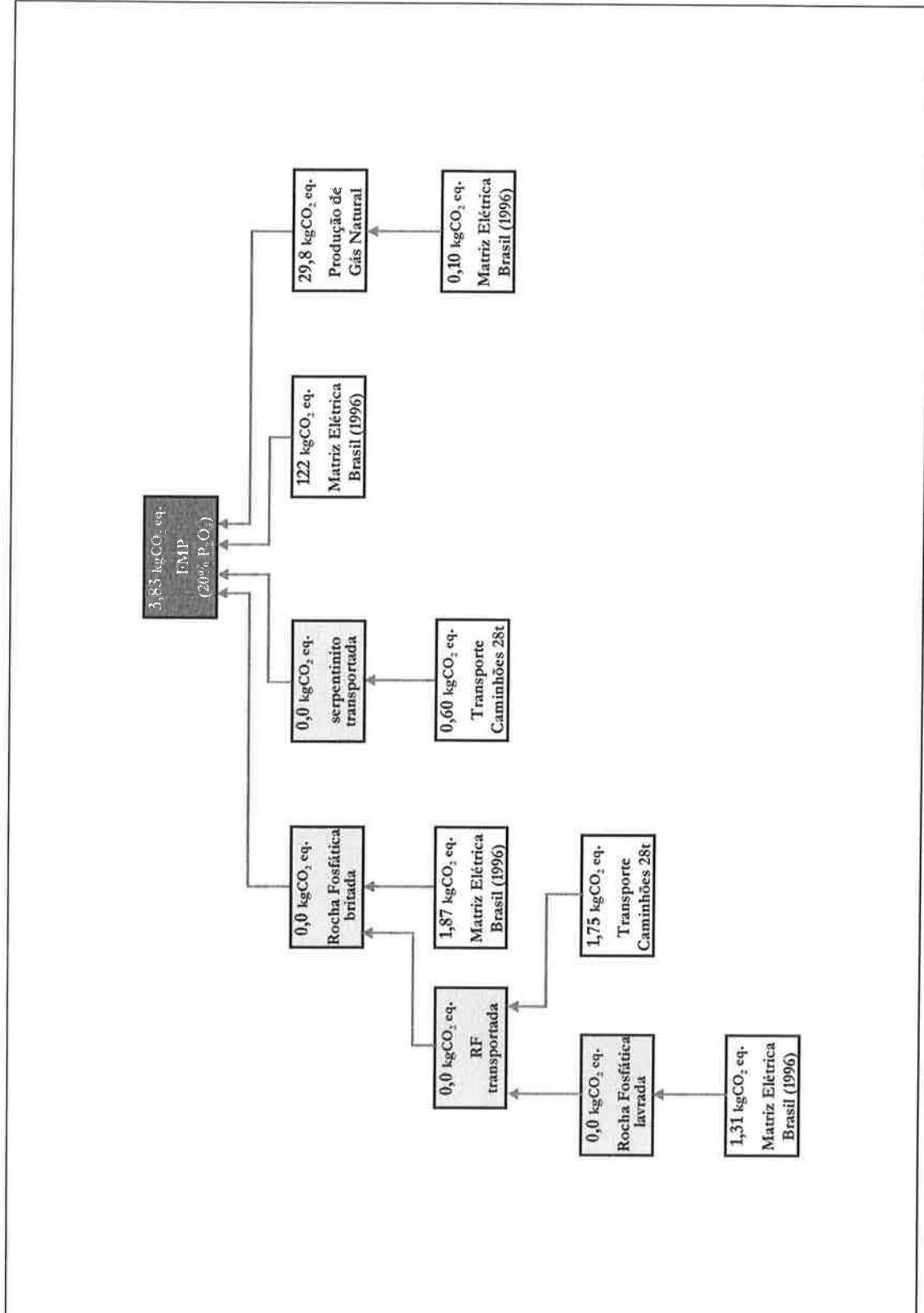


Figura VII.9. Perfil de distribuição do Potencial de Aquecimento Global (PAG) para o sistema de produto de FMP

Tomando-se por base os dados das Figuras VII.8. e VII.9. é possível notar que o fato de serem consumidos 937MJ de energia elétrica para a fusão da massa reacional sólida no forno de arco voltaico impôs um impacto ambiental em termos de PAG da ordem de 122kg CO<sub>2</sub> eq.

Como foi dado a saber, para efeito desse estudo o subsistema de geração de energia elétrica foi constituído tão somente pelos módulos de produção de energia de origem hidrelétrica e produção de energia termelétrica a partir da queima de óleo combustível. No que se refere a hidreletricidade, podem ser apontadas causas de duas naturezas que resultariam em contribuições para o aquecimento global: no tocante a construção do empreendimento, as produções de cimento e aço usados para a construção da barragem da usina; e ao longo da operação, as emissões gasosas de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub> decorrentes de processos de decomposição microbiológica que se desenvolvem no reservatório de água.

No que concerne à energia obtida pela via termelétrica, as causas prováveis de produção de PAG são as perdas gasosas de CO<sub>2</sub> e de CH<sub>4</sub> ocorridas durante o refino do óleo, e as emissões atmosféricas de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O geradas por ocasião da queima propriamente dita desse combustível.

Por fim, merece ainda ser destacada uma parcela de contribuição para PAG, cuja origem remete à constituição da própria rocha fosfática. Ao serem submetidas a temperaturas superiores à 750°C, as moléculas de gás carbônico presentes na apatita conseguem romper as forças de atração que as mantêm ligadas a outros constituintes da estrutura desse mineral. Desse fenômeno resultam emissões de CO<sub>2</sub>, que para as condições do presente estudo representaram uma contribuição de 3,83kg CO<sub>2</sub> eq..

### VII.2.2. Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO)

Em termos de Depleção de Camada de Ozônio o sistema de produto de FMP responde por um potencial de impacto de 9,8E-6 kgCFC11 eq.. A forma por meio da qual esse total é constituído, encontra-se discriminada no conteúdo da Tabela VII.10.

**Tabela VII.10. Contribuições individualizadas por subsistema do sistema de produto de FMP para o PDCO**

<b>Sistema de Produto de FMP</b>			
<b>Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO) - kgCFC11 eq.</b>			
<b>Substância</b>	<b>CFC-114</b>	<b>HALON-1301</b>	<b>outros</b>
<b>meio receptor</b>	<b>ar</b>	<b>ar</b>	<b>-</b>
<b>Unidade de Processo</b>			
lavra da rocha fosfática	0	6,33E-08	0
transporte rocha fosfática	2,74E-06	1,09E-07	1,95E-08
tratamento da rocha fosfática	0	1,18E-08	0
transporte de serpentinito	9,40E-07	3,73E-08	6,69E-09
manufatura de FMP	0	5,94E-06	0

De maneira análoga àquela observada para o TSP, as contribuições de maior significância em termos de PDCO atribuídas ao sistema de produto de FMP, provêm das emissões atmosféricas de HALON 1301 e de CFC 114.

Muito embora orçadas em dimensões da ordem de miligramas de CFC 11 eq., os resultados indicados tanto pela Tabela VII.10, quanto na Figura VII.10., dão conta que os subsistemas com maior grau de comprometimento em termos de diminuição de camada de ozônio são o transporte de insumos e a geração de eletricidade.

De acordo com o método *CML baseline 2000*, às emissões de HALON 1301 e de CFC 114 originárias dos transportes de rocha e de serpentinito, perfazem juntas 3,83E-6 kg CFC 11 eq., o que corresponde a 38,8% do impacto gerado pelo sistema para a referida categoria. Por outro lado, a manufatura do FMP respondeu sozinha por uma contribuição individual de 5,94E-6 kg CFC 11 eq..

As justificativas para as emissões gasosas de CFC 114 relativas ao transporte de insumos são idênticas àquelas fornecidas antes para o caso do TSP, e referem-se às liberações que têm lugar durante a produção de elementos internos do veículo, tais como os painéis de operação e os estofamentos.

O caso do HALON 1301 segue também a mesma tônica já apresentada. Tendo em vista que o uso principal a que esse fluido se destina corresponde a uma atividade periférica, a identificação de pontos mais específicos de perdas tanto para o transporte, quanto para a manufatura do FMP acabou por ser prejudicada.

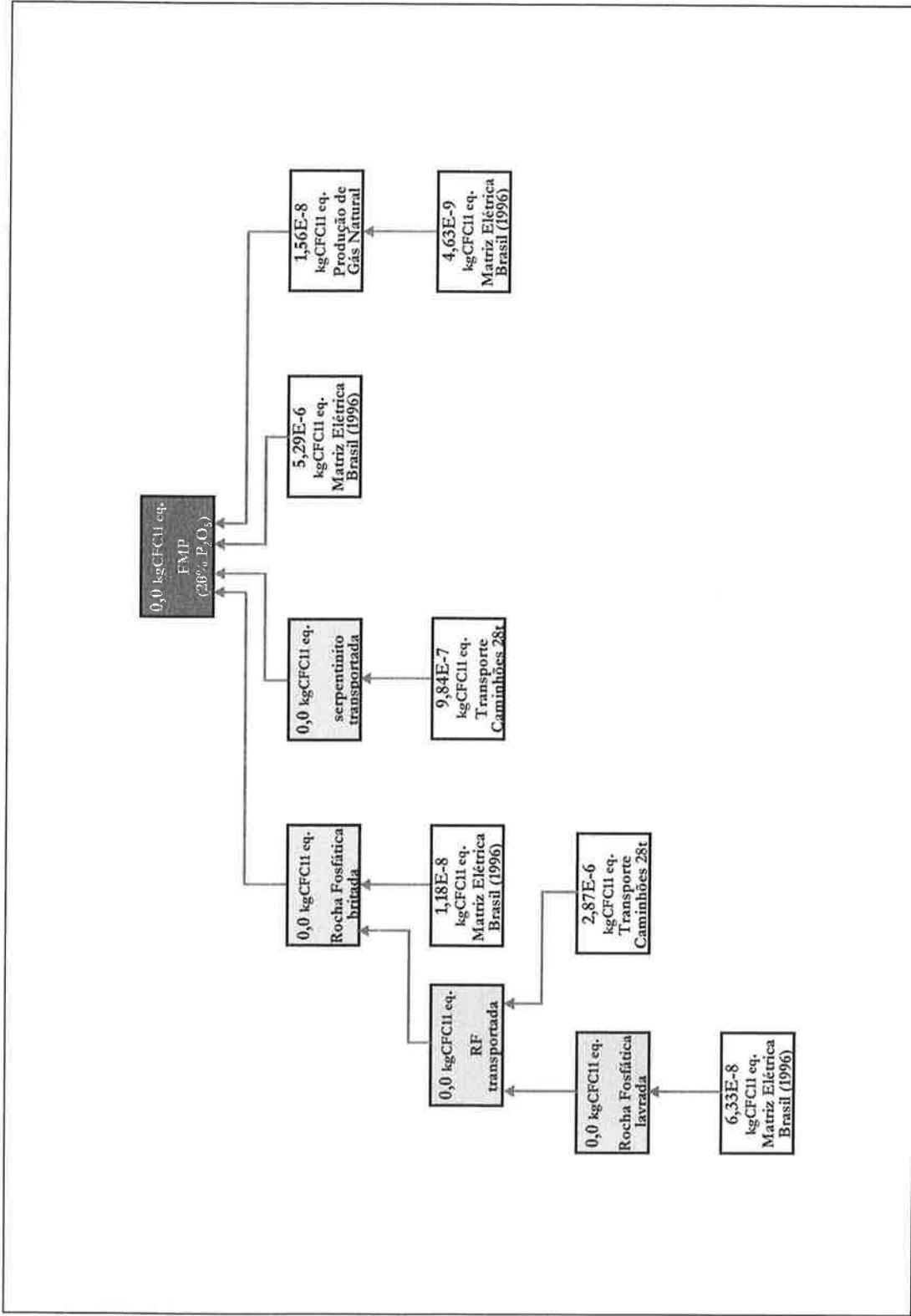


Figura VII.10. Perfil de distribuição do Potencial de Depleção de Camada de Ozônio (PDCO) para o sistema de produto de FMP

### VII.2.3. Potencial de Toxicidade Humana (PTH)

O sistema de produto de FMP apresentou, segundo a avaliação realizada por *CML baseline 2000*, uma contribuição para efeito de Toxicidade Humana de 11,1kg 1,4-DB. Esse total é proveniente de emissões atmosféricas e perdas líquidas de um conjunto de substâncias, composto em sua grande maioria por metais pesados.

Tal como é dado a saber pelos resultados da Tabela VII.11, as contribuições mais significativas em termos de PTH são proporcionadas pelas emissões gasosas de As (2,46kg 1,4-DB), Ni (2,39kg 1,4-DB), V (1,65kg 1,4-DB), Cd (0,58kg 1,4-DB) e PHAs (0,91kg 1,4-DB). Além destes, podem ainda ser incluídos na presente relação, o lançamento de despejos líquidos contaminados com PHAs (1,11kg 1,4-DB).

A somatória dos efeitos da disposição dessas substâncias no meio ambiente, perfaz uma contribuição total de 9,1kg 1,4-DB, correspondente a 82% dos impactos causados para a referida categoria.

A observação da Figura VII.11. permite concluir que o sistema de produto em questão, tem suas maiores contribuições para efeito de PTH ligadas aos subsistemas de transporte de rocha e manufatura do FMP. A participação do transporte da rocha fosfática – de 2,84kg 1,4-DB ou 25,5% do total imputado ao sistema – pode ser explicada pelas perdas de metais pesados decorrentes da produção dos veículos e da construção da infra-estrutura necessária à realização desse serviço.

Tal como descrito no Capítulo VI a modelagem da fabricação dos veículos de rodagem leva em conta as produções de alumínio não reciclado, de chumbo, de cobre e de aço, nas quais a presença de metais nos rejeitos gasosos é uma característica inerente ao processo. O estabelecimento do perfil de aspectos ambientais relativos à infra-estrutura de transporte baseou-se, por sua vez, nas produções de concreto não reforçado, aço e no refino de betume, onde as perdas de mesma natureza são também usuais. Por fim, a presença de PHAs na composição do óleo diesel queimado durante a movimentação dos caminhões, justifica os impactos ambientais em termos de PTH, causados pela disposição no meio ambiente dessa classe de produtos.

**Tabela VII.11. Contribuições individualizadas por unidade de processo do sistema FMP para PTH**

Substância meio receptor	Sistema de Produto de FMP										
	Potencial de Toxicidade Humana (PTH) - kg 1,4-DB										
	As	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Cd	HF	Ni	PHAs	Se	V	Ba	PHAs	Se
Unidade de Processo											-
lavra da rocha fosfática	0,0074	0,0010	0,0051	0,0026	0,023	8,42E-04	9,62E-04	0,016	3,99E-04	0,0095	0
transporte rocha fosfática	1,31	0,22	0,072	0,073	0,16	0,41	0,032	0,077	0,077	0,16	0,17
tratamento da rocha fosfática	0,0014	1,91E-04	9,47E-04	4,85E-04	0,0043	1,57E-04	1,80E-04	0,0031	7,46E-04	0,0018	0
transporte de serpentinito	0,45	0,074	0,025	0,025	0,056	0,14	0,011	0,027	0,026	0,055	5,90E-02
manufatura de FMP	0,69	0,13	0,47	0,24	2,14	0,36	0,090	1,53	0,37	0,88	0
										0,26	

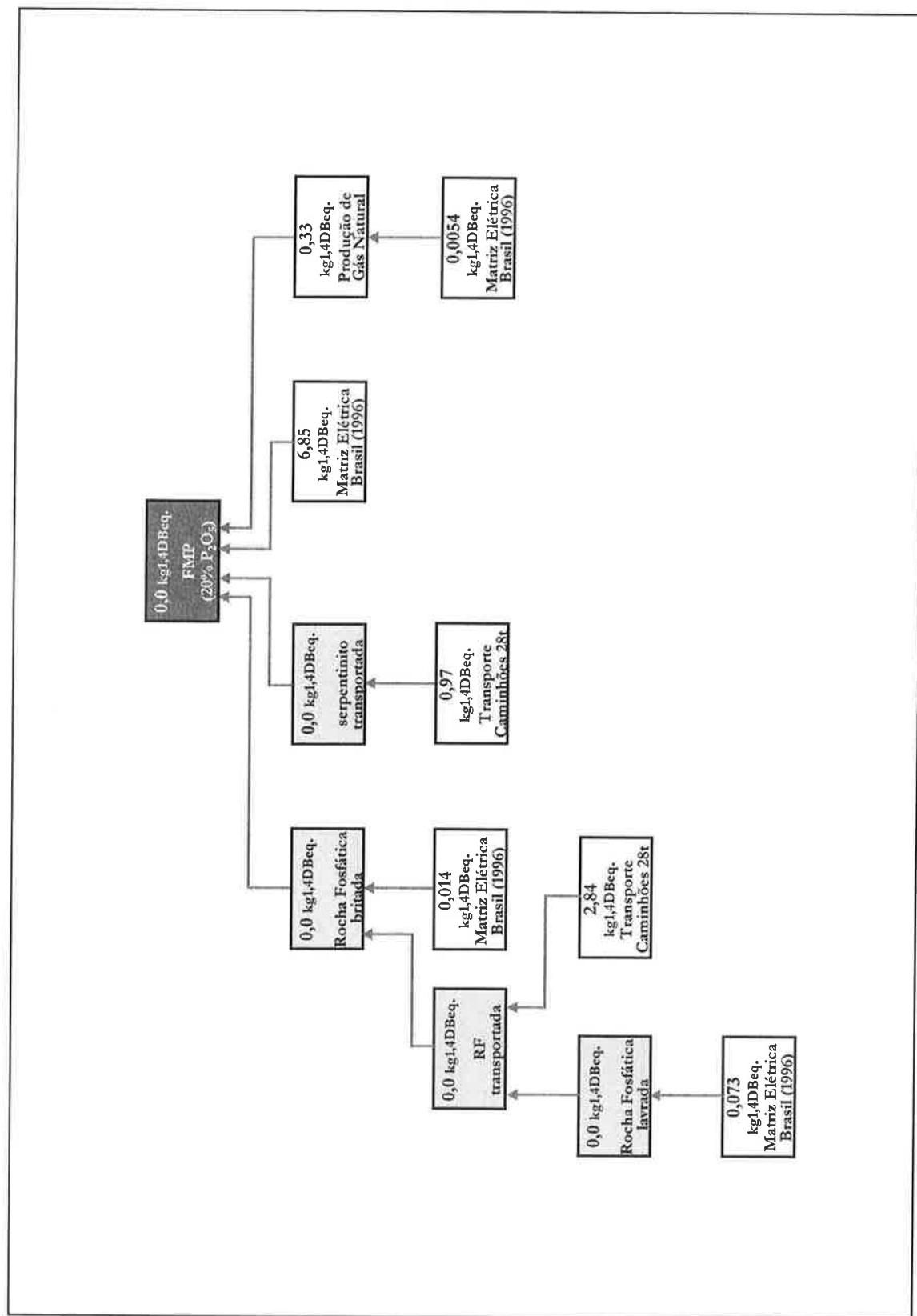


Figura VII.11. Perfil de distribuição do Potencial de Toxicidade Humana(PTH) para o sistema de produto de FMP

O consumo de energia elétrica mostrou-se novamente decisivo para o perfil de impactos do sistema de produto de FMP, agora no que concerne à contribuição da manufatura desse fertilizante. Os lançamentos para a atmosfera de metais pesados associados à manufatura do FMP são justificados principalmente pelo tipo de óleo combustível adotado para geração de energia de origem termelétrica. Tal como apresentado na Tabela V.2 (pg. 143), esse combustível apresenta em sua composição substâncias tais como As, Cd, Ni e V, as quais serão forçosamente lançadas na atmosfera durante o processo de combustão. Por outro lado, perdas de C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> e de PHA, que também contribuem para PTH, estão associadas ao refino desse mesmo insumo.

#### VII.2.4. Potencial de Ecotoxicidade Aquática (PEa)

Tal como antes indicado pela Tabela VI.3., os impactos ambientais referentes ao Potencial de Ecotoxicidade Aquática, provocados pelo sistema de FMP são de 0,93kg 1,4-DB. As contribuições individuais de cada subsistema no que diz respeito a essa categoria de impacto, encontram-se indicadas a seguir pela Tabela VII.12.

Uma análise desses resultados leva a crer que o processamento do 208,33kg de FMP (20%P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) impõe suas contribuições mais significativas em termos de PEa por conta das emissões atmosféricas de vanádio (V) e das perdas líquidas de bário (Ba). Juntas, essas quantidades respondem por aproximadamente 68% do impacto total do sistema para essa categoria.

No tocante ao desempenho ambiental do sistema de produto, o diagrama da Figura VII.12. revela serem o transporte de rocha fosfática e a manufatura de FMP os subsistemas com maiores contribuições para a ecotoxicidade aquática.

O transporte do mineral de apatita entre a mina de Araxá e a área de produção da MITSUI apresenta uma contribuição para o PEa, equivalente a 0,14kg 1,4-DB. As razões capazes de justificar tal desempenho estão – tal como no caso da toxicidade humana – ligadas às perdas de compostos metálicos para o ar e para a água, ocorridas tanto no curso da produção dos veículos de carga quanto durante a implantação da infra-estrutura necessária ao desenvolvimento da referida atividade.

Tabela VII.12. Contribuições individualizadas por unidade de processo do sistema FMP para P<sub>Ea</sub>

meio receptor	Substância	Sistema de Produto de FMP												
		Potencial de Ecotoxicidade Aquática (P <sub>Ea</sub> ) - kg 1,4-DB												
		Ni	PHAs	V	Ba	Cd	Co	Cu	Ni	PHAs	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	Se	V	
ar		ar	ar	ar	água	água	água	água	água	água	água	água	água	
Unidade de Processo														
lavra da rocha fosfática	4,12E-04	0	0,0045	0,0015	0	0	0	0	0	9,45E-04	0	0		
transporte rocha fosfática	0,0029	0	0,021	0,028	0,011	0,0041	0,0052	0,011	0,016	0	0,0089	0,028		
tratamento da rocha fosfática	7,71E-05	0	8,38E-04	2,72E-04	0	0	0	0	1,77E-04	0	0	0		
transporte de serpentinito	0,0010	0	0,0073	0,0096	0,0038	0,0014	0,0018	0,0037	0,0055	0	0,0031	0,0097		
manufatura de FMP	0,039	8,33E-05	0,42	0,14	0	0	6,96E-05	2,02E-04	0,089	6,96E-05	0	0		

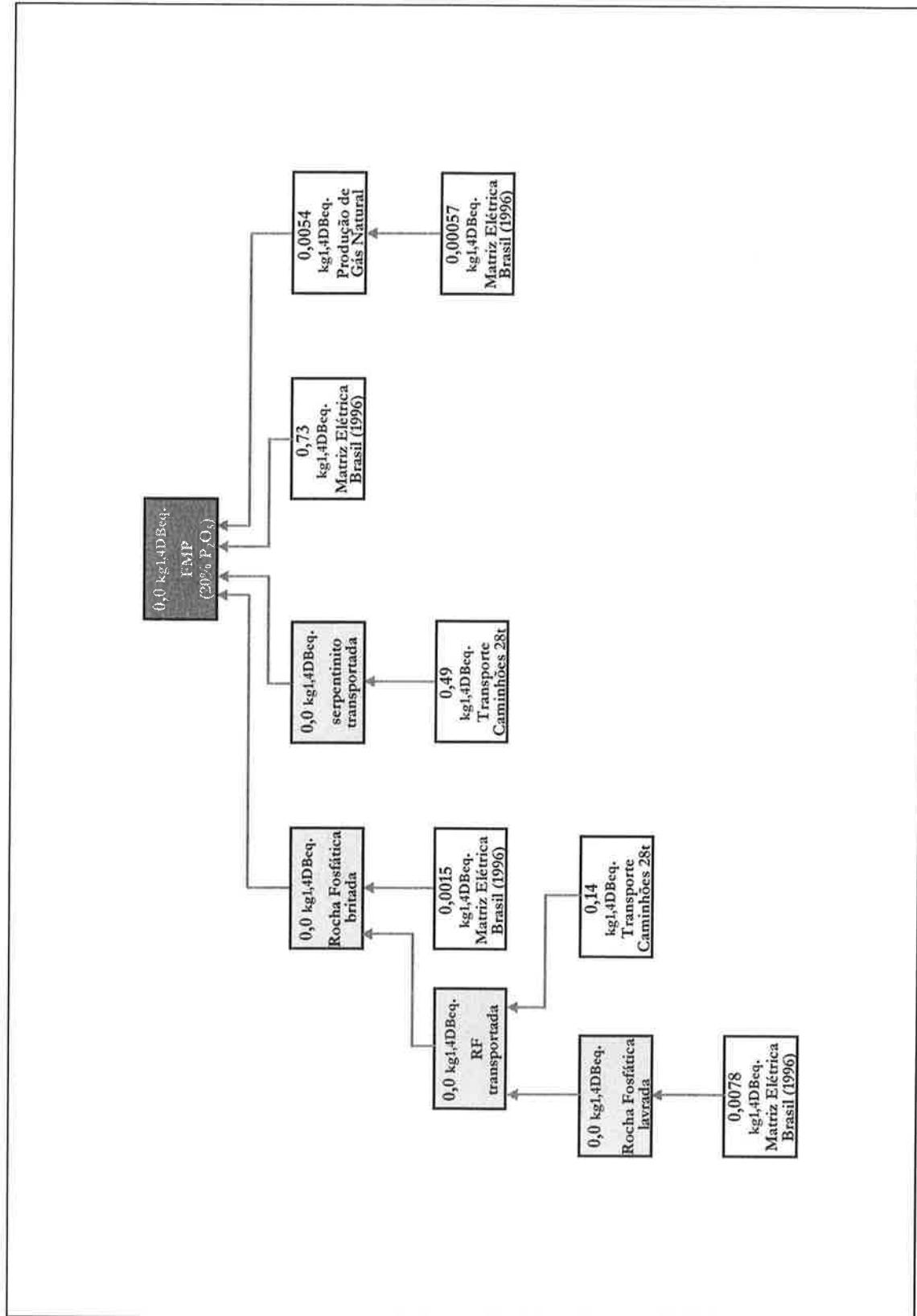


Figura VII.12. Perfil de distribuição do Potencial de Ecotoxicidade Aquática (P<sub>Ea</sub>) para o sistema de produto de FMP

Em princípio, a participação individual da manufatura do FMP em termos de PEA é de 0,73kg 1,4-DB. No entanto, a realização de um exame mais detalhado do diagrama que consta da Figura VII.12. faz perceber que esse impacto não ocorre de fato no referido subsistema, mas sim, por conta da geração de eletricidade que por ela será consumida.

Nesse contexto, as emissões atmosféricas e os efluentes líquidos que originam impactos em termos de ecotoxicidade aquática, geradas em decorrência da geração de energia elétrica são justificáveis pelas mesmas razões apontadas antes, para o caso do PTH.

#### **VII.2.5. Potencial de Acidificação (PAc)**

A contribuição do sistema de produto de FMP para o impacto ambiental de Acidificação foi, segundo a avaliação realizada pelo método *CML baseline 2000*, de 0,20kg SO<sub>2</sub> eq.. Tal como apresenta a Tabela VII.13, as emissões atmosféricas dos gases de NO<sub>2</sub> e de SO<sub>2</sub> foram decisivas para que esse resultado fosse alcançado; tanto isso é verdade, que se somadas, as contribuições atribuídas a tais substâncias montam o equivalente à quase totalidade do PAc gerado pelo sistema.

**Tabela VII.13. Contribuições individualizadas por subsistema do sistema de produto de FMP para o PAc**

<b>Sistema de Produto de FMP</b>			
<b>Potencial de Acidificação (PAc) - kg SO<sub>2</sub> eq.</b>			
<b>Substância</b>	<b>NO<sub>2</sub></b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>outros</b>
<b>meio receptor</b>	<b>ar</b>	<b>ar</b>	<b>-</b>
<b>Unidade de Processo</b>			
lavra da rocha fosfática	1,38E-04	0,0017	1,49E-07
transporte rocha fosfática	0,0018	0,014	1,15E-05
tratamento da rocha fosfática	2,58E-05	3,16E-04	2,78E-08
transporte de serpentinito	6,23E-04	0,0046	3,93E-05
manufatura de FMP	0,014	0,16	0,0000

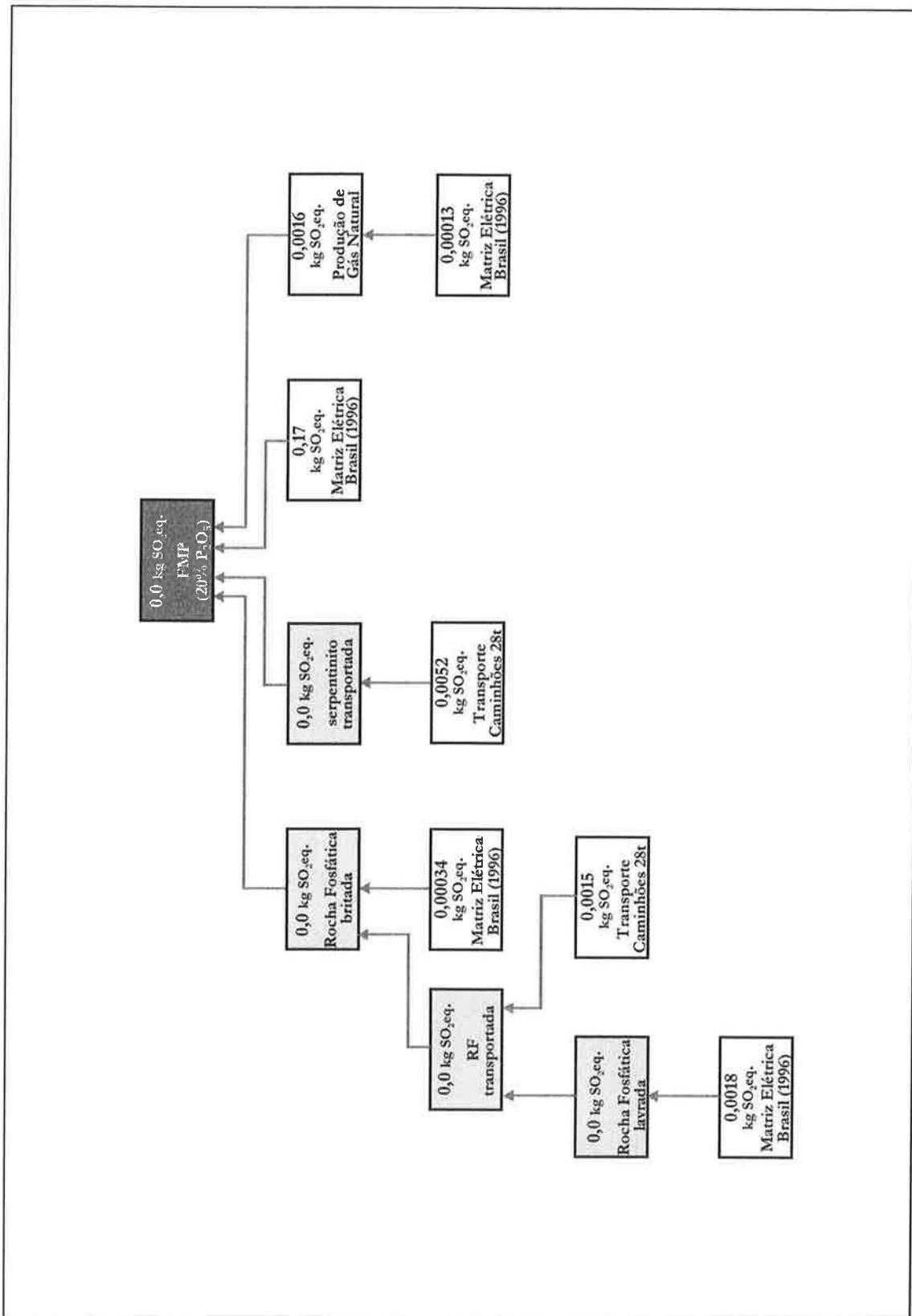


Figura VII.13. Perfil de distribuição do Potencial de Acidificação (PAC) para o sistema de produto de FMP

Tal como no caso anteriormente descrito, referente à categoria de impacto de ecotoxicidade aquática, as emissões gasosas dos óxidos de nitrogênio e enxofre são incorporadas ao sistema de produto por meio do consumo de energia elétrica.

Por conta da geração de energia de origem hidrelétrica, costumam ocorrer emissões gasosas de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> tanto por ocasião da instalação do empreendimento, quanto ao longo de sua operação. No primeiro caso, essas emissões relacionam-se à construção da barragem e à montagem de equipamentos empregados no processo, tais como turbinas, geradores, comportas e cabos.

Durante a operação da usina são comuns as liberações gasosas provenientes de processos microbiológicos que se desenvolvem no lago da barragem, motivados pelo clima tropical reinante em boa parte do território brasileiro.

O modelo que retrata a geração de energia baseia-se tão somente na queima de óleo combustível. Nesse contexto, serão focos principais de emissões gasosas de N<sub>2</sub>O e de SO<sub>2</sub>, as etapas de refino e de combustão desse insumo.

Um diagrama no qual consta a distribuição individualizada por subsistema das contribuições para o potencial de acidificação do sistema de produto encontra-se representado na Figura VII.13.

#### VII.2.6. Potencial de Eutrofização (PEu)

De acordo com a Tabela VI.3., o sistema de produto de FMP mostra uma contribuição de 0,12 kgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>eq. para efeito de PEu. Como mostram os dados apresentados pela Tabela VII.14, as maiores parcelas de contribuição para efeito em questão, ocorrem por conta da disposição no meio ambiente de compostos de fósforo, os quais, em termos quantitativos, respondem por aproximadamente 92% do total de contribuição para o impacto em questão.

Tal como indicado no esquema da Figura VII.14, como em tantas situações, a geração de energia elétrica pode ser responsabilizada pelos índices alcançados pelo sistema no que se refere ao potencial de eutrofização.

**Tabela VII.14. Contribuições individualizadas por subsistema do sistema de produto de FMP para o PEu**

<b>Sistema de Produto de FMP</b>					
<b>Potencial de Eutrofização (PEu) - kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq.</b>					
<b>Substância</b>	<b>NO<sub>2</sub></b>	<b>NOx</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	<b>outros</b>
<b>meio receptor</b>	<b>ar</b>	<b>ar</b>	<b>água</b>	<b>água</b>	<b>-</b>
<b>Unidade de Processo</b>					
lavra da rocha fosfática	3,59E-05	0	0	0	2,35E-07
transporte rocha fosfática	2,68E-06	1,62E-04	2,35E-05	1,30E-05	4,50E-06
tratamento da rocha fosfática	6,71E-06	0	0	0	4,40E-08
transporte de serpentinito	7,82E-06	4,72E-04	6,87E-05	3,79E-05	1,31E-05
manufatura de FMP	0,0070	0	0	0,11	4,46E-05

As perdas de compostos fosfatados no processo de geração de energia elétrica devem ser explicadas individualmente para cada forma de produção de eletricidade selecionada a fim de compor o modelo desse subsistema.

No que se refere às usinas hidrelétricas, a maior contribuição para efeito de potencial de eutrofização ocorre durante a operação do empreendimento, e vincula-se aos processos de degradação ocorridos no lago da barragem.

Já para o caso da produção de energia termelétrica por meio da queima de óleo combustível as principais contribuições ocorrem durante o refino do óleo. Nessa etapa, a guisa de serem eliminadas impurezas de processo introduzidas pelo petróleo são realizadas operações unitárias para a remoção não apenas de fosfatos, bem como nitratos e sulfatos.

A incidência desses compostos se deve, de maneira geral, às características geológicas dos campos de extração desse recurso natural, que como citado antes, encontram-se, ao menos no caso do Brasil, predominantemente em zonas costeiras.

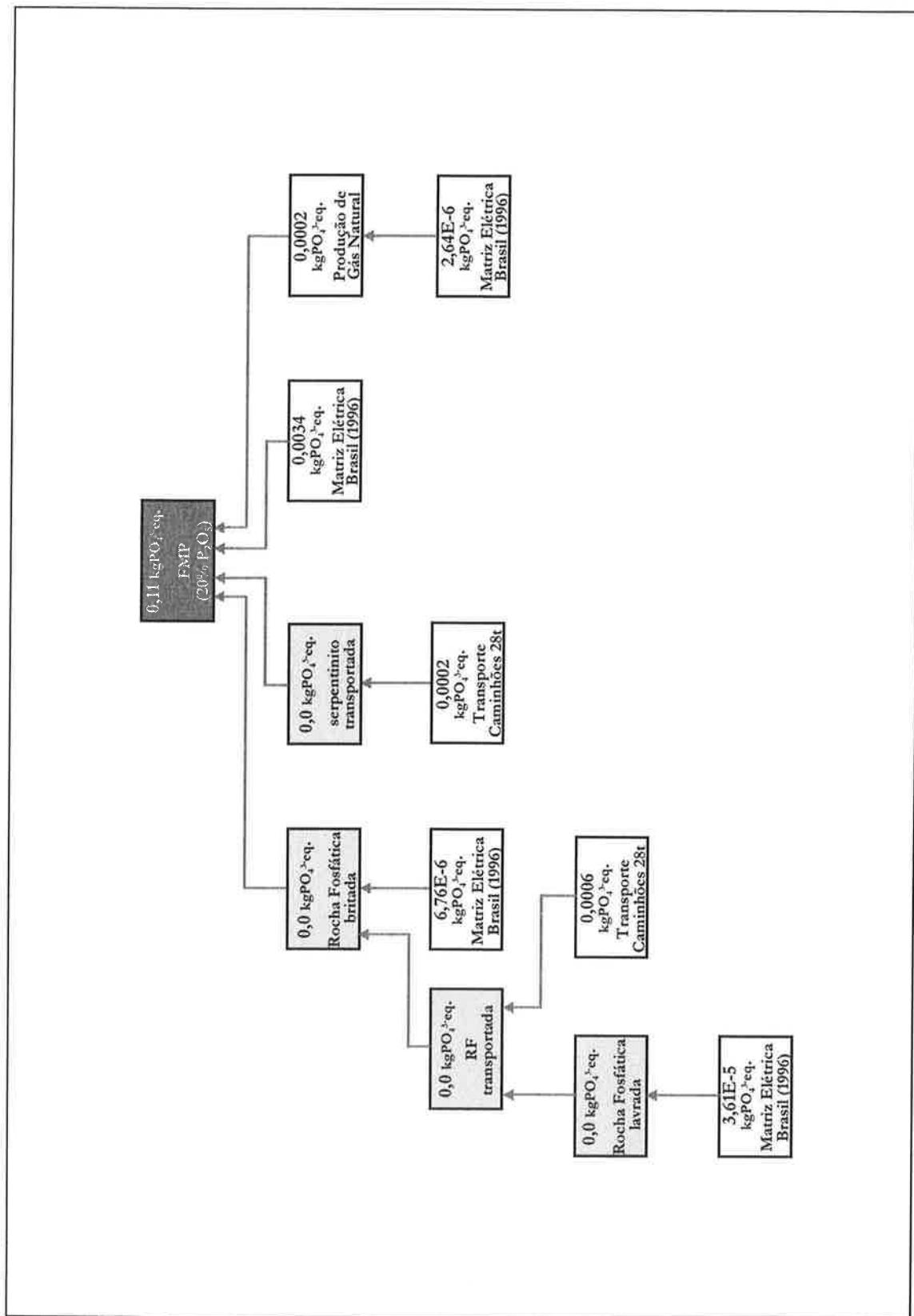


Figura VII.14. Perfil de distribuição do Potencial de Eutrofização(PEu) para o sistema de produto de FMP

## VIII. CONCLUSÕES

Baseando-se em diversas premissas e aproximações o presente trabalho de tese de doutorado apresentou a comparação do desempenho ambiental, por meio da metodologia de Análise de Ciclo de Vida, dos fertilizantes fosfatados Superfosfato Triplo (TSP) e Termofosfato Magnesiano Fundido (FMP).

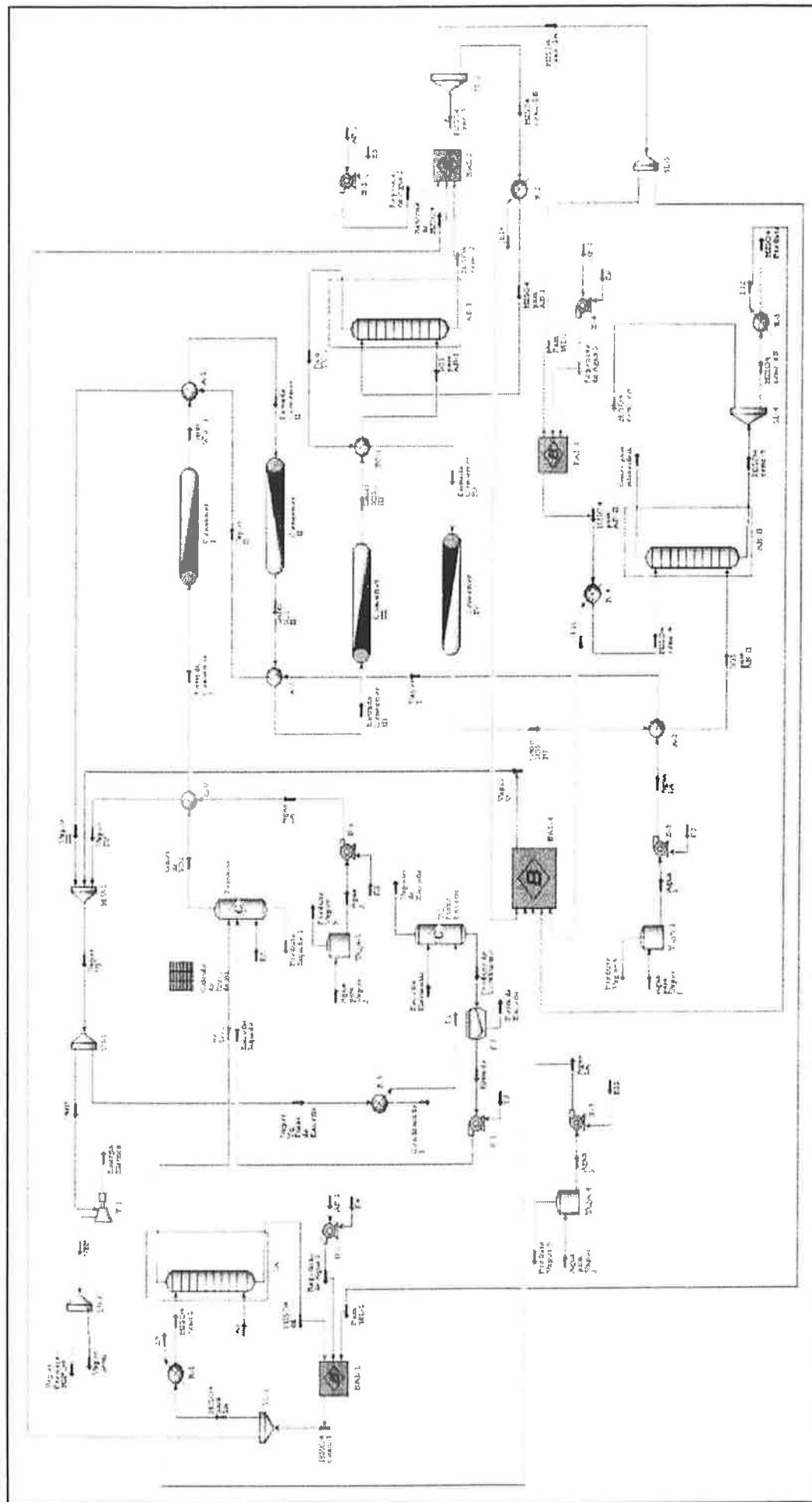
Por conta da referida análise, puderam ser percebidos os seguintes aspectos:

- o TSP apresentou um desempenho ambiental mais eficiente com relação às categorias de impacto de Aquecimento Global, Depleção de Camada de Ozônio, Toxicidade Humana e Ecotoxicidade Aquática. O FMP, por seu lado, revelou-se menos impactante ao meio ambiente quanto aos potencias de Acidificação e de Eutrofização.
- no caso do Aquecimento Global o desempenho ambiental do FMP supera o de seu homólogo em cerca de quatro vezes. Tal diferença se deve em sua maioria, às emissões de gases de CO<sub>2</sub> introduzidas no sistema pela energia elétrica a ser consumida para o processamento desse produto, a qual responde por uma contribuição superior a 125kg CO<sub>2</sub> eq. No caso do TSP, identificou-se como maiores contribuintes os processos de beneficiamento da rocha para as produções tanto de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> quanto do próprio TSP, cujas participações no impacto total para a referida categoria foi de 35,2kg CO<sub>2</sub> eq.
- Em termos de Depleção de Camada de Ozônio, ambos os fertilizantes apresentaram desempenhos bastante discretos, da ordem de miligramas de CFC11 eq. A carga maior de impacto do TSP para essa categoria pode ser imputada às atividades de transporte de insumos, particularmente no que se refere às emissões atmosféricas de HALON 1301. As perdas gasosas desse composto organohalogenado foram também as principais responsáveis pelo desempenho do FMP para esse efeito ambiental. Nesse caso, no entanto, as gerações de HALON 1301 encontram-se associadas à geração de energia elétrica.

- No que se refere à Toxicidade Humana, o impacto ambiental causado pelo TSP corresponde à metade daquele provocado pelo TSP. Segundo a análise realizada, o sistema de produto de TSP apresentou uma contribuição em termos de PTH da ordem de 5,5kg 1,4-DB. Mais de 88% desse total, pode ser atribuídos às emissões para o ar de compostos metálicos e aos despejos de hidrocabonetos poliaromáticos associados aos transportes de rocha fosfática e de concentrado, usados para as produções de  $H_3PO_4$  e de TSP. No caso do FMP, o módulo de geração de energia elétrica foi, sem dúvida, o subsistema a provocar maiores níveis de impacto em termos de Toxicidade Humana. Do total de 11,1kg 1,4-DB gerados pelo sistema, perto de 62,5% foram ocasionados pelo subsistema em questão, a custa de lançamentos para a atmosfera de metais pesados em função da queima de óleo combustível para geração de energia de origem termelétrica.
- a contribuição do TSP em termos de Ecotoxicidade Humana foi de 0,28kg 1,4-DB. Tal como no caso anterior da Toxicidade Humana, a maior carga de impactos do sistema – acima de 86% - está relacionada ao transporte de insumos. O perfil ambiental do FMP para essa categoria mostrou-se também bastante semelhante àquele identificado para o PTH. Cerca de 80% dos 0,93kg 1,4-DB gerados em termos de ecotoxicidade aquática provêm da geração de eletricidade.
- em termos de Acidificação, o FMP apresentou melhor desempenho ambiental. Dos 0,20kg  $SO_2$  eq gerados ao longo do processamento desse fertilizante, as perdas gasosas de  $SO_2$  e  $NO_2$  ocorridas no subsistema de geração de eletricidade contribuíram com 86,1%. Já para o caso do TSP, o desempenho – 40% superior ao de seu homólogo fosfatado – pode ser atribuído em sua maior parte, às emissões de  $SO_2$  geradas durante a produção de  $H_2SO_4$  pelo processo de dupla absorção.

- finalmente, sob o ponto de vista de Eutrofização, o sistema de produto de TSP mostrou-se mais agressivo ao meio ambiente, ao atingirem um valor de PEu de 0,87kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Essa marca fica por conta principalmente das perdas nas formas de efluentes líquidos e resíduos sólidos de compostos de fósforo ocorridas respectivamente durante as etapas de manufatura do produto em si e de produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. O caso do FMP, cujo desempenho montou pouco mais de 0,12kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, não foi diferente. Os processos microbiológicos que acontecem no lago das barragens para a geração de energia de origem hidrelétrica, assim como a remoção de fosfatos durante o refino do óleo combustível destinado à termoelectricidade foram as causas identificadas de geração de impacto nessa categoria.

## **ANEXOS**



Anexo A1. Esquema da modelagem do processo DA/DC para produção de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  realizado com o auxílio de Hysys®Plant

## Anexo A2: Planilha de Dados: simulação do processo de produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Conexão Excel	Conexão Hysys
<b>ENTRADA DO SISTEMA</b>	
<b>MATERIA</b>	
<b>Enxofre Elementar</b>	
Componentes	Fração massica
Enxofre Sólido	0,962
Impurezas	0,018
Umidade	0,020
Total	1,000
Fluxo (kg/h)	14,00
T (°C)	25,00
P (kg/cm <sup>2</sup> )	1,00
<b>Azoto para Produção de Vapor - 1</b>	
Dados de Processo	
Fluxo (kg/h)	22,00
T (°C)	20,00
P (kg/cm <sup>2</sup> )	20,00
<b>Azoto para Produção de Vapor - 2</b>	
Dados de Processo	
Fluxo (kg/h)	28,00
T (°C)	39,91
P (kg/cm <sup>2</sup> )	20,00
<b>Azoto para Produção de Vapor - 3</b>	
Dados de Processo	
Fluxo (kg/h)	3,07
T (°C)	20,03
P (kg/cm <sup>2</sup> )	20,00
<b>Consumo Total de Água para Geração de Vapor</b>	
kg/h	42,07
<b>Consumo Total de Água de Processo</b>	
kg/h	3,36
<b>CONSUMO DE ENERGIA</b>	
<b>Bomba de Enxofre Líquido</b>	
E2 (kW)	0,00
<b>Bomba de Água Processo - 1</b>	
E4 (kW)	0,00
<b>Bomba de Água Processo - 2</b>	
E5 (kW)	0,00
<b>Bomba de Água Processo - 3</b>	
E6 (kW)	0,00
<b>Bomba de Água Refrigeração - 1</b>	
E7 (kW)	0,01
<b>Bomba de Água Refrigeração - 2</b>	
E8 (kW)	0,02
<b>Bomba de Água Refrigeração - 3</b>	
E13 (kW)	0,00
<b>Consumo Total de Energia</b>	
KW	0,03
<b>SAÍDAS DO SISTEMA</b>	
<b>MATERIA</b>	
<b>Gases para Atmosfera</b>	
Componentes	Fração massica
N <sub>2</sub>	0,7920692
O <sub>2</sub>	0,1821852
H <sub>2</sub> O	0,0251065
SO <sub>2</sub>	0,0006233
SO <sub>3</sub>	0,0000135
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,0000000
Total	1,0000
Fluxo (kg/h)	174,90
T (°C)	77,37
P (kg/cm <sup>2</sup> )	1,00
<b>Ácido Sulfúrico</b>	
Componentes	Fração massica
H <sub>2</sub> O	0,02
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,98
Total	1,00
Fluxo (kg/h)	42,01
T (°C)	40,00
P (kg/cm <sup>2</sup> )	1,00
<b>HIRECIA PRODUZIDA</b>	
<b>Vapor de Álcool Fisiológico produzido</b>	
Dados de Processo	
Fluxo (kg/h)	52,07
T (°C)	812,32
P (kg/cm <sup>2</sup> )	15,03
<b>Vapor de Álcool Fisiológico - Consumo de 10 litros de gás</b>	
Dados de Processo	
Fluxo (kg/h)	7,14
T (°C)	812,32
P (kg/cm <sup>2</sup> )	15,03
<b>Vapor de Bens Pessoais</b>	
Dados de Processo	
Fluxo (kg/h)	44,93
T (°C)	426,10
P (kg/cm <sup>2</sup> )	0,51
Turbina T-1	
E (Métrica (MW))	10,60

## Anexo A3: Código de transferência de dados (OLE Microsoft® Visual Basic)

### Option Explicit

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Dim excBook As Workbook  
Dim hyApp As HYSYS.Application  
Dim hyCase As SimulationCase  
Dim hyFlowsheet As Flowsheet  
Dim hySubFlowsheet As Flowsheets  
Dim hyStreams As Streams  
Dim hyenergy As Streams  
Dim hyComponents As Object  
Dim hyVal As Double  
Dim hyTemp As Double  
Dim hyPress As Double  
Dim hyIndex As Long  
Dim hyCompFrac As Variant
```

### 'Setting the variables & objects

```
Set hyApp = GetObject("", "HYSYS.Application")  
Set hyCase = hyApp.ActiveDocument  
Set hyStreams = hyCase.Flowsheet.MaterialStreams  
Set hyenergy = hyCase.Flowsheet.EnergyStreams  
Set excBook = EsteLibro
```

### 'Reads the material flow data

```
hyVal = hyStreams.Item("Enxofre Elementar").MassFlow.GetValue("kg/h")  
excBook.ActiveSheet.Range("B14") = hyVal  
hyTemp = hyStreams.Item("Enxofre Elementar").Temperature.GetValue("C")  
excBook.ActiveSheet.Range("B15") = hyTemp  
hyPress = hyStreams.Item("Enxofre Elementar").Pressure.GetValue("kg/cm2")  
excBook.ActiveSheet.Range("B16") = hyPress
```

```
hyVal = hyStreams.Item("Ar").ActualVolumeFlow.GetValue("m3/h")  
excBook.ActiveSheet.Range("B26") = hyVal  
hyTemp = hyStreams.Item("Ar").Temperature.GetValue("C")  
excBook.ActiveSheet.Range("B27") = hyTemp  
hyPress = hyStreams.Item("Ar").Pressure.GetValue("kg/cm2")  
excBook.ActiveSheet.Range("B28") = hyPress
```

```
hyVal = hyStreams.Item("Água 1A").MassFlow.GetValue("kg/h")  
excBook.ActiveSheet.Range("E10") = hyVal  
hyTemp = hyStreams.Item("Água 1A").Temperature.GetValue("C")  
excBook.ActiveSheet.Range("E11") = hyTemp  
hyPress = hyStreams.Item("Água 1A").Pressure.GetValue("kg/cm2")  
excBook.ActiveSheet.Range("E12") = hyPress
```

```
hyVal = hyStreams.Item("Água 2A").MassFlow.GetValue("kg/h")  
excBook.ActiveSheet.Range("E16") = hyVal  
hyTemp = hyStreams.Item("Água 2A").Temperature.GetValue("C")
```

```

excBook.ActiveSheet.Range("E17") = hyTemp
hyPress = hyStreams.Item("Água 2A").Pressure.GetValue("kg/cm2")
excBook.ActiveSheet.Range("E18") = hyPress

hyVal = hyStreams.Item("Água 3A").MassFlow.GetValue("kg/h")
excBook.ActiveSheet.Range("E22") = hyVal
hyTemp = hyStreams.Item("Água 3A").Temperature.GetValue("C")
excBook.ActiveSheet.Range("E23") = hyTemp
hyPress = hyStreams.Item("Água 3A").Pressure.GetValue("kg/cm2")
excBook.ActiveSheet.Range("E24") = hyPress

hyVal = hyStreams.Item("Reposição de Água 1").MassFlow.GetValue("kg/h")
excBook.ActiveSheet.Range("H10") = hyVal
hyTemp = hyStreams.Item("Reposição de Água 1").Temperature.GetValue("C")
excBook.ActiveSheet.Range("H11") = hyTemp
hyPress = hyStreams.Item("Reposição de Água 1").Pressure.GetValue("kg/cm2")
excBook.ActiveSheet.Range("H12") = hyPress

hyVal = hyStreams.Item("Reposição de Água 2").MassFlow.GetValue("kg/h")
excBook.ActiveSheet.Range("H18") = hyVal
hyTemp = hyStreams.Item("Reposição de Água 2").Temperature.GetValue("C")
excBook.ActiveSheet.Range("H19") = hyTemp
hyPress = hyStreams.Item("Reposição de Água 2").Pressure.GetValue("kg/cm2")
excBook.ActiveSheet.Range("H20") = hyPress

hyVal = hyStreams.Item("Reposição de Água 3").MassFlow.GetValue("kg/h")
excBook.ActiveSheet.Range("H26") = hyVal
hyTemp = hyStreams.Item("Reposição de Água 3").Temperature.GetValue("C")
excBook.ActiveSheet.Range("H27") = hyTemp
hyPress = hyStreams.Item("Reposição de Água 3").Pressure.GetValue("kg/cm2")
excBook.ActiveSheet.Range("H28") = hyPress

hyVal = hyStreams.Item("Gases para Atmosfera").MassFlow.GetValue("kg/h")
excBook.ActiveSheet.Range("B55") = hyVal
hyTemp = hyStreams.Item("Gases para Atmosfera").Temperature.GetValue("C")
excBook.ActiveSheet.Range("B56") = hyTemp
hyPress = hyStreams.Item("Gases para Atmosfera").Pressure.GetValue("kg/cm2")
excBook.ActiveSheet.Range("B57") = hyPress

hyVal = hyStreams.Item("Borra de Enxofre").MassFlow.GetValue("kg/h")
excBook.ActiveSheet.Range("E52") = hyVal
hyTemp = hyStreams.Item("Borra de Enxofre").Temperature.GetValue("C")
excBook.ActiveSheet.Range("E53") = hyTemp
hyPress = hyStreams.Item("Borra de Enxofre").Pressure.GetValue("kg/cm2")
excBook.ActiveSheet.Range("E54") = hyPress
hyVal = hyStreams.Item("H2SO4 Produto").MassFlow.GetValue("kg/h")
excBook.ActiveSheet.Range("H51") = hyVal
hyTemp = hyStreams.Item("H2SO4 Produto").Temperature.GetValue("C")
excBook.ActiveSheet.Range("H52") = hyTemp
hyPress = hyStreams.Item("H2SO4 Produto").Pressure.GetValue("kg/cm2")

```

```

excBook.ActiveSheet.Range("H53") = hyPress

hyVal = hyStreams.Item("Vapor VI").MassFlow.GetValue("kg/h")
excBook.ActiveSheet.Range("B63") = hyVal
hyTemp = hyStreams.Item("Vapor VI").Temperature.GetValue("C")
excBook.ActiveSheet.Range("B64") = hyTemp
hyPress = hyStreams.Item("Vapor VI").Pressure.GetValue("kg/cm2")
excBook.ActiveSheet.Range("B65") = hyPress

hyVal = hyStreams.Item("VBP").MassFlow.GetValue("kg/h")
excBook.ActiveSheet.Range("H63") = hyVal
hyTemp = hyStreams.Item("VBP").Temperature.GetValue("C")
excBook.ActiveSheet.Range("H64") = hyTemp
hyPress = hyStreams.Item("VBP").Pressure.GetValue("kg/cm2")
excBook.ActiveSheet.Range("H65") = hyPress

hyVal = hyStreams.Item("Vapor Tq. Fusao de Enxofre").MassFlow.GetValue("kg/h")
excBook.ActiveSheet.Range("E63") = hyVal
hyTemp = hyStreams.Item("Vapor Tq. Fusao de Enxofre").Temperature.GetValue("C")
excBook.ActiveSheet.Range("E64") = hyTemp
hyPress = hyStreams.Item("Vapor Tq. Fusao de Enxofre").Pressure.GetValue("kg/cm2")
excBook.ActiveSheet.Range("E65") = hyPress

hyVal = hyenergy.Item("E2").HeatFlow.GetValue("kW")
excBook.ActiveSheet.Range("E33") = hyVal

hyVal = hyenergy.Item("E4").HeatFlow.GetValue("kW")
excBook.ActiveSheet.Range("B36") = hyVal

hyVal = hyenergy.Item("E5").HeatFlow.GetValue("kW")
excBook.ActiveSheet.Range("E36") = hyVal

hyVal = hyenergy.Item("E6").HeatFlow.GetValue("kW")
excBook.ActiveSheet.Range("H36") = hyVal

hyVal = hyenergy.Item("E7").HeatFlow.GetValue("kW")
excBook.ActiveSheet.Range("B39") = hyVal

hyVal = hyenergy.Item("E8").HeatFlow.GetValue("kW")
excBook.ActiveSheet.Range("E39") = hyVal

hyVal = hyenergy.Item("E13").HeatFlow.GetValue("kW")
excBook.ActiveSheet.Range("H39") = hyVal

hyVal = hyenergy.Item("Energia Eletrica").HeatFlow.GetValue("kW")
excBook.ActiveSheet.Range("E69") = hyVal

'The following part reads the mass fraction datas from HYSYS and update excel sheets
'This should be another function and you just call it here!!!

Dim hyStream As Object

```

```

Dim J As Integer
Dim Sum As Double

'Enxofre Elementar Mass Fractions
Dim hyVal2 As Double
Dim hyVal3 As Double

Set hyFlowsheet = hyCase.Flowsheet
Set hyStream = hyFlowsheet.MaterialStreams.Item("Enxofre Elementar")
Set hyComponents = hyCase.BasisManager.FluidPackages.Item(0).Components

hyIndex = hyComponents.Index(0)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
hyVal = hyCompFrac(hyIndex)
excBook.ActiveSheet.Range("B10") = hyVal

hyIndex = hyComponents.Index(2)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
hyVal2 = hyCompFrac(hyIndex)
excBook.ActiveSheet.Range("B11") = hyVal2

hyIndex = hyComponents.Index(5)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
hyVal3 = hyCompFrac(hyIndex)
excBook.ActiveSheet.Range("B12") = hyVal3

Sum = hyVal + hyVal2 + hyVal3

excBook.ActiveSheet.Range("B13") = Sum

'Atmospheric Air Mass Fractions
Dim hyVal4 As Double
Dim hyVal5 As Double
Dim hyVal6 As Double

Set hyFlowsheet = hyCase.Flowsheet
Set hyStream = hyFlowsheet.MaterialStreams.Item("Ar")
Set hyComponents = hyCase.BasisManager.FluidPackages.Item(0).Components

hyIndex = hyComponents.Index(3)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
hyVal4 = hyCompFrac(hyIndex)
excBook.ActiveSheet.Range("B22") = hyVal4

hyIndex = hyComponents.Index(4)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
hyVal5 = hyCompFrac(hyIndex)
excBook.ActiveSheet.Range("B23") = hyVal5

hyIndex = hyComponents.Index(5)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue

```

```

hyVal6 = hyCompFrac(hyIndex)
excBook.ActiveSheet.Range("B24") = hyVal6

Sum = hyVal4 + hyVal5 + hyVal6

excBook.ActiveSheet.Range("B25") = Sum

'Gas para Atmosfera Mass fractions
Set hyFlowsheet = hyCase.Flowsheet
Set hyStream = hyFlowsheet.MaterialStreams.Item("Gases para Atmosfera")
Set hyComponents = hyCase.BasisManager.FluidPackages.Item(0).Components

J = 3
Sum = 0
While J < 9

    hyIndex = hyComponents.Index(J)
    hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
    hyVal = hyCompFrac(hyIndex)
    Sum = Sum + hyVal
    excBook.ActiveSheet.Range("B" & J + 45) = hyVal

    J = J + 1

Wend

excBook.ActiveSheet.Range("B54") = Sum

'Borra de Enxofre Mass Fractions
Dim hyVal7 As Double
Dim hyVal8 As Double
Dim hyVal9 As Double

Set hyFlowsheet = hyCase.Flowsheet
Set hyStream = hyFlowsheet.MaterialStreams.Item("Borra de Enxofre")
Set hyComponents = hyCase.BasisManager.FluidPackages.Item(0).Components

hyIndex = hyComponents.Index(1)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
hyVal7 = hyCompFrac(hyIndex)
excBook.ActiveSheet.Range("E48") = hyVal7
hyIndex = hyComponents.Index(2)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
hyVal8 = hyCompFrac(hyIndex)
excBook.ActiveSheet.Range("E49") = hyVal8

hyIndex = hyComponents.Index(5)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
hyVal9 = hyCompFrac(hyIndex)
excBook.ActiveSheet.Range("E50") = hyVal9

```

```

Sum = hyVal7 + hyVal8 + hyVal9

excBook.ActiveSheet.Range("E51") = Sum

'Sulfuric Acid Mass Fractions
Dim hyVal10 As Double
Dim hyVal11 As Double

Set hyFlowsheet = hyCase.Flowsheet
Set hyStream = hyFlowsheet.MaterialStreams.Item("H2SO4 Produto")
Set hyComponents = hyCase.BasisManager.FluidPackages.Item(0).Components

hyIndex = hyComponents.Index(5)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
hyVal10 = hyCompFrac(hyIndex)
excBook.ActiveSheet.Range("H48") = hyVal10

hyIndex = hyComponents.Index(8)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
hyVal11 = hyCompFrac(hyIndex)
excBook.ActiveSheet.Range("H49") = hyVal11

Sum = hyVal10 + hyVal11
excBook.ActiveSheet.Range("H50") = Sum

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

Dim excBook As Workbook
Dim hyApp As HYSYS.Application
Dim hyCase As SimulationCase
Dim hyFlowsheet As Flowsheet
Dim hyStream As ProcessStream
Dim hyStreams As Streams
Dim hyStreamsEnergy As Streams
Dim xlRange As Excel.Range
Dim xlSheet As Excel.Worksheet
Dim hyVal As Double
Set hyApp = GetObject("", "HYSYS.Application")
Set hyCase = hyApp.ActiveDocument
Set hyStreams = hyCase.Flowsheet.MaterialStreams
Set hyStream = hyStreams.Item("Enxofre Elementar")
Set excBook = EsteLibro
Set xlSheet = EsteLibro.Sheets("Main")
Set xlRange = xlSheet.Range("B14")

'Enxofre Elementar
Set xlRange = xlSheet.Range("B14") 'Flujo
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("B14").Value
hyStreams.Item("Enxofre Elementar").MassFlow.SetValue CDbI(xlRange.Value), "kg/h"

```

```
Set xlRange = xlSheet.Range("B15") ' Temperature
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("B15").Value
hyStreams.Item("Enxofre Elementar").Temperature.SetValue CDbl(xlRange.Value), "C"
Set xlRange = xlSheet.Range("B16") ' Pressure
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("B16").Value
hyStreams.Item("Enxofre Elementar").Pressure.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/cm2"
```

#### 'Ar

```
Set xlRange = xlSheet.Range("B27") ' Temperature
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("B27").Value
hyStreams.Item("Ar").Temperature.SetValue CDbl(xlRange.Value), "C"
Set xlRange = xlSheet.Range("B28") ' Pressure
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("B28").Value
hyStreams.Item("Ar").Pressure.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/cm2"
```

#### 'Água para Produção de Vapor - 1

```
Set xlRange = xlSheet.Range("E10") 'Fluxo
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("E10").Value
hyStreams.Item("Água 1A").MassFlow.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/h"
Set xlRange = xlSheet.Range("E11") ' Temperature
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("E11").Value
hyStreams.Item("Água 1A").Temperature.SetValue CDbl(xlRange.Value), "C"
Set xlRange = xlSheet.Range("E12") ' Pressure
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("E12").Value
hyStreams.Item("Água 1A").Pressure.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/cm2"
```

#### 'Água para Produção de Vapor - 2

```
Set xlRange = xlSheet.Range("E16") 'Fluxo
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("E16").Value
hyStreams.Item("Água 2A").MassFlow.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/h"
Set xlRange = xlSheet.Range("E18") ' Pressure
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("E18").Value
hyStreams.Item("Água 2A").Pressure.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/cm2"
```

#### 'Água para Produção de Vapor - 3

```
Set xlRange = xlSheet.Range("E24") ' Pressure
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("E24").Value
hyStreams.Item("Água 3A").Pressure.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/cm2"
```

#### 'Água de Processo - 1

```
Set xlRange = xlSheet.Range("H10") 'Fluxo
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("H10").Value
hyStreams.Item("Reposição de Água 1").MassFlow.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/h"
Set xlRange = xlSheet.Range("H11") ' Temperature
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("H11").Value
hyStreams.Item("Reposição de Água 1").Temperature.SetValue CDbl(xlRange.Value), "C"
Set xlRange = xlSheet.Range("H12") ' Pressure
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("H12").Value
hyStreams.Item("Reposição de Água 1").Pressure.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/cm2"
```

**'Água de Processo - 2**

```
Set xlRange = xlSheet.Range("H18") ' Temperature
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("H18").Value
hyStreams.Item("Reposição de Água 2").Temperature.SetValue CDbl(xlRange.Value), "C"
Set xlRange = xlSheet.Range("H19") ' Pressure
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("H19").Value
hyStreams.Item("Reposição de Água 2").Pressure.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/cm2"
```

**'Água de Processo - 3**

```
Set xlRange = xlSheet.Range("H27") ' Temperature
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("H27").Value
hyStreams.Item("Reposição de Água 3").Temperature.SetValue CDbl(xlRange.Value), "C"
Set xlRange = xlSheet.Range("H28") ' Pressure
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("H28").Value
hyStreams.Item("Reposição de Água 3").Pressure.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/cm2"
```

**'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Produto**

```
Set xlRange = xlSheet.Range("H51") ' Flujo
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("H51").Value
hyStreams.Item("H2SO4 Produto").MassFlow.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/h"
Set xlRange = xlSheet.Range("H52") ' Temperature
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("H52").Value
hyStreams.Item("H2SO4 Produto").Temperature.SetValue CDbl(xlRange.Value), "C"
Set xlRange = xlSheet.Range("H53") ' Pressure
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("H53").Value
hyStreams.Item("H2SO4 Produto").Pressure.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/cm2"
```

**'Vapor de Baixa Pressão**

```
Set xlRange = xlSheet.Range("H65") ' Pressure
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("H65").Value
hyStreams.Item("VBP").Pressure.SetValue CDbl(xlRange.Value), "kg/cm2"
```

**The next part copies the mass fractions of streams to HYSYS**

```
Dim hyComponents As Object
Dim hyIndex As Long
Dim hyCompFrac As Variant
```

**'Enxofre Elementar Stream MassFraction Values****'Enxofre Sólido**

```
Set xlRange = xlSheet.Range("B10")
Set hyFlowsheet = hyCase.Flowsheet
Set hyStream = hyFlowsheet.MaterialStreams.Item("Enxofre Elementar")
Set hyComponents = hyCase.BasisManager.FluidPackages.Item(0).Components

hyIndex = hyComponents.Index(0)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("B10").Value
hyCompFrac(hyIndex) = CDbl(xlRange.Value)
hyStream.ComponentMassFractionValue = hyCompFrac
```

**'Impurezas**

```
Set xlRange = xlSheet.Range("B11")
hyIndex = hyComponents.Index(2)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("B11").Value
hyCompFrac(hyIndex) = CDbl(xlRange.Value)
hyStream.ComponentMassFractionValue = hyCompFrac
```

**'Umidade**

```
Set xlRange = xlSheet.Range("B12")
hyIndex = hyComponents.Index(5)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("B12").Value
hyCompFrac(hyIndex) = CDbl(xlRange.Value)
hyStream.ComponentMassFractionValue = hyCompFrac
```

**'Air Stream MassFraction Values****'N2**

```
Set xlRange = xlSheet.Range("B22")
Set hyFlowsheet = hyCase.Flowsheet
Set hyStream = hyFlowsheet.MaterialStreams.Item("Ar")
Set hyComponents = hyCase.BasisManager.FluidPackages.Item(0).Components

hyIndex = hyComponents.Index(3)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("B22").Value
hyCompFrac(hyIndex) = CDbl(xlRange.Value)
hyStream.ComponentMassFractionValue = hyCompFrac
```

**'O2**

```
Set xlRange = xlSheet.Range("B23")
hyIndex = hyComponents.Index(4)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("B23").Value
hyCompFrac(hyIndex) = CDbl(xlRange.Value)
hyStream.ComponentMassFractionValue = hyCompFrac
```

**'Umidade**

```
Set xlRange = xlSheet.Range("B24")
hyIndex = hyComponents.Index(5)
hyCompFrac = hyStream.ComponentMassFractionValue
xlRange = excBook.ActiveSheet.Range("B24").Value
hyCompFrac(hyIndex) = CDbl(xlRange.Value)
hyStream.ComponentMassFractionValue = hyCompFrac
```

**End Sub****Private Sub Worksheet\_SelectionChange(ByVal Target As Excel.Range)****End Sub**

**Anexo A4: Eco-vetor da unidade de processo de lavra da rocha fosfática para a produção de TSP**

<b>SUBSISTEMA - Lavra da Rocha Fosfática para Produção de TSP</b>		
Bases de Cálculo	Rocha Fosfática (britada) (kg)	Lavra da RF ( /FR sistema)
<b>ENTRADAS</b>		
Recurso Consumido	(/kg RF britada)	( /kg FR sistema)
Rocha Fosfática (como recurso natural) (kg)	1,18	230,27
Água (de processo) (kg)	0,14	28,03
<b>SAÍDAS</b>		
Produtos	(/kg RF britada)	( /kg FR sistema)
Rocha Fosfática britada (kg)	1,00	195,73
Emissões Atmosféricas	(/kg RF britada)	( /kg TSP)
Material Particulado (g)	0,18	34,53
<b>CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS</b>		
Aspecto Ambiental	(/kg RF britada)	( /kg FR sistema)
Eletricidade (Matriz Brasileira - 1996) (KJ) <sup>(a)</sup>	22,82	4465,54

(a): considerando que as operações de lavra, britagem primária e rebritagem consomem energia elétrica da concessionária

**Anexo A5: Eco-vetor da unidade de processo de lavra da rocha fosfática para a produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>**

<b>SUBSISTEMA - Lavra da Rocha Fosfática para Produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>		
Bases de Cálculo	Rocha Fosfática (britada) (kg)	Lavra da RF ( /RF sistema)
	<b>1,00</b>	<b>579,62</b>
<b>ENTRADAS</b>		
Recurso Consumido	(/kg RF britada)	( /kgRF sistema)
Rocha Fosfática (como recurso natural) (kg)	1,18	681,91
Água (de processo) (kg)	0,14	83,00
<b>SAÍDAS</b>		
Produtos	(/kg RF britada)	( /kgRF sistema)
Rocha Fosfática britada (kg)	<b>1,00</b>	<b>579,62</b>
Emissões Atmosféricas	(/kg RF britada)	( /kgRF sistema)
Material Particulado (g)	0,18	102,25
<b>CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS</b>		
Aspecto Ambiental	(/kg RF britada)	( /kgRF sistema)
Eletricidade (Matriz Brasileira - 1996) (KJ) <sup>(a)</sup>	<b>22,82</b>	<b>13224,20</b>

(a): considerando que as operações de lavra, britagem primária e rebritagem consomem energia elétrica da concessionária

**Anexo A6: Eco-vetor da unidade de processo de beneficiamento da rocha fosfática para a produção de TSP**

<b>SUBSISTEMA Beneficiamento da Rocha Fosfática para Produção de TSP</b>		
Bases de Cálculo	Concentrado Fosfático beneficiado (kg)	Beneficiamento (/ FR sistema)
<b>RECURSOS CONSUMIDOS</b>		<b>37,10</b>
Recurso Consumido	(/kg CF beneficiado)	(/FR sistema)
Rocha Fosfática britada (transportada) (kg)	5,28	195,74
Hidróxido de Sódio (NaOH) (g)	1,23	45,62
Agentes Coletores (g)	1,97	72,98
Agentes Depressores (g)	2,73	101,26
Água fresca (de processo) (kg)	9,00	333,92
<b>SALIDAS</b>		
Produtos	(/kg CF beneficiado)	(/FR sistema)
Concentrado Fosfático beneficiado (kg)	1,00	37,10
Resíduos Sólidos	(/kg CF beneficiado)	(/FR sistema)
Magnetita como resíduo sólido (kg)	0,79	29,36
Lama (kg)	0,83	30,92
Resíduo não-apatítico (kg)	2,65	98,35
<b>CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS</b>		
Aspecto Ambiental	(/kg CF beneficiado)	(/FR sistema)
Eletricidade (Matriz Brasileira - 1996) (KJ) <sup>(a)</sup>	179,52	6660,62
Gas Natural (KJ) <sup>(b), (c)</sup>	434,18	16109,25

(a): considerando que tanto a moagem da Rocha Fosfática como como as bombas de transferência de fluidos consomem energia elétrica da concessionária

(b): considerando PCS do Gás Natural (KJ/kg) = 434,18

(c): considerou-se para efeito de estimativa a situação mais desfavorável em termos de emissão de NOx

**Anexo A7: Eco-vetor da unidade de processo de beneficiamento da rocha fosfática para a produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>**

<b>SUBSISTEMA - Beneficiamento da Rocha Fosfática para Produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>		
Bases de Cálculo	Concentrado Fosfático beneficiado (kg)	Beneficiamento ( / UF sistema)
	1,00	<b>109,87</b>
<b>ENTRADAS</b>		
Recurso Consumido	(/kg CF beneficiado)	( / FR sistema)
Rocha Fosfática britada (transportada) (kg)	5,28	579,42
Hidróxido de Sódio (NaOH) (g)	1,23	135,09
Agentes Coletores (g)	1,97	216,12
Agentes Depressores (g)	2,73	300,18
Agua fresca (de processo) (kg)	9,00	988,87
<b>SAÍDAS</b>		
Produtos	(/kg CF beneficiado)	( / FR sistema)
Concentrado Fosfático beneficiado (kg)	1,00	<b>109,87</b>
Resíduos Sólidos	(/kg CF beneficiado)	( / FR sistema)
Magnetita como resíduo sólido (g)	0,79	86,94
Lama (g)	0,83	91,56
Resíduo não-apatítico (g)	2,65	291,25
<b>CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS</b>		
Aspecto Ambiental	(/kg CF beneficiado)	( / FR sistema)
Eletricidade (Matriz Brasileira - 1996) (kWh) <sup>(a)</sup>	179,52	19,24,67
Gas Natural (kWh) <sup>(b)</sup>	434,18	47,05,74

(a): considerando que tanto a moagem da Rocha Fosfática como como as bombas de transferência de fluidos consomem energia elétrica da concessionária

(b): considerando PCS do Gás Natural (kWh)/kg) = [REDACTED]

(c): a título de estimativa foi considerada a pior situação com relação a emissão de NO<sub>x</sub> [REDACTED]

**Anexo A8: Eco-vetor da unidade de processo de produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**

SUBSISTEMA - Produção de Ácido Sulfúrico	
Bases de Cálculo	Produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (solução) (kg)
	1,00
<b>ENTRADAS</b>	
Recurso Consumido	[/kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (solução)]
Enxofre Elementar (kg)	0,33
Ar Atmosférico (m <sup>3</sup> )	4,08
Água (de processo) (kg)	0,21
Água (para produção de vapor) (kg)	1,24
<b>SAÍDAS</b>	
Produtos	[/kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (solução)]
Ácido Sulfúrico (solução) (kg)	1,00
Eletricidade (KJ)	906,12
Vapor (superaquecido - 0,50 kgf/cm <sup>2</sup> ) (KJ)	3564,95
Emissões Atmosféricas	[/kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (solução)]
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> ) (g)	2,60
Névoa de SO <sub>3</sub> (g)	0,056
Resíduos Sólidos	[/kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (solução)]
Borra de enxofre (g)	7,59
Borra de catalisador (N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (g) <sup>(f)</sup>	58,11

(f): o valor apontado acima para a geração de "borra de catalisador" é proveniente da média dos dados das empresas SERRANA, ULTRAFERTIL e COPEBRAS.

**Anexo A8a:** Balanço energético do processo DA/DC de produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

SUBSISTEMA - Produção de Ácido Sulfúrico		
Bases de Cálculo	Produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (solução) (kg)	Produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (solução) (/FR sistema)
<b>CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS</b>		
Aspecto Ambiental	[/ kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (solução)]	(/FR sistema)
Eletricidade (KJ) <sup>(c)</sup>	2,49	225,32
Vapor (15,03 kgf/cm <sup>2</sup> - 810,91°C) (KJ) <sup>(b)</sup>	710,49	64210,42
<b>ENERGIA GERADA PELO SISTEMA</b>		
Aspecto Ambiental	[/kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (solução)]	(/FR sistema)
Eletricidade (KJ)	908,62	82116,60
Vapor (15,03 kgf/cm <sup>2</sup> - 810,91°C) (KJ) <sup>(a)</sup>	5182,70	468388,91
<b>TOTAL DE ENERGIA RECUPERADA PELO SISTEMA</b>		
Aspecto Ambiental	[/ kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (solução)]	(/FR sistema)
Eletricidade (KJ)	906,12	81891,28
Vapor (0,50 kgf/cm <sup>2</sup> - 426,1°C) (KJ) <sup>(d)</sup>	3564,95	322183,99
		4182,06

(b): Entalpia do vapor de média pressão a 15,03kgf/cm<sup>2</sup> e 810,91°C (KJ/kg vapor)

(c): De acordo com IPT (1985) o consumo médio de eletricidade das plantas brasileiras de produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> é de 0,314 GJ/t. produto considerando consumo combustível para parada/partida da instalação e energia elétrica para acionamento. O valor obtido considera apenas o consumo de eletricidade da planta em condição regular de operação.

(d): De acordo com IPT (1985) a taxa média de recuperação de energia das plantas brasileiras de produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, realizada sob forma de vapor superaquecido na maioria dos casos, é de 2,906GJ/t. produto. O valor líquido obtido pela simulação é de 3,581 GJ/t. produto, já descontado o consumo de vapor para fusão do enxofre elemental.

## Anexo A9: Eco-vetor da unidade de processo de produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

SUBSISTEMA - Produção de Ácido Fosfórico (52% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )		
Bases de Cálculo	Produção de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/h)	( / FR sistema)
	1,00	<b>62,31</b>
ENTRADAS MATERIAIS		
Recurso Consumido	( / kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	( / FR sistema)
Concentrado Fosfático (kg)	1,70	<b>106,03</b>
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (solução) (kg)	1,45	<b>90,38</b>
Água de processo (kg)	2,76	<b>172,20</b>
Água sistemas de controle de emissão atmosférica (kg)	6,24	<b>388,83</b>
SAÍDAS MATERIAIS		
Produtos	( / kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	( / FR sistema)
Ácido Hexafluorsilíssico (H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> ) (solução) (kg)	0,12	<b>7,71</b>
Ácido Fosfórico (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) (solução) (kg)	1,00	<b>62,31</b>
Emissões Atmosféricas	( / kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	( / FR sistema)
Dioxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) (g)	19,23	<b>1198,13</b>
Material particulado (g)	0,022	<b>1,34</b>
Fluoretos (F) (g)	0,25	<b>15,80</b>
Efluentes Líquidos (pós-tratamento)	( / kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	( / FR sistema)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (g)	0,000057	<b>0,0035</b>
Ca <sup>2+</sup> (g)	0,059	<b>3,67</b>
Al <sup>3+</sup> (g)	0,0016	<b>0,097</b>
Fe <sup>3+</sup> (g)	0,0017	<b>0,104</b>
Mg <sup>2+</sup> (g)	0,0025	<b>0,154</b>
H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> (expressos como F) (g)	0,00042	<b>0,026</b>
BOD (g)	0,37	<b>23,21</b>
COD (g)	0,0030	<b>0,19</b>
Resíduos Sólidos	( / kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	( / FR sistema)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (expresso como PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) (g)	12,75	<b>794,47</b>
CaSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O (g)	2509,65	<b>156382,04</b>
SiO <sub>2</sub> (g)	25,52	<b>1590,43</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)	2,38	<b>148,44</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)	1,19	<b>74,22</b>
MgO (g)	0,00	<b>0,00</b>
F (g)	24,50	<b>1526,82</b>
CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS		
Aspecto Ambiental	( / kg H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	( / FR sistema)
Eletricidade (planta de produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - solução a 98%)	357,07	<b>22249,67</b>
Vapor (planta de produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - solução a 98%) (KJ)	2786,91	<b>173659,01</b>

**Anexo A9a:** Fatores de alocação entre os produtos do processo de produção de  $\text{H}_3\text{PO}_4$

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE ALOCAÇÃO			
Critério de Alocação:	Produto	Coefficiente	Quantidade (kg/h)
Ácido Fosfórico (52% $\text{P}_2\text{O}_5$ )	$M_1$	0,31	0,890
Ácido Hexafluorilúcido (solução)	$(1 - M_1)$	7,71	0,110

Anexo A10: Eco-vetor da unidade de processo de produção de TSP

SUBSISTEMA - Produção de Superfosfato Triplo (45% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )		Produção de TSP ( / UI sistema)	
Bases de Cálculo	Produção de TSP (kg)	Produção de TSP ( / UI sistema)	Produção de TSP ( / UI sistema)
	<b>1,00</b>	<b>92,59</b>	<b>92,59</b>
<b>ENTRADAS</b>			
Recurso Consumido	( / kg TSP )	( / UI sistema )	( / UI sistema )
Concentrado Fosfático (kg)	0,39	35,80	35,80
Ácido Fosfórico (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ) (kg)	0,67	62,31	62,31
Água (lavador de gases) (kg)	0,025	2,41	2,41
<b>SAÍDAS</b>			
Produtos	( / kg TSP )	( / UI sistema )	( / UI sistema )
TSP (46% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (kg)	1,00	92,59	92,59
H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> (solução) (kg)	0,016	1,7	1,7
Emissões Atmosféricas			
Dioxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) (g)	4,37	40,58	40,58
Material particulado (g)	0,12	1,09	1,09
Fluoratos (F) (g)	0,0051	0,47	0,47
Efluentes Líquidos	( / kg TSP )	( / UI sistema )	( / UI sistema )
Perdas de fosforo (expressas com PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) (g)	1,90	176,96	176,96
<b>CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS</b>			
Aspecto Ambiental	( / kg TSP )	( / UI sistema )	( / UI sistema )
Eletricidade (planta de produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> - solução a 98%) (KJ)	52988,11	52988,11	52988,11

Anexo A10a: Fatores de alocação entre os produtos do processo de produção de TSP

Critério de Alocação:		Massa		
Produto	Coeficiente	Quantidade Produzida (kg/ kgTSP)	Fator de Alocação	
TSP (45% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (kg)	M <sub>2</sub>	92,59	0,984	
H <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> (solução) (kg)	(1 - M <sub>2</sub> )	1,47	0,016	

**Anexo A11: Eco-vetor da unidade de processo de lavra da rocha fosfática para a produção de FMP**

<b>SUBSISTEMA - Lavra da Rocha Fosfática para Produção de FMP</b>		
Bases de Cálculo	Rocha fosfática (lavrada) (kg)	Lavraria da RI <sup>a</sup> (/RI sistema)
	1,00	158,61
	<b>ENTRADAS</b>	
Recurso Consumido	(/kg RI <sup>a</sup> lavrada)	(/RI sistema)
Rocha fosfática (como recurso natural) (kg)	1,05	166,96
Água (de processo) (kg)	0,14	22,71
	<b>SAÍDAS</b>	
Produtos	(/kg RI <sup>a</sup> lavrada)	(/RI sistema)
Rocha fosfática lavrada (kg)	1,00	158,61
Emissões Atmosféricas	(/kg RI <sup>a</sup> lavrada)	(/RI sistema)
Material Particulado (g)	0,053	8,35
	<b>CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS</b>	
Aspecto Ambiental	(/kg RI <sup>a</sup> lavrada)	(/RI sistema)
Eletricidade (Matriz Brasileira - 1996) (KJ) <sup>(a)</sup>	63,19	10022,47

(a): considerando que as operações de lavra, britagem primária e rebitagem consomem energia elétrica da concessionária

**Anexo A12: Eco-vetor da unidade de processo de britagem da rocha fosfática para a produção de FMP**

<b>SUBSISTEMA : Britagem da Rocha Fosfática para aterro de granulometria (a)</b>		
Bases de Cálculo	Rocha l'osfática britada (kg)	Britagem ( / fR sistema)
	1,00	153,89
<b>ENTRADAS</b>		
Recurso Consumido	(/kg RI britada)	( / fR sistema)
Rocha l'osfática transportada (kg)	1,01	155,44
<b>SAÍDAS</b>		
Produtos	(/kg RI britada)	( / fR sistema)
Rocha l'osfática Britada (kg)	1,00	153,89
Lissoes Atmosféricas	(/kg RI britada)	( / fR sistema)
Material Particulado (g)	0,010	1,5
<b>CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS</b>		
Aspecto Ambiental	(/kg RI britada)	( / fR sistema)
Eleticidade (Matriz Brasileira - 1996) (KJ) <sup>(a)</sup>	12,18	1874,5

(a): considerando que a operação de britagem da Rocha fosfática ocorre à seco;

(b): considerando que tanto a britagem da Rocha l'osfática como o funcionamento dos sistemas de transferência de material sólido consomem energia da concessionária

**Anexo A13: Eco-vetor da unidade de processo de manufatura de FMP**

<b>SUBSISTEMA - Produção de Ternofosfato Magnesiano Fundido (20% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)</b>		
Bases de Cálculo	Produção de FMP (kg)	Produção de FMP ( / UF sistema)
	1,00	<b>208,33</b>
<b>ENTRADAS</b>		
Recurso Consumido	( / kg FMP)	( / UF sistema)
Rocha fosfática britada (kg)	0,74	<b>153,89</b>
Serpentinito (kg)	0,49	<b>102,59</b>
Água (quenching) (kg)	20,00	<b>4166,67</b>
<b>SAÍDAS</b>		
Produtos	( / kg FMP)	( / UF sistema)
FMP (20% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (kg)	1,00	<b>208,33</b>
Emissões Atmosféricas	( / kg FMP)	( / UF sistema)
Dioxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) (g)	18,39	<b>3831,81</b>
Fluoretos (F) (g)	5,14	<b>1071,06</b>
Effluentes Líquidos	( / kg FMP)	( / UF sistema)
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (medido como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (g)	0,55	<b>114,15</b>
Al <sup>3+</sup> (g)	0,18	<b>37,58</b>
Fe <sup>3+</sup> (g)	0,42	<b>87,11</b>
I <sup>-</sup> (g)	0,48	<b>99,97</b>
<b>CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS</b>		
Aspecto Ambiental	( / kg FMP)	( / UF sistema)
Eletricidade (Matriz Brasileira - 1996) (kJ)	4500,00	<b>937500,00</b>
Gás Natural (kJ) <sup>(a)</sup>	234,48	<b>48849,72</b>
(a): considerando PCS do Gás Natural (kJ/kg)	49090,00	

Anexo A14: Eco-vetor da unidade de processo de produção de gás natural para a produção de TSP

SUBSISTEMA - Produção de Gás Natural	
Bases de Cálculo	Produção de Gás Natural (kJ/UF sistema)
<b>ENTRADAS</b>	
Recurso Consumido	(/ UF sistema)
sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ , recurso natural) (kg)	0,0022
bauxita ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , recurso natural) (kg)	0,0000083
bentonite ( $\text{Al}_2\text{O}_4\text{SiO}_2\text{H}_2\text{O}$ , recurso natural) (kg)	0,00025
cromo (Cr, recurso natural) (kg)	0,0000050
argila (recurso natural) (kg)	0,00048
carvão (recurso natural) (kg)	0,0000025
cobre (Cu, recurso natural) (kg)	0,0076
ferro (Fe, recurso natural) (kg)	0,00000979
chumbo (Pb, recurso natural) (kg)	0,0031
carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ , recurso natural) (kg)	0,00000029
manganês (Mn, recurso natural) (kg)	1,60
gás natural (recurso natural) (kg)	0,00000057
níquel (Ni, recurso natural) (kg)	0,0046
petróleo (recurso natural) (kg)	0,000077
areia (recurso natural) (kg)	0,000000013
prata (Ag, recurso natural) (kg)	0,000018
cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ , recurso natural) (kg)	0,000000019
zinc (Zn, recurso natural) (kg)	0,96
Metricidade (MJ)	0,59
água (consumo total) (kg)	0,000091
madera (kg)	
<b>SADAS</b>	
Produtos	(/ UF sistema)
Gás Natural (kJ)	63815,99
Emissões Atmosféricas	(/ UF sistema)
acetaldeídeos ( $\text{CH}_3\text{CHO}$ ) (g)	0,000068
ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) (g)	0,0096
acetona ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) (g)	0,000014
aldeídeos (não especificado) (g)	0,000034
alcanos (não especificado) (g)	0,18
alcenos (não especificado) (g)	0,000040
alcinos (não especificado) (g)	0,000042
alumínio (g)	0,00018
amônia ( $\text{NH}_3$ ) (g)	0,000069

arsénico (As) (g)	0,000002
bário (Ba) (g)	0,0000025
benzaldeído ( $C_6H_5CHO$ ) (g)	0,0000000077
benzeno ( $C_6H_6$ ) (g)	0,026
benzopireno ( $C_{12}H_{10}$ ) (g)	0,000000095
berillio (Be) (g)	0,0000000105
boro (B) (g)	0,0000086
bromo (Br) (g)	0,0000082
butano ( $n-C_4H_{10}$ ) (g)	0,032
buteno ( $1-C_4H_8CH_2CH=CH_2$ ) (g)	0,000042
cádmio (Cd) (g)	0,000029
cálcio (Ca) (g)	0,00042
dióxido de carbono ( $CO_2$ , fossil) (g)	38804,30
monóxido de carbono ( $CO$ ) (g)	1,25
tetrafluoreto de carbono ( $CF_4$ ) (g)	0,0000061
cromo ( $Cr^{3+}; Cr^{6+}$ ) (g)	0,0000101
cobalto (Co) (g)	0,000022
cobre (Cu) (g)	0,000035
cianida ( $CN^-$ ) (g)	0,000020
dioxinas (não especificado) (g)	0,00000000029
etano ( $C_2H_6$ ) (g)	0,49
etanol ( $C_2H_5OH$ ) (g)	0,0000075
estilbenzeno ( $C_8H_{10}$ ) (g)	0,000047
étileno ( $C_2H_4$ ) (g)	0,78
formaldeído ( $CH_2O$ ) (g)	0,00064
halon 1301 ( $CF_3Br$ ) (g)	0,0000017
heptano ( $C_7H_{16}$ ) (g)	0,000080
hexano ( $C_6H_{14}$ ) (g)	0,000047
CxHy (exceto $CH_4$ ) (g)	0,85
ácido clorídrico ( $HCl$ ) (g)	0,0015
ácido fluorídrico ( $HCl$ ) (g)	0,00033
gás sulfídrico ( $H_2S$ ) (g)	0,025
iodo (I) (g)	0,0000040
ferro (Fe) (g)	0,00055
chumbo (Pb) (g)	0,000043
magnésio (Mg) (g)	0,000079
manganês (Mn) (g)	0,00136
mercúrio (Hg) (g)	0,000018
metano ( $CH_4$ ) (g)	4,03

metano ( $\text{CH}_4$ ) (g)	0,0000082	
níquel (Ni) (g)	0,000065	
óxidos de nitrogênio (NOx expresso como $\text{NO}_2$ ) (g)	1,97	
óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (g)	0,0079	
material particulado (não especificado) (g)	0,094	
pentano ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) (g)	0,077	
fenol ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ) (g)	0,000000059	
fósforo (P) (g)	0,000026	
hidrocarbonetos aromáticos píclicos (PAH, não especificados) (g)	0,00064	
potássio (K) (g)	0,0013	
propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) (g)	0,056	
propionaldeído ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHO}$ ) (g)	0,000000021	
ácido propiónico ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$ ) (g)	0,000028	
propileno ( $\text{CH}_2=\text{CHCH}_3$ ) (g)	0,000025	
selénio (Se) (g)	0,000023	
silício (Si) (g)	0,00048	
sódio (Na) (g)	0,000034	
estrôncio (Sr) (g)	0,0000064	
óxidos de enxofre (SOx expresso como $\text{SO}_2$ ) (g)	0,93	
titânio (Ti) (g)	0,000016	
tolueno ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ ) (g)	0,015	
vanádio (V) (g)	0,000056	
sileno ( $\text{C}_6\text{H}_5(\text{CH}_3)_2$ ) (g)	0,000074	
zinc (Zn) (g)	0,00021	
Efuentes Líquidos		( / UF sistema)
aldeídos (não especificados) (g)	0,000014	
alcanos (não especificados) (g)	0,00037	
alcoois (não especificados) (g)	0,000033	
alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) (g)	0,016	
amônia ( $\text{NH}_4^+$ , $\text{NH}_3$ , as N) (g)	0,00043	
AOX (orgânicos halogenados adsoríveis) (g)	0,0000013	
CxHy aromáticos (não especificados) (g)	0,0026	
arsênico ( $\text{As}^{3+}$ , $\text{As}^{5+}$ ) (g)	0,000032	
bário ( $\text{Ba}^{2+}$ ) (g)	0,0024	
barita (g)	0,47	
benzeno ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) (g)	0,00017	
DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) (g)	0,0020	
boro ( $\text{B}^{3+}$ ) (g)	0,000046	
cadmio ( $\text{Cd}^{2+}$ ) (g)	0,0000020	

cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) (g)	0,14
cloreto de cloro (Cl) (g)	0,47
material clorado (expresso como Cl) (g)	0,075
clorofluorômetro (ClFCI) (g)	0,000000090
clorina ( $\text{Cl}^{3+}$ ) (g)	0,00035
Crômio ( $\text{Cr}^{6+}$ ) (g)	0,000000015
cobalto ( $\text{Co}^{1+}$ , $\text{Co}^{2+}$ , $\text{Co}^{3+}$ ) (g)	0,000021
DQO (Demanda Química de oxigênio) (g)	0,024
cobre ( $\text{Cu}^{1+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ ) (g)	0,000076
cianidas (CN) (g)	0,000033
sólidos dissolvidos (não especificado) (g)	0,0059
carbono orgânico dissolvido (COD) (g)	0,026
estilbenzeno ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_6\text{H}_5$ ) (g)	0,000054
fluoretos ( $\text{F}^-$ ) (g)	0,0042
formaldeído ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) (g)	0,00000000101
hexaclorooctano ( $\text{C}_2\text{Cl}_8$ ) (g)	0,000000000014
hipoclorito (ClO) (g)	0,000024
ácido hipocloroso ( $\text{HOCl}$ ) (g)	0,000024
iodo (I) (g)	0,000023
ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ ) (g)	0,016
chumbo ( $\text{Pb}^{2+}$ , $\text{Pb}^{4+}$ ) (g)	0,00021
magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (g)	0,014
manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Mn}^{3+}$ , $\text{Mn}^{7+}$ ) (g)	0,00038
cloreto de metila ( $\text{CH}_3\text{Cl}_2$ ) (g)	0,00023
níquel ( $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Ni}^{3+}$ ) (g)	0,000082
nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) (g)	0,00029
nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) (g)	0,000060
material nitrogenado (expresso como N) (g)	0,00052
cíacos (não especificado) (g)	0,067
fenol ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ) (g)	0,00037
fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{HPO}_4^{2-}$ , $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , $\text{H}_3\text{PO}_4$ , expressos como P) (g)	0,000019
fósforo ( $\text{P}$ ) (g)	0,0000093
hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs, não especificados) (g)	0,0000030
potássio ( $\text{K}^+$ ) (g)	0,0028
sais (não especificado) (g)	0,0020
dioxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) (g)	0,000082
sódio ( $\text{Na}^+$ ) (g)	0,15
estrôncio ( $\text{Sr}_2^+$ ) (g)	0,0016
sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (g)	0,19

		(/ UF sistema)
	Residuo Sólido	
sulfato(S <sup>2-</sup> ) (g)		0,0000081
sulfato(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) (g)		0,0000029
silicatos (não especificado) (g)		1,6
tetraclorureto(Cl <sub>4</sub> ) (g)		0,000000061
titânio(II <sup>2+</sup> , Ti <sup>4+</sup> ) (g)		0,0035
cromo orgânico total (IOCl) (g)		0,38
tolueno(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> ) (g)		0,0013
tridloroetano(1,1,1-CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> ) (g)		0,0000000078
tridloroeteno(Cl <sub>2</sub> CH=) (g)		0,000000021
tricloroengolf(C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl) (g)		0,026
xileno(C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) (g)		0,0027
zinco(Zn <sup>2+</sup> ) (g)		0,0060
alumínio(Al) (g)		0,033
arsénico(As) (g)		0,000013
cadmio(Cd) (g)		0,000000030
calcio(Ca) (g)		0,13
carbôn(C) (g)		0,099
Crmo(Gr <sup>3+</sup> , Cr <sup>6+</sup> ) (g)		0,00017
chinotto(G) (g)		0,000000061
chumbo(Pb) (g)		0,000000120
ferro(Fe) (g)		0,066
chumbo(Pb) (g)		0,00000014
manganês(Mn) (g)		0,0013
metálico(H) (g)		0,000000011
níquel(Ni) (g)		0,000000046
nitrogênio(N) (g)		0,00000052
ouros (não especificados) (g)		0,00120
fósforo(P) (g)		0,0017
oxigênio(O) (g)		0,020
zinc(Zn) (g)		0,00160

Anexo A15: Eco-vetor da unidade de processo de produção de gás natural do sistema de produto de FMP.

SUBSISTEMA: Produção de Gás Natural		
Pases de Cálculo	Produção de Gás Natural (KJ)	Produção de Gás Natural (KJ/UF sistema)
	1,00	48849,72
<b>ENTRADAS</b>		
Recurso Consumido	(/MJ energia)	(/ UF sistema)
sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ , recurso natural) (kg)	4,061405	0,0020
bauxita ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , recurso natural) (kg)	1,301507	0,0000054
bentonite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , recurso natural) (kg)	3,841506	0,0019
cromo ( $\text{Cr}$ , recurso natural) (kg)	7,811409	0,0000018
argila (recurso natural) (kg)	7,581506	0,0000019
cobre ( $\text{Cu}$ , recurso natural) (kg)	3,971508	0,0000019
ferro ( $\text{Fe}$ , recurso natural) (kg)	0,000119563	0,0058
chumbo ( $\text{Pb}$ , recurso natural) (kg)	1,241508	0,0000061
carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ , recurso natural) (kg)	4,791505	0,0023
manganês ( $\text{Mn}$ , recurso natural) (kg)	4,551509	0,0000022
gás natural (recurso natural) (kg)	0,0250015	1,22
níquel ( $\text{Ni}$ , recurso natural) (kg)	2,641509	0,0000013
petróleo (recurso natural) (kg)	7,131505	0,0035
arcila (recurso natural) (kg)	1,201506	0,000059
prata ( $\text{Ag}$ , recurso natural) (kg)	1,971510	0,00000096
cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ , recurso natural) (kg)	2,841507	0,000011
zincó (Zn, recurso natural) (kg)	2,891510	0,00000014
Hidrogênio (kg)	0,015	732,75
água (consumo total) (kg)	0,00929544	0,48
molécula (kg)	1,431506	0,000070
<b>SÁDAS</b>		
Produtos		(/ UF sistema)
Gás Natural (MJ)	1,00	48849,72
<b>Emissões Atmosféricas</b>		
	(/MJ energia)	(/ UF sistema)
acetildeido ( $\text{CH}_3\text{CHO}$ ) (g)	1,061506	0,000052
ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) (g)	0,000150431	0,0073
acetona ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) (g)	1,781507	0,0000087
aldeídos (não especificado) (g)	5,331507	0,000026
álcenos (não especificado) (g)	0,01285308	0,14
álcenos (não especificado) (g)	6,261506	0,00031
alcinos (não especificado) (g)	6,621508	0,0000032
alumínio (g)	2,771506	0,0004

amônia (N l) (g)	1,08E+06	0,000283
arsénico (As) (g)	2,99E+08	0,0000015
bário (Ba) (g)	3,85E+08	0,0000019
benzaldeído (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CO) (g)	1,20E+11	0,0000000069
benzeno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) (g)	0,000401561	0,020
benzopireno (C <sub>21</sub> H <sub>12</sub> ) (g)	1,50E+08	0,00000073
benzoíto (Ph) (g)	1,65E+10	0,000000081
boro (B) (g)	1,34E+06	0,000068
bromo (Br) (g)	1,29E+07	0,0000033
butano (n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) (g)	0,00816363	0,040
buteno (1-C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> CH=CH <sub>2</sub> ) (g)	2,72E+07	0,000023
cádmio (Cd) (g)	4,52E+08	0,000022
cálcio (Ca) (g)	6,55E+06	0,00032
dóxido de carbono (CO <sub>2</sub> , fossil) (g)	608,075	2704,30
monóxido de carbono (CO) (g)	0,0196202	0,96
tetrafluoreto de carbono (CF <sub>4</sub> ) (g)	9,61E+09	0,0000047
crômio (Cr <sup>3+</sup> ; Cr <sup>6+</sup> ) (g)	1,58E+07	0,0000077
cobalto (Co) (g)	3,38E+08	0,000017
cobre (Cu) (g)	2,39E+07	0,000012
cianeto (CN) (g)	3,17E+08	0,0000035
diclorinas (não especificadas) (g)	4,48E+13	0,00000000022
etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ) (g)	0,00293921	0,14
etanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH) (g)	1,17E+07	0,0000057
enilbenzeno (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Ph) (g)	2,71E+07	0,000013
etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) (g)	0,0121815	0,00
formicálico (CH <sub>2</sub> O) (g)	0,00100507	0,0049
halon 1301 (CF <sub>3</sub> Br) (g)	2,71E+08	0,000013
heptano (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> ) (g)	1,26E+06	0,000062
hexano (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> ) (g)	2,64E+06	0,00013
CsI k <sub>y</sub> (exeto Cl I <sub>y</sub> ) (g)	0,0132523	0,68
ácido clorídrico (HCl) (g)	2,54E+05	0,0012
ácido fluorídrico (HF) (g)	3,00E+06	0,00018
gás sulfídrico (HS) (g)	0,000884449	0,019
iodo (I) (g)	6,29E+08	0,000031
ferro (Fe) (g)	8,68E+06	0,00042
chumbo (Hg) (g)	8,38E+07	0,000041
magnésio (Mg) (g)	1,24E+06	0,000061
manganês (Mn) (g)	5,58E+06	0,00027

mercúrio (I h) (g)	1,971417	0,000096
metano (CH) (g)	0,0632052	3,09
metanol (CH <sub>3</sub> OH) (g)	1,281407	0,000063
níquel (Ni) (g)	1,021406	0,000050
óxidos de nitrogênio (NOx expresso como NO <sub>2</sub> ) (g)	0,0308548	1,51
óxido nítrico (N <sub>2</sub> O) (g)	0,00123956	0,0061
material particulado (não especificado) (g)	0,00147671	0,072
pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> ) (g)	0,00120844	0,059
fenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH) (g)	9,171411	0,000000045
fósforo (P) (g)	4,111408	0,000020
hidrocarbonetos aromáticos políclicos (PAH, não especificados) (g)	1,011405	0,00049
potássio (K) (g)	2,081405	0,0010
propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) (g)	0,000880376	0,043
propionilide (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CO) (g)	3,291411	0,000000016
ácido propiónico (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH) (g)	4,341408	0,000021
propileno (CH <sub>2</sub> CH=CH <sub>2</sub> ) (g)	3,971407	0,000039
selênio (Se) (g)	3,541407	0,000017
silício (Si) (g)	7,601406	0,00037
sódio (Na) (g)	5,331407	0,000026
estrôncio (Sr) (g)	1,001408	0,0000049
óxidos de cromo (VIx expresso como Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ) (g)	0,0145101	0,71
titanio (Ih) (g)	2,581408	0,0000013
tolueno (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> ) (g)	0,000201167	0,0098
vanídio (V) (g)	8,801407	0,000043
xileno (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> ) (g)	1,161406	0,000057
zinc (Zn) (g)	3,281406	0,00016
Fuentes líquidas		(/ litro sistema)
aldeídos (não especificados) (g)	2,221407	0,000011
alcanos (não especificados) (g)	5,731406	0,00028
alenos (não especificados) (g)	5,221407	0,000025
alumínio (Al <sup>3+</sup> ) (g)	0,000251073	0,012
amônia (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NH <sub>3</sub> as N) (g)	6,711406	0,00023
AOX (orgânicos halogenados adsoríveis) (g)	2,051408	0,0000010
Cd ly aromáticos (não especificados) (g)	4,091405	0,021
arsênico (As <sup>3+</sup> , As <sup>5+</sup> ) (g)	4,961407	0,000024
bário (Ba <sup>2+</sup> ) (g)	3,791405	0,0019
barita (g)	0,00734453	0,36
benzeno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) (g)	5,751406	0,00028

DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) (g)	3,111405	0,0015
lítio ( $\text{Li}^+$ ) (g)	7,231407	0,000086
cádmio ( $\text{Cd}^{2+}$ ) (g)	3,161408	0,000015
calcílio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) (g)	0,00224653	0,11
dureza (C) (g)	0,00732105	0,36
material dourado (expresso como Cl) (g)	0,00116778	0,057
clorofílio ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}_2$ ) (g)	1,251409	0,000000061
crômio ( $\text{Cr}^{3+}$ ) (g)	5,441406	0,00027
Cromo ( $\text{Cr}^{6+}$ ) (g)	1,021410	0,000000050
cobalto ( $\text{Co}^{1+}$ , $\text{Co}^{2+}$ , $\text{Co}^{3+}$ ) (g)	3,361407	0,000016
DOX (Demanda Química de oxigênio) (g)	0,001371308	0,013
cobre ( $\text{Cu}^{1+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ ) (g)	1,191406	0,000059
cianeto ( $\text{CN}$ ) (g)	5,151407	0,000023
sólidos dissolvidos (não especificado) (g)	9,171405	0,0045
calx no orgânico dissolvido (COO) (g)	0,000413254	0,020
carbônico ( $\text{Ca}_3\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_7$ ) (g)	8,401408	0,000041
fluoretos (F) (g)	6,531405	0,0032
formicídio ( $\text{CH}_3\text{CO}$ ) (g)	1,591411	0,0000000078
hexaclorocetano ( $\text{C}_6\text{Cl}_6$ ) (g)	2,211415	0,000000000011
hipoclorito ( $\text{ClO}$ ) (g)	3,761407	0,000018
ácido hipocloroso ( $\text{HClO}$ ) (g)	3,761407	0,000018
iodo (I) (g)	3,571408	0,000017
ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ ) (g)	0,000243813	0,012
chumbo ( $\text{Pb}^{2+}$ , $\text{Pb}^{4+}$ ) (g)	3,261406	0,00016
magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (g)	0,00021163	0,010
manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Mn}^{4+}$ , $\text{Mn}^{7+}$ ) (g)	5,991406	0,00029
clorato de metila ( $\text{CH}_3\text{ClO}_3$ ) (g)	3,591406	0,000018
niquel ( $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Ni}^{3+}$ ) (g)	1,281406	0,000063
nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) (g)	4,571406	0,00022
nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) (g)	9,341408	0,0000146
material nitrogenado (expresso como N) (g)	8,171406	0,00090
óxicos (não especificado) (g)	0,001048099	0,051
fend ( $\text{Ca}_3\text{K}_2\text{O}_7$ ) (g)	5,861406	0,00023
fósforo ( $\text{P}$ ) (g)	3,011406	0,00095
fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{HPO}_4^{2-}$ , $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , $\text{H}_3\text{PO}_4$ , expressos como P) (g)	1,451407	0,000071
hidrocarbonetos aromáticos políclicos (PAHs, não especificados) (g)	4,701408	0,000023
potássio ( $\text{K}^+$ ) (g)	0,000153986	0,0075
sais (não especificados) (g)	0,000141337	0,0069

dóxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) (g)	1,29146	0,000033
sódio ( $\text{Na}^+$ ) (g)	0,0241411	0,12
estrôncio ( $\text{Sr}^{+}$ ) (g)	2,89146	0,0022
sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (g)	0,0132106	0,15
sulfeto ( $\text{S}^{2-}$ ) (g)	1,271407	0,0000032
sulfito ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) (g)	6,181419	0,0000100
solutos resíduos (não especificados) (g)	0,0257923	1,26
tetracloruro de carbono ( $\text{CCl}_4$ ) (g)	5,401412	0,000000026
titânio ( $\text{Ti}^{3+}, \text{Ti}^{4+}$ ) (g)	1,351406	0,0006
carbono orgânico total (TOC) (g)	0,0180189	0,29
tolueno ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ ) (g)	5,181406	0,0025
tridloroeteno (1,1,1-tricloroetano) (g)	1,221411	0,000000007
tridloroetileno (1,1,1-tricloroetileno) (g)	3,351410	0,00000006
tricloroetanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{ClO}$ ) (g)	0,0041254	0,000
silicona ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}_2\text{O}_2$ ) (g)	4,161406	0,0020
zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ) (g)	9,481406	0,0045
Resíduos Sólidos	(/M tonelada)	(/ UF sistema)
alumínio (Al) (g)	0,01618255	0,025
arsénico (As) (g)	2,071407	0,000010
cadmio ( $\text{Cd}^{2+}$ ) (g)	9,371411	0,000000046
calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) (g)	0,0217655	0,10
carbono (C) (g)	0,0155411	0,076
Chrom ( $\text{Cr}^{3+}, \text{Cr}^{6+}$ ) (g)	2,591406	0,0003
chumbo ( $\text{Pb}^{2+}$ ) (g)	9,501411	0,000000046
cobre ( $\text{Cu}^{2+}$ ) (g)	4,761410	0,00000023
ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) (g)	0,0103499	0,051
chumbo (Hg) (g)	2,171409	0,00000011
manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ ) (g)	2,071406	0,0010
mercurio ( $\text{Hg}^{2+}$ ) (g)	1,731411	0,000000055
níquel ( $\text{Ni}^{2+}$ ) (g)	7,141410	0,00000065
nitrogênio ( $\text{N}^{3-}$ ) (g)	8,111409	0,00000040
óxidos (não especificados) (g)	3,071406	0,0005
fósforo ( $\text{P}^{3-}$ ) (g)	2,591406	0,003
oxofrete ( $\text{S}^{2-}$ ) (g)	0,0131698	0,005
zinc ( $\text{Zn}^{2+}$ ) (g)	7,781406	0,00033

Anexo A16: Eco-vetor da unidade de processo de geração de eletricidade para a produção de TSP

SUBSISTEMA - Produção de Energia Elétrica		
Bases de Cálculo	Produção de Energia Elétrica (KJ eletricidade)	Produção de Energia Elétrica (KJ/UF sistema)
	1,00	44075,04
ENTRADAS		
Recurso Consumido	( / KJ eletricidade ) <sup>(a)</sup>	( / UF sistema )
sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ , recurso natural) (kg)	4,054E-10	0,0000018
bauxita ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , recurso natural) (kg)	1,907E-10	0,0000084
bentonita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , recurso natural) (kg)	3,833E-11	0,0000017
sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ , recurso natural) (kg)	8,660E-11	0,0000038
cromo (Cr, recurso natural) (kg)	7,797E-14	0,0000000034
argila (recurso natural) (kg)	1,084E-09	0,000048
cobre (Cu, recurso natural) (kg)	3,964E-13	0,000000017
calcário (não especificado) (kg)	1,184E-08	0,00052
ferro (Fe, recurso natural) (kg)	7,526E-09	0,00033
sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ , recurso natural) (kg)	8,279E-11	0,0000036
chumbo (Pb, recurso natural) (kg)	1,234E-13	0,019
carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ , recurso natural) (kg)	4,285E-07	0,000000020
manganês (Mn, recurso natural) (kg)	4,546E-14	0,000000012
níquel (Ni, recurso natural) (kg)	2,639E-14	0,11
petróleo (recurso natural) (kg)	2,585E-06	0,00004
arcila (recurso natural) (kg)	3,121E-10	0,0000000057
prata ( $\text{Ag}$ , recurso natural) (kg)	1,967E-15	0,00011
cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ , recurso natural) (kg)	2,398E-09	0,0000000013
zincos (Zn, recurso natural) (kg)	2,880E-15	0,00000082
explosivos (não especificado) (kg)	1,867E-11	0,000040
águas de metal (kg)	9,052E-10	0,00048
uso de espaço físico (II > III)	1,094E-08	0,000065
uso de espaço físico (II > IV)	1,465E-09	0,000023
uso de espaço físico (III > IV)	5,178E-10	0,94
água (consumo total) (kg)	2,130E-05	0,00059
madeira (kg)	1,345E-08	
SAÍDAS		
Produtos	( / KJ eletricidade ) <sup>(a)</sup>	( / UF sistema )
Energia Elétrica (MJ eletricidade)	1,00	44075,04
Vazios Atmosféricos	( / KJ eletricidade ) <sup>(a)</sup>	( / UF sistema )
acetaldeídos ( $\text{CH}_3\text{CHO}$ ) (g)	1,415E-08	0,00062
ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) (g)	5,810E-08	0,0026
acetona ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) (g)	1,415E-08	0,00062
acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) (g)	2,298E-08	0,0010

aldeídos (não especificado) (g)	3,5731±10	0,000016
alcanos (não especificado) (g)	2,5801±07	0,011
alcanos (não especificado) (g)	2,5891±08	0,0011
alcanos (não especificado) (g)	6,6131±13	0,000000029
alumínio (g)	4,4201±07	0,019
amônia (N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) (g)	9,2631±09	0,00041
antimônio (Sb) (g)	8,5301±11	0,0000038
AOX (orgânicos halogenados adsoríveis) (g)	3,6831±19	0,0000000000016
Cd (I <sub>2</sub> ) (arrotácticos) (g)	1,4151±08	0,00062
arsénico (As) (g)	2,1481±09	0,000095
bário (Ba) (g)	5,2991±09	0,00023
benzaldeído (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO) (g)	1,1941±16	0,000000000053
benzeno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) (g)	5,3591±08	0,0024
benzopireno (C <sub>21</sub> H <sub>12</sub> ) (g)	7,3961±11	0,0000033
berílio (Be) (g)	8,6801±11	0,000038
boro (B) (g)	4,1951±08	0,0018
bromo (Br) (g)	8,3891±09	0,00037
butano (n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) (g)	4,0411±07	0,018
buteno (1-C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> CH <sub>2</sub> CH=CH <sub>2</sub> ) (g)	4,6261±09	0,00020
cádmio (Cd) (g)	3,3221±09	0,00015
cálcio (Ca) (g)	6,1111±08	0,0027
dioxídeo de carbono (CO <sub>2</sub> , fossil) (g)	1,2801±01	5643,00
monóxido de carbono (CO) (g)	7,5171±46	0,33
tetrafluoreto de carbono (CF <sub>4</sub> ) (g)	9,6041±14	0,000000042
cloro (Cl) (g)	2,2781±13	0,00000010
cromo (Cr <sup>3+</sup> ; Cr <sup>6+</sup> ) (g)	2,6191±49	0,00012
cobalto (Co) (g)	3,4021±09	0,00015
cobre (Cu) (g)	5,5091±09	0,00024
cianida (CN) (g)	1,1641±10	0,0000051
dioxinas (não especificado) (g)	8,8511±16	0,000000000039
etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ) (g)	3,4481±06	0,15
etanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH) (g)	2,8301±08	0,0012
etilbenzeno (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> ) (g)	4,6261±09	0,00020
etileno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) (g)	3,2031±07	0,014
fluoretos (F <sup>-</sup> ) (g)	1,6961±12	0,000000075
flúor (F <sub>2</sub> ) (g)	9,2631±13	0,000000041
formaldéido (CH <sub>2</sub> O) (g)	4,6861±08	0,0021
HALON 1301 (CH <sub>2</sub> Br <sub>2</sub> ) (g)	5,2481±10	0,000023
heptano (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> ) (g)	4,6261±08	0,0020

hexano ( $C_6H_{14}$ ) (g)	9,242E-08	0,0041
óxido de hidrogênio (I) (g)	1,820E-05	0,80
óxido de hidrogênio (não especificados) (g)	2,629E-08	0,0012
hidrogênio (I) (g)	9,935E-14	0,0000000044
ácido clorídrico (I) (g)	2,239E-06	0,10
ácido fluorídrico (I) (g)	8,992E-08	0,0040
gás sulfídrico (I) (S) (g)	6,182E-08	0,0027
iodo (I) (g)	2,097E-09	0,000092
ferro (IV) (g)	1,949E-07	0,0086
lantâncio (I) (g)	1,395E-10	0,000061
chumbo (Pb) (g)	9,122E-09	0,00040
magnésio (Mg) (g)	1,549E-07	0,0068
manganês (Mn) (g)	9,885E-10	0,000044
mercúrio (I) (g)	1,505E-10	0,0000066
metano (CH <sub>4</sub> ) (g)	1,008E-04	4,44
metanol (CH <sub>3</sub> OH) (g)	4,817E-08	0,0021
molibdêno (Mo) (g)	1,756E-09	0,000077
níquel (Ni) (g)	6,533E-08	0,0029
óxidos de nitrogênio (NOx expresso como NO <sub>2</sub> ) (g)	2,754E-05	1,21
óxido nitroso (N <sub>2</sub> O) (g)	2,124E-07	0,0094
matéria orgânica (não especificada) (g)	8,139E-10	0,000036
material particulado (não especificado) (g)	3,796E-05	1,67
pentano ( $C_5H_{12}$ ) (g)	2,426E-07	0,011
fenol ( $C_6H_5OH$ ) (g)	9,162E-16	0,000000000040
fósforo (V) (g)	3,904E-09	0,00017
pentóxido de fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (g)	2,649E-12	0,00000012
hidrocarbonetos aromáticos políclicos (PAH, não especificados)	1,425E-10	0,0000063
potássio (K) (g)	5,319E-08	0,0023
propano ( $C_3H_8$ ) (g)	8,827E-07	0,039
propionaldeído ( $CH_3CH_2CHO$ ) (g)	3,292E-16	0,000000000015
ácido propiónico ( $CH_3CH_2COOH$ ) (g)	4,245E-13	0,00000019
propileno ( $CH_2=CHCl$ ) (g)	3,432E-08	0,0015
escândio (Sc) (g)	4,727E-11	0,0000021
selênio (Se) (g)	2,037E-09	0,000090
silício (Si) (g)	6,623E-07	0,029
sódio (Na) (g)	1,009E-07	0,0044
estrôncio (Sr) (g)	8,650E-09	0,00038
óxidos de enxofre (SOx expresso como SO <sub>2</sub> ) (g)	1,402E-04	6,18
tálio (Tl) (g)	4,325E-11	0,0000019

tóxio (H) (g)	8,911E-11	0,0000039
estanho (Sn) (g)	2,790E-11	0,0000012
titanio (Ti) (g)	1,545E-08	0,00068
tolueno (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> ) (g)	3,924E-08	0,0017
urânio (U) (g)	8,650E-11	0,0000038
vanádio (V) (g)	2,596E-07	0,011
xileno (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) (g)	2,268E-08	0,0010
zinc (Zn) (g)	6,623E-09	0,00029
zircônio (Zr) (g)	6,623E-11	0,0000029
Fluentes Líquidos		( / UF sistema)
	( / kJ detriticida) <sup>a)</sup>	
alcoóis (não especificados) (g)	1,234E-10	0,0000054
aldeídos (não especificados) (g)	2,218E-12	0,00000010
alcanos (não especificados) (g)	3,302E-08	0,0015
alcenos (não especificados) (g)	3,041E-09	0,00013
alumínio (Al <sup>3+</sup> ) (g)	3,041E-08	0,0013
hidróxido de alumínio (Al(OH) <sub>3</sub> ) (g)	1,435E-12	0,00000063
Ammonia (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NH <sub>3</sub> as N) (g)	1,324E-07	0,0058
AOX (orgânicos halogenados adsorvíveis) (g)	4,666E-10	0,000021
CxH y aromáticos (não especificados) (g)	1,322E-07	0,0058
arsênico (As <sup>3+</sup> , As <sup>5+</sup> ) (g)	1,395E-10	0,0000061
bário (Ba <sup>2+</sup> ) (g)	6,349E-07	0,028
barita (g)	7,336E-08	0,0032
benzeno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) (g)	3,302E-08	0,0015
DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) (g)	6,232E-09	0,00027
ácido bórico (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> ) (g)	1,836E-09	0,000081
borr (B <sup>3+</sup> ) (g)	4,114E-09	0,00018
cádmio (Cd <sup>2+</sup> ) (g)	9,323E-11	0,0000041
cálcio (Ca <sup>2+</sup> ) (g)	8,166E-06	0,36
carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , CO <sub>2</sub> , expressos como C) (g)	2,228E-09	0,000098
cássio (K <sup>+</sup> ) (g)	2,529E-10	0,000011
cloreto (Cl) (g)	1,530E-04	6,74
clorofórmio ((CHCl <sub>3</sub> ) (g)	1,254E-14	0,0000000055
ctomo (Cr <sup>3+</sup> ) (g)	5,439E-11	0,0000024
ctomo (Cr <sup>3+</sup> , Cr <sup>4+</sup> ) (g)	6,734E-10	0,000030
ctomo (Cr <sup>6+</sup> ) (g)	1,024E-15	0,0000000045
cobalto (Co <sup>1+</sup> , Co <sup>2+</sup> , Co <sup>3+</sup> ) (g)	3,362E-12	0,0000015
DQO (Demanda Química de oxigênio) (g)	1,152E-07	0,0051
cobre (Cu <sup>1+</sup> , Cu <sup>2+</sup> ) (g)	3,843E-10	0,000017
cianidas (CN) (g)	3,854E-09	0,00017

sólidos dissolvidos (não especificado) (g)	1,678E-06	0,074
carbono orgânico dissolvido (COC) (g)	4,124E-09	0,0008
ácido cético ( $C_6H_{10}NO_3$ , HCOOH) (μ)	3,121E-12	0,00000014
ciclohexeno ( $C_6H_{12}$ ) (g)	6,081E-09	0,00027
fluoretos (F <sup>-</sup> ) (g)	8,420E-09	0,00037
formílico (CH <sub>2</sub> O) (g)	1,586E-16	0,000000000070
hexadecano ( $C_{16}H_{34}$ ) (g)	2,208E-20	0,00000000000010
hidrazina (N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) (g)	1,435E-12	0,00000063
Cd ly (não especificados) (g)	1,244E-11	0,00000055
hipoclorito (ClO) (g)	3,763E-12	0,00000017
ácido hipocloroso (HClO) (g)	3,763E-12	0,00000017
iodo (I) (μ)	2,529E-08	0,0011
ferro (Fe <sup>2+</sup> , Fe <sup>3+</sup> ) (g)	6,282E-08	0,0028
chumbo (Pb <sup>2+</sup> , Pb <sup>4+</sup> ) (g)	1,415E-09	0,000062
saís de lítio (g)	1,606E-13	0,000000071
magnésio (Mg <sup>2+</sup> ) (g)	2,203E-07	0,010
manganês (Mn <sup>2+</sup> , Mn <sup>4+</sup> , Mn <sup>7+</sup> ) (g)	1,766E-08	0,00078
mercúrio (Hg <sup>1+</sup> , Hg <sup>2+</sup> ) (g)	1,064E-12	0,00000047
metais (não especificado) (g)	2,248E-10	0,000010
cloreto de metila (CH <sub>3</sub> Cl) (g)	3,583E-11	0,0000016
molibdénio (Mo <sup>2+</sup> , Mo <sup>3+</sup> , Mo <sup>4+</sup> , Mo <sup>5+</sup> , Mo <sup>6+</sup> ) (g)	2,439E-10	0,000011
morfolina (C <sub>3</sub> H <sub>11</sub> NO) (g)	1,515E-11	0,0000067
níquel (Ni <sup>2+</sup> , Ni <sup>3+</sup> ) (g)	8,139E-10	0,000036
nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (g)	2,449E-08	0,0011
nitritos (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ) (g)	9,323E-13	0,000000041
material nitrogenado (expresso como N) (g)	1,419E-07	0,0063
óleos (não especificado) (g)	2,021E-07	0,0069
matéria orgânica dissolvida (não especificada) (g)	1,325E-10	0,0000058
ácido oxálico ((COOH) <sub>2</sub> ) (g)	6,242E-12	0,00000028
fenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH) (g)	3,091E-08	0,0014
fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ), expressos como P <sup>3-</sup>	5,319E-11	0,0000023
fósforo (P) (g)	1,054E-09	0,000046
pentóxido de fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (g)	7,898E-11	0,0000035
hidrocarbonetos aromáticos políclicos (PAH), não especificados	3,322E-09	0,00015
potássio (K <sup>+</sup> ) (g)	1,120E-06	0,049
rubídio (Rb <sup>+</sup> ) (g)	2,529E-09	0,00011
óleos e graxas saponificáveis (g)	1,236E-06	0,054
selénio (Se <sup>2+</sup> , Se <sup>4+</sup> , Se <sup>6+</sup> ) (g)	2,258E-10	0,000010
dóxido de silício (SiO <sub>2</sub> ) (g)	1,285E-11	0,0000057

dioxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) (g)	1,285E-11	0,00000057
prata ( $\text{Ag}^+$ ) (g)	1,515E-10	0,0000067
sódio ( $\text{Na}^+$ ) (g)	8,050E-05	3,55
estrôncio ( $\text{Sr}_2^+$ ) (g)	1,533E-06	0,068
sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (g)	6,669E-06	0,29
sulfetos ( $\text{S}^2-$ ) (g)	4,114E-09	0,00018
sulfitos ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) (g)	4,666E-12	0,00000021
material sulfurado (expresso como S) (g)	1,415E-13	0,0000000062
sólidos suspensos (não especificado) (g)	4,313E-07	0,019
tetrometileno ( $\text{C}_2\text{Cl}_4$ ) (g)	5,399E-17	0,000000000024
estanho ( $\text{Sn}^{2+}, \text{Sn}^{4+}$ ) (g)	4,255E-13	0,000000019
titânio ( $\text{Ti}^{3+}, \text{Ti}^{4+}$ ) (g)	2,087E-10	0,0000092
carbono orgânico total (TOC) (g)	1,723E-06	0,076
tolueno ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ ) (g)	2,740E-08	0,0012
tridometano (1,1,1-Cl <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ) (g)	1,214E-16	0,000000000054
tricloroetileno ( $\text{C}_2\text{Cl}_3\text{H}_1$ ) (g)	3,342E-15	0,0000000015
trietileno glicol ( $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_2$ ) (g)	4,124E-09	0,00018
vanádio ( $\text{V}^{3+}, \text{V}^{5+}$ ) (g)	5,770E-10	0,00025
compostos orgânicos voláteis (VOC) (g)	8,851E-08	0,0039
água (não especificada) (g)	2,489E-06	0,11
xileno ( $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$ ) (g)	2,382E-07	0,010
zincos ( $\text{Zn}^{2+}$ ) (g)	1,415E-09	0,000062
Resíduos Sólidos		( / UF sistema)
alumínio (Al) (g)	5,178E-09	0,0023
arsénico (As) (g)	2,067E-12	0,000000091
cadmio (Cd) (g)	9,363E-16	0,0000000041
calcio (Ca) (g)	2,067E-08	0,00091
carbono (g)	1,555E-08	0,00069
crômio ( $\text{Cr}^{3+}, \text{Cr}^{6+}$ ) (g)	2,589E-11	0,0000011
cobalto (Co) (g)	9,493E-16	0,0000000042
cobre (Cu) (g)	4,747E-15	0,0000000021
ferro (Fe) (g)	1,034E-08	0,00046
chumbo (Pb) (g)	2,168E-14	0,0000000010
manganês (Mn) (g)	2,067E-10	0,0000091
mercurio (Hg) (g)	1,726E-16	0,000000000076
níquel (Ni) (g)	7,135E-15	0,0000000031
nitrogênio (N) (g)	8,108E-14	0,0000000036
óleos (não especificados) (g)	3,071E-11	0,0000014
fósforo (P) (g)	2,589E-10	0,000011

carbo fcc (\$/t) (g)	3,1011509	0,00014
zinc (%)/ (g)	7,7771511	0,0000034
(a): os aspectos ambientais apresentados no presente ecovetor foram extraídos da base de dados de TEAMTM de Ecobilan para a Geração de Energia Elétrica no Brasil (1996). Esta fonte considera que a referida matriz energética obedece a seguinte distribuição de fontes de produção: Coal: 1.64%; Fuel Oil: 3.08%; Natural Gas: 0.25%; Nuclear: 0.84%; Hydro: 91.70%; Free Electricity (geothermal, solar, biomass and animal products, industrial waste, municipal waste, non-specified assumed being impact free): 2.49%		
(b): a referida estimativa do PCS (KJ/kg) foi realizada tomando-se por base valor médio dos PCSs das seguintes carvões coqueificados: CF-8, CF-11, CF-14, CF-17, CF-20 e RI-HR.		
Referências consultadas:		
1) Balanço Energético Nacional 2001. Ministério de Minas e Energia - MME. Secretaria de Energia. Brasília. 2001. ISSN 0101-6636. p. 103		
2) BRASCOOK Comércio Importação e Exportação de Minérios: <a href="http://www.brascook.com.br/estoque.htm">www.brascook.com.br/estoque.htm</a> - consultado em 29/04/2003		
(c): de acordo com IPT (1985) Apêndice G Tabela G9 p. 482, o valor médio do PCS do Gás Natural (KJ/kg) produzido no país será de		
(d): valor médio de PCS (em KJ/kg) para amostras de Óleo Combustível referentes às seguintes variedades: BPF, BTE, E, F, H-667 A, H-667 K, G(REVAP) e G(REPLAN). Os valores que compuseram tal resultado foram obtidos junto a IPT (1985), Apêndice G Tabela G1 p. 467.		

Anexo A17: Eco-vetor da unidade de processo de geração de energia elétrica do sistema de produto de produção de FMP.

SUBSISTEMA - Produção de Energia Elétrica		
Bases de Cálculo	Produção de Energia Elétrica (kJ eletricidade)	Produção de Energia Elétrica (kJ/UF sistema)
	1,00	<b>950129,57</b>
ENTRADAS		
Recurso Consumido	( / kJ eletricidade) <sup>(a)</sup>	( / UF sistema)
sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ , recurso natural) (kg)	4,0541×10 <sup>-10</sup>	0,00039
bauxita ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , recurso natural) (kg)	1,9071×10 <sup>-10</sup>	0,00018
bentonita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , recurso natural) (kg)	3,8331×11 <sup>-11</sup>	0,00036
sulfato de cálcio ( $\text{CaSO}_4$ , recurso natural) (kg)	8,6601×11 <sup>-11</sup>	0,00082
chromo (Cr, recurso natural) (kg)	7,7971×14 <sup>-14</sup>	0,000000074
ançula (recurso natural) (kg)	1,0841×10 <sup>-09</sup>	0,0010
cobre (Cu, recurso natural) (kg)	3,9641×13 <sup>-13</sup>	0,00000038
calcário (não especificado) (kg)	1,1841×10 <sup>-08</sup>	0,011
ferro (Fe, recurso natural) (kg)	7,5261×10 <sup>-09</sup>	0,0072
sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ , recurso natural) (kg)	8,2791×11 <sup>-11</sup>	0,000079
chumbo (Pb, recurso natural) (kg)	1,2341×13 <sup>-13</sup>	0,00000012
carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ , recurso natural) (kg)	4,2851×17 <sup>-17</sup>	0,41
manganês (Mn, recurso natural) (kg)	4,5461×14 <sup>-14</sup>	0,000000043
níquel (Ni, recurso natural) (kg)	2,6391×14 <sup>-14</sup>	0,000000025
petróleo (recurso natural) (kg)	2,5851×06 <sup>-06</sup>	2,46
areia (recurso natural) (kg)	3,1211×10 <sup>-10</sup>	0,00030
prata (Ag, recurso natural) (kg)	1,9671×15 <sup>-15</sup>	0,000000019
cloro de sódio ( $\text{NaCl}$ , recurso natural) (kg)	2,3981×09 <sup>-09</sup>	0,0023
zincos (Zn, recurso natural) (kg)	2,8801×15 <sup>-15</sup>	0,000000027
explosivos (não especificado) (kg)	1,8671×11 <sup>-11</sup>	0,00018
ápartes de metal (kg)	0,0521×10 <sup>-10</sup>	0,00086
uso de espaço físico (II > III)	1,0941×08 <sup>-08</sup>	0,010
uso de espaço físico (II > IV)	1,4651×09 <sup>-09</sup>	0,0014
uso de espaço físico (III > IV)	5,1781×10 <sup>-10</sup>	0,00049
água (consumo total) (kg)	2,1301×05 <sup>-05</sup>	20,24
madeira (kg)	1,3451×08 <sup>-08</sup>	0,013
SAÍDAS		
Produtos	( / kJ eletricidade) <sup>(a)</sup>	( / UF sistema)
Energia Elétrica (MJ eletricidade)	1,00	<b>950129,57</b>
Emissões Atmosféricas	( / kJ eletricidade) <sup>(a)</sup>	( / UF sistema)
acetaldeídos ( $\text{CH}_3\text{CHO}$ ) (g)	1,4151×08 <sup>-08</sup>	0,013
ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) (g)	5,8101×08 <sup>-08</sup>	0,055

acetona ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ ) (g)	1,415E-08	0,013
acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) (g)	2,298E-08	0,022
aldeídos (não especificado) (g)	3,573E-10	0,00034
alcanos (não especificado) (g)	2,580E-07	0,25
alcanos (não especificado) (g)	2,589E-08	0,025
alcanos (não especificado) (g)	6,613E-13	0,00000063
alumínio (g)	4,420E-07	0,42
amônia ( $\text{NH}_3$ ) (g)	9,263E-09	0,0088
antimônio (Nb) (g)	8,530E-11	0,000081
AOX (orgânicos halogenados; adeonárticos) (g)	3,683E-19	0,000000000035
Cd (g) (aromáticos) (g)	1,415E-08	0,013
arsênico (As) (g)	2,148E-09	0,0020
bártio (Ba) (g)	5,299E-09	0,0050
benzaldéido ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{CHO}$ ) (g)	1,194E-16	0,00000000011
benzeno ( $\text{C}_6\text{H}_6$ ) (g)	5,359E-08	0,051
benzopireno ( $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$ ) (g)	7,396E-11	0,000070
berílio (Be) (g)	8,680E-11	0,000082
boro (B) (g)	4,195E-08	0,040
bromo (Br) (g)	8,389E-09	0,0080
butano ( $n\text{-C}_4\text{H}_10$ ) (g)	4,041E-07	0,38
buteno ( $1\text{-C}_4\text{H}_7\text{CH}_2\text{CH}_3$ ) (g)	4,626E-09	0,0044
cádmio (Cd) (g)	3,322E-09	0,0032
cálcio (Ca) (g)	6,111E-08	0,058
dioxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ; fóssil) (g)	1,280E-01	121646,65
monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) (g)	7,517E-06	7,14
tetrafluoreto de carbono ( $\text{CF}_4$ ) (g)	9,604E-14	0,000000091
cloro ( $\text{Cl}_2$ ) (g)	2,278E-13	0,00000022
cromo ( $\text{Cr}^{3+}; \text{Cr}^{6+}$ ) (g)	2,619E-09	0,0025
cobalto (Co) (g)	3,402E-09	0,0032
cobre (Cu) (g)	5,509E-09	0,0052
cianida ( $\text{CN}$ ) (g)	1,164E-10	0,00011
dioxinas (não especificado) (g)	8,851E-16	0,00000000084
etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) (g)	3,448E-06	3,28
etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) (g)	2,830E-08	0,027
estilbeneno ( $\text{C}_8\text{H}_{10}$ ) (g)	4,626E-09	0,0044
etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) (g)	3,203E-07	0,30
fluoretos ( $\text{F}^-$ ) (g)	1,696E-12	0,0000016
flúor ( $\text{F}_2$ ) (g)	9,263E-13	0,00000088

formaldeído (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O) (g)	4,686±0,08	0,045
haloformos (Cl <sub>n</sub> Br) (g)	5,248±,10	0,00050
heptano (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> ) (g)	4,626±0,08	0,044
hexano (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> ) (g)	9,242±0,08	0,088
Cd Iy (exceto Cd I) (g)	1,820±0,05	17,30
Cd Iy (não especificados) (g)	2,629±0,08	0,025
hidrogênio (H) (g)	9,935±,14	0,00000094
ácido clorídrico (HCl) (g)	2,239±0,06	2,13
ácido fluorídrico (HF) (g)	8,992±0,08	0,085
gás sulfídrico (H <sub>2</sub> S) (g)	6,182±0,08	0,059
iodo (I) (g)	2,997±,09	0,0020
ferro (Fe) (g)	1,949±,07	0,19
lantâncio (La) (g)	1,395±,10	0,00013
chumbo (Pb) (g)	9,122±0,09	0,0087
magnésio (Mg) (g)	1,549±0,07	0,15
manganês (Mn) (g)	9,885±,10	0,00094
mercúrio (Hg) (g)	1,505±,10	0,00014
metano (CH <sub>4</sub> ) (g)	1,008±0,04	95,77
metanol (CH <sub>3</sub> OH) (g)	4,877±0,08	0,046
molibdeno (Mo) (g)	1,756±,09	0,0017
níquel (Ni) (g)	6,533±0,08	0,062
óxidos de nitrogênio (NOx expresso como NO <sub>2</sub> ) (g)	2,754±0,05	26,17
óxido nitroso (N <sub>2</sub> O) (g)	2,124±,07	0,20
matéria orgânica (não especificada) (g)	8,139±,10	0,00077
material particulado (não especificado) (g)	3,796±0,05	36,07
pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> ) (g)	2,426±,07	0,23
fenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CO <sub>2</sub> H) (g)	9,162±,16	0,0000000087
fósforo (P) (g)	3,904±,09	0,037
pentóxido de fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (g)	2,649±,12	0,0000025
hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH, não especificados) (g)	1,425±,10	0,00014
potássio (K) (g)	5,319±0,08	0,051
propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) (g)	8,827±,07	0,84
propionaldeído (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHO) (g)	3,292±,16	0,0000000031
ácido propiónico (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH) (g)	4,245±,13	0,00000040
propileno (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ) (g)	3,432±0,08	0,033
escândio (Sc) (g)	4,727±,11	0,000045
selênio (Se) (g)	2,037±,09	0,0019
silício (Si) (g)	6,623±,07	0,63

sódio (Na) (g)	1,001±07	0,096
estrôncio (Sr) (g)	8,650±09	0,0082
óxidos de enxofre (SOx expresso como SO <sub>2</sub> ) (g)	1,4021±04	133,22
tálio (Tl) (g)	4,3251±11	0,000041
tório (Th) (g)	8,9111±11	0,000085
estanho (Sn) (g)	2,7901±11	0,000027
titânio (Ti) (g)	1,5451±08	0,015
tolueno (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> ) (g)	3,9241±08	0,037
urânio (U) (g)	8,6501±11	0,000082
vanádio (V) (g)	2,5961±07	0,25
xileno (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) (g)	2,2681±08	0,022
zincos (Zn) (g)	6,6231±09	0,0063
zircônio (Zr) (g)	6,6231±11	0,000063
Fluentes Líquidos		( / kJ eletricidade ) <sup>(a)</sup>
		( / UF sistema)
alcoóis (não especificados) (g)	1,2341±10	0,00012
álcalis (não especificados) (g)	2,2181±12	0,0000021
alcanos (não especificados) (g)	3,3021±08	0,031
alceros (não especificados) (g)	3,0411±09	0,0029
alumínio (Al <sup>3+</sup> ) (g)	3,0411±08	0,029
hidróxido de alumínio (Al(OH) <sub>3</sub> ) (g)	1,4351±12	0,0000014
Ammonia (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NH <sub>3</sub> , as N) (g)	1,3241±07	0,13
AOX (orgânicos halogenados adsorvíveis) (g)	4,6661±10	0,00044
Cd e iônicos aromáticos (não especificados) (g)	1,3221±07	0,13
arsênico (As <sup>3+</sup> , As <sup>5+</sup> ) (g)	1,3951±10	0,00013
bário (Ba <sup>2+</sup> ) (g)	6,3491±07	0,60
barita (g)	7,3361±08	0,070
benzeno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) (g)	3,3021±08	0,031
DBO (Demanda Biológica de Oxigênio) (g)	6,2321±09	0,0059
ácido bórico (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> ) (g)	1,8361±09	0,0017
boru (B <sup>3+</sup> ) (g)	4,1141±09	0,0039
cadmio (Cd <sup>2+</sup> ) (g)	9,3231±11	0,000089
cálcio (Ca <sup>2+</sup> ) (g)	8,1661±06	7,76
carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> , CO <sub>3</sub> , expressos como C) (g)	2,2281±09	0,0021
césio (Cs <sup>2+</sup> ) (g)	2,5291±10	0,00024
cloreto (Cl) (g)	1,5301±04	145,40
clorofórmio (CHCl <sub>3</sub> ) (g)	1,2541±14	0,000000012
ctomo (Cr <sup>3+</sup> ) (g)	5,4391±11	0,000052
ctomo (Cr <sup>3+</sup> , Cr <sup>4+</sup> ) (g)	6,7341±10	0,00064

cromo ( $\text{Cr}^{6+}$ ) (g)	1,0241±15	0,0000000097
cobalto ( $\text{Co}^{1+}$ , $\text{Co}^{2+}$ , $\text{Co}^{3+}$ ) (g)	3,3621±12	0,0000032
lXX (LXVII) (Química de oxigênio) (g)	1,1521±17	0,11
cobre ( $\text{Cu}^{1+}$ , $\text{Cu}^{2+}$ ) (g)	3,8431±10	0,00037
cianidas (CN) (g)	3,8541±09	0,0037
sólidos dissolvidos (não especificado) (g)	1,6781±06	1,59
carbono orgânico dissolvido (COC) (g)	4,1241±09	0,0039
ácido cítrico ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{Na}_3$ ) (g)	3,1211±12	0,0000030
enilbenzeno ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{C}_6\text{H}_5$ ) (g)	6,0811±09	0,0058
fluoretos (F-) (g)	8,4201±09	0,0080
formaldeído ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) (g)	1,5861±16	0,0000000015
hexaclorocetano ( $\text{C}_2\text{Cl}_6$ ) (g)	2,2081±20	0,000000000021
hidrazina ( $\text{N}_2\text{H}_4$ ) (g)	1,4351±12	0,0000014
Cd ly (não especificado) (g)	1,2441±11	0,000012
hipoclorito (ClO) (g)	3,7631±12	0,0000036
ácido hipocloroso (HClO) (g)	3,7631±12	0,0000036
iodo (I) (g)	2,5291±08	0,024
ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ , $\text{Fe}^{3+}$ ) (g)	6,2821±08	0,060
chumbo ( $\text{Pb}^{2+}$ , $\text{Pb}^{4+}$ ) (g)	1,4151±09	0,0013
sais de lítio (g)	1,6061±13	0,0000015
magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (g)	2,2031±07	0,21
manganês ( $\text{Mn}^{2+}$ , $\text{Mn}^{4+}$ , $\text{Mn}^{7+}$ ) (g)	1,7661±08	0,017
mercurio ( $\text{Hg}^{1+}$ , $\text{Hg}^{2+}$ ) (g)	1,0641±12	0,0000010
metáis (não especificado) (g)	2,2481±10	0,00021
cloreto de metila ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) (g)	3,5831±11	0,000034
molibdénio ( $\text{Mo}^{2+}$ , $\text{Mo}^{3+}$ , $\text{Mo}^{4+}$ , $\text{Mo}^{5+}$ , $\text{Mo}^{6+}$ ) (g)	2,4391±10	0,00023
morfolina ( $\text{C}_5\text{H}_11\text{NO}$ ) (g)	1,5151±11	0,000014
níquel ( $\text{Ni}^{2+}$ , $\text{Ni}^{3+}$ ) (g)	8,1391±10	0,00077
nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) (g)	2,4491±08	0,023
nitrítos ( $\text{NO}_2^-$ ) (g)	9,3231±13	0,00000089
material nitrogenado (expresso com N) (g)	1,4191±07	0,13
óleos (não especificado) (g)	2,0211±07	0,19
matéria orgânica dissolvida (não especificada) (g)	1,3251±10	0,00013
ácido oxálico ((COOH) <sub>2</sub> ) (g)	6,2421±12	0,0000059
fenol ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ) (g)	3,0911±08	0,029
fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{HPO}_4^{2-}$ , $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , $\text{H}_3\text{PO}_4$ , expressos com P) (g)	5,3191±11	0,000051
fósforo (P) (g)	1,0541±09	0,0010
pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) (g)	7,8981±11	0,000075

hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs não especificados) (g)	3,3221±09	0,0032
potássio ( $K^+$ ) (g)	1,1201±06	1,06
rubídio ( $Rb^+$ ) (g)	2,5291±09	0,0024
óleos e gorduras saponificáveis (g)	1,2361±16	1,17
selénio ( $Se^{2+}$ , $Se^{4+}$ , $Se^{6+}$ ) (g)	2,2581±10	0,00021
dióxido de silício ( $SiO_2$ ) (g)	1,2851±11	0,000012
prata ( $Ag^+$ ) (g)	1,5151±10	0,00014
sódio ( $Na^+$ ) (g)	8,0501±05	76,48
estrôncio ( $Sr^{2+}$ ) (g)	1,5331±06	1,46
sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) (g)	6,6691±06	6,34
sulfetos ( $S^{2-}$ ) (g)	4,1141±09	0,0039
sulfítos ( $SO_3^{2-}$ ) (g)	4,6661±12	0,0000044
material sulfurado (expresso como S) (g)	1,4151±13	0,00000013
sólidos suspensos (não especificado) (g)	4,3131±07	0,41
tetracloroetileno ( $C_2Cl_4$ ) (g)	5,3991±17	0,00000000051
estanho ( $Sn^{2+}$ , $Sn^{4+}$ ) (g)	4,2551±13	0,00000040
titânio ( $Ti^{3+}$ , $Ti^{4+}$ ) (g)	2,0871±10	0,00020
carbono orgânico total (TOC) (g)	1,7231±06	1,64
tolueno ( $C_6H_5Cl$ ) (g)	2,7401±08	0,026
tricloroetano (1,1,1-C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> ) (g)	1,2141±16	0,00000000012
tricloroetileno ( $C_2Cl_3$ ) (g)	3,3421±15	0,0000000032
tricloro glicol ( $C_2H_4Cl_2O$ ) (g)	4,1241±09	0,0039
vanádio ( $V^{2+}$ , $V^{5+}$ ) (g)	5,7701±10	0,00055
compostos orgânicos voláteis (VOC) (g)	8,8511±08	0,084
água (não especificada) (g)	2,489E±06	2,36
xileno ( $C_6H_5Cl$ ) (g)	2,3821±07	0,23
zinc ( $Zn^{2+}$ ) (g)	1,4151±09	0,0013
Resíduos Sólidos		
	( / kJ eletricidade ) <sup>(a)</sup>	( / UF sistem)
alumínio (Al) (g)	5,1781±09	0,0049
arsênico ( $As$ ) (g)	2,0671±12	0,0000020
cadmio ( $Cd$ ) (g)	9,3631±16	0,0000000089
calcio (Ca) (g)	2,0671±08	0,020
carbono (g)	1,5551±08	0,015
cromo ( $Cr^{3+}$ , $Cr^{6+}$ ) (g)	2,5891±11	0,000025
cobalto ( $Co$ ) (g)	9,4931±16	0,0000000090
cobre ( $Cu$ ) (g)	4,7471±15	0,0000000045
ferro ( $Fe$ ) (g)	1,0341±08	0,0098
chumbo ( $Pb$ ) (g)	2,1681±08	0,021

manganês (Mn) (g)	2,0671±10	0,00020
mercurio (Hg) (g)	1,7261±16	0,0000000016
níquel (Ni) (g)	7,1351±15	0,000000068
nitrogênio (N) (g)	8,1081±14	0,000000077
óleos (não especificados) (g)	3,0711±11	0,000029
fósforo (P) (g)	2,5891±10	0,00025
enxofre (S) (g)	3,1011±09	0,0029
zincos (Zn) (g)	7,7771±11	0,000074

#### DETERMINAÇÃO DA CONTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA DE PRODUTO DE FMP

Produto	Quantidade Produzida (kJ/FR sistema)	Contribuição Percentual (%)
Energia Elétrica 1: Lavra da Rocha Fosfática (kJ)	10022,47	1,05
Energia Elétrica 2: Britagem da Rocha Fosfática (kJ)	1874,35	0,20
Energia Elétrica 3: Produção de FMP (kJ)	937500,00	98,67
Energia Elétrica 4: Produção de Gás Natural (kJ)	732,75	0,08

(a): os aspectos ambientais apresentados no presente ecovetor foram extraídos da base de dados de TEAM/TM de Ecobilan para a Geração de Energia Elétrica no Brasil (1996). Esta fonte considera que a referida matriz energética obedece a seguinte distribuição de fontes de produção: Coal: 1.64%; Fuel Oil: 3.08%; Natural Gas: 0.25%; Nuclear: 0.84%; Hydro: 91.70%; Free Electricity (=geothermal, solar, biomass and animal products, industrial waste, municipal waste, non-specified assumed being impact free): 2.49%.

(b): a referida estimativa do PCS (28823,60 kJ/kg) foi realizada tomando-se por base valor médio dos PCS's dos seguintes carvões coqueificados: CF-8, CF-11, CF-14, CF-17, CF-20 e RIHR. Referências consultadas: 1) Balanço Energético Nacional 2001. Ministério de Minas e Energia - MME. Secretaria de Energia. Brasília, 2001. ISS 0101-6636. p. 103 e 2) BRASCOOK Comércio Importação e Exportação de Minérios: <http://www.brascook.com.br/estoque.htm> - consultado em 29/04/2003

(c): de acordo com IPT (1985) Apêndice G. Tabela G.9 p. 482, o valor médio do PCS do Gás Natural (kJ/kg) produzido no país será de 49090,00

(d): valor médio de PCS (42252,96 kJ/kg) para amostras de Óleo Combustível referentes às seguintes variedades: BPF, BTE, E, F, H-667 A, H-667 K, G (REVAP) e G (REPLAN). Os valores que compuseram tal resultado foram obtidos junto a IPT (1985), Apêndice G. Tabela G.1 p. 467.

**Anexo A18:** Eco-vetor da unidade de processo de transporte da rocha fosfática para a produção de TSP

SUBSISTEMA - Transporte de Rocha Fosfática para Produção de TSP <sup>(d)</sup>					
Bases de Cálculo	Transporte (base de cálculo)		Transporte de RF		Transporte de RF (sistema) ( /FR sistema)
	(kg matéria)	(kg RF britada)	(kg RF britada)	(kg RF britada.km)	
Quantidade Transportada <sup>(b)</sup>					195,73
Distância (km) <sup>(c)</sup>	1,00	1,00	1,00	1,00	12,40
Fator de Ámese (kg/km)	1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	227,01
ENTRADAS					
Recurso Consumido	Transporte (base de cálculo) ( /1000kg.km)	Transporte de CF (etapa) ( /kg RF britada.km)	Transporte de RF (sistema) ( /FR sistema)		
Concentrado Fosfático gerado na lavra (kg)	-	4,00	195,73		
SAÍDAS					
Produtos	Transporte (base de cálculo) ( /1000kg.km)	Transporte de CF (etapa) ( /kg RF britada.km)	Transporte de RF (sistema) ( /FR sistema)		
Concentrado Fosfático transportado (kg)	1000,00	1,00	195,73		

(a): Dados extraídos de TEAM™ de Ecobilan para Road Transport (Truck 28 t, Diesel Oil, kg.km)

(b): considerando uma eficiência de transporte de concentrado fosfático medida como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 100%

(c): estimou-se em 12,40km a distância a ser percorrida pela rocha fosfática entre a mina e a usina de beneficiamento.

(d): como indicado na base de dados de TEAM™ para essa operação, considerou-se um valor de PCS para o Óleo diesel de (KJ/kg): 42800,00

**Anexo A19: Eco-vetor da unidade de processo de transporte da rocha fosfática para a produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>**

<b>SUBSISTEMA - Transporte de Rocha Fosfática para Produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)<sup>(a)</sup></b>			
Bases de Cálculo	Transporte (base de cálculo)	Transporte de RF	Transporte de RF (sistema)
Quantidade Transportada <sup>(b)</sup>	(kg matéria)	(kg RF britada)	( /FR sistema)
	1000,00	1,00	579,62
Distância (km) <sup>(c)</sup>	1,00	1,00	12,40
Fator de Ajuste (kg.km)	1000,00	1,00	7187,31
<b>ENTRADAS</b>			
Recurso Consumido	Transporte (base de cálculo) (/1000kg.km)	Transporte de CF (etapa) ( /kg RF britada.km)	Transporte de RF (sistema) ( /FR sistema)
Concentrado Fosfático gerado na lava (kg)	-	1,00	579,62
<b>SAÍDAS</b>			
Produtos	Transporte (base de cálculo) (/1000kg.km)	Transporte de CF (etapa) ( /kg RF britada.km)	Transporte de RF (sistema) ( /FR sistema)
Concentrado Fosfático transportado (kg)	1000,00	1,00	579,62
(a): Dados extraídos de TEAM <sup>TM</sup> de Ecobilan Road Transport (Truck 28t, Diesel Oil, kg.km)			
(b): considerando uma eficiencia de transporte de concentrado fosfático medida como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> de 100%;			
(c): estimou-se que a rocha fosfática para a produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> será extraída da mesma mina de onde sai a rocha fosfática para a produção de TSP. Dessa forma, mantém-se em 12.4Km a distância entre a mina e a usina de concentração também para o presente caso.			
(d): como indicado na base de dados de TEAM <sup>TM</sup> para essa operação, considerou-se um valor de PCS para o Óleo diesel de (KJ/kg)			
			42800,00

**Anexo A20: Eco-vetor da unidade de processo de transporte do concentrado fosfático para a produção de TSP**

<b>SUBSISTEMA - Transporte de Concentrado Fosfático para Produção de TSP (a)</b>			
Bases de Cálculo	Transporte (base de cálculo) (kg matéria)	Transporte de CF (etapa) (kg CF transportada)	Transporte de RF (sistema) (/FR sistema)
Quantidade Transportada (kg) (b) (c)	<b>1000,00</b>	<b>1,00</b>	<b>35,80</b>
Distância (km) <sup>(d)</sup>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>775,00</b>
Fator de Ajuste a UF	<b>1000,00</b>	<b>1,00</b>	<b>775,00</b>
<b>ENTRADAS</b>			
Recurso Consumido	Transporte (base de cálculo) (/1000kg.km)	Transporte de CF (etapa) (/kg CF transportado.km)	Transporte de RF (sistema) (/FR sistema)
Concentrado Fosfático gerado no beneficiamento (kg)	-	1,04	375,40
<b>Saídas</b>			
Produtos	Transporte (base de cálculo) (/1000kg.km)	Transporte de CF (etapa) (/kg CF transportado.km)	Transporte de RF (sistema) (/FR sistema)
Concentrado Fosfático transportado (kg)	<b>1000,00</b>	<b>1,00</b>	<b>35,80</b>
Emissões Atmosféricas	Transporte (base de cálculo) (/1000kg.km)	Transporte de CF (etapa) (/kg CF transportado.km)	Transporte de RF (sistema) (/FR sistema)
Material particulado (kg)	<b>4,680E-02</b>	<b>3,627E-02</b>	<b>1,30</b>

(a): Dados extraídos de TEAM<sup>TM</sup> de Ecobilan para Road Transport (Truck 28 t, Diesel Oil, kg.km)

(b): considerando uma eficiência de transporte de concentrado fosfático medida como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 96,5%

(c): optou-se por considerar os 37,50kg como quantidade de CF transportado, muito embora haja variação desse total durante o trajeto em virtude das perdas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> inerentes a essa operação;

(d): estimou-se em 775km a distância média a ser percorrida pelo concentrado fosfático entre a usina de beneficiamento e as unidades de produção de TSP

(e): como indicado na base de dados de TEAM<sup>TM</sup> para essa operação, considerou-se um valor de PCS para o Óleo diesel de **42800,00**

(f): Para efeito de distribuição de cargas ambientais no ecovetor tecnológico, o coeficiente M<sub>1</sub>, que distribui as quantidades de

**Anexo A21: Eco-vetor da unidade de processo transporte do concentrado fosfático para a produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>**

<b>SUBSISTEMA - Transporte de Concentrado Fosfático para Produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (52% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) <sup>(a)</sup> (b)</b>			
Bases de Cálculo	Transporte (base de cálculo)	Transporte de CF (etapa)	Transporte de RF (sistema)
Quantidade Transportada (kg) <sup>(b)</sup> <sup>(c)</sup>	(kg matéria) <b>1000,00</b>	(kg CF transportada) <b>1,00</b>	(/FR sistema) <b>106,03</b>
Distância (km) <sup>(d)</sup>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>775,00</b>
Fator de Ajuste a UF	<b>1000,00</b>	<b>1,00</b>	<b>82172,40</b>
<b>ENTRADAS</b>			
Recurso Consumido	Transporte (base de cálculo) ( /1000kg.km)	Transporte de CF (etapa) ( /kg CF transportado.km)	Transporte de RF (sistema) ( /FR sistema)
Concentrado Fosfático gerado no beneficiamento (kg)	-	<b>1,04</b>	<b>109,87</b>
<b>SAÍDAS</b>			
Produtos	Transporte (base de cálculo) ( /1000kg.km)	Transporte de CF (etapa) ( /kg CF transportado.km)	Transporte de RF (sistema) ( /FR sistema)
Concentrado Fosfático transportado (kg)	<b>1000,00</b>	<b>1,00</b>	<b>106,03</b>
Emissões Atmosféricas	Transporte (base de cálculo) ( /1000kg.km)	Transporte de CF (etapa) ( /kg CF transportado.km)	Transporte de RF (sistema) ( /FR sistema)
Material particulado (kg)	<b>4,680E-02</b>	<b>3,627E-02</b>	<b>3,85</b>

(a): Dados extraídos de TEAM™ de Ecobilan Road Transport (Truck 28t, Diesel Oil, kg.km);

(b): considerando uma eficiência de transporte de concentrado fosfático medida como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 96,5%;

(c): optou-se por considerar os 111,04kg como quantidade de CF transportado, muito embora haja variação desse total durante o trajeto em virtude das perdas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> inerentes a essa operação;

(d): estimou-se em 775km a distância média a ser percorrida pelo concentrado fosfático entre a usina de beneficiamento e as unidades de produção de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>,

(e): como indicado na base de dados de TEAM™ para essa operação, considerou-se um valor de PCS para o Óleo diesel de **(KJ/kg)**

**42800,00**

Anexo A22: Eco-vetor da unidade de processo de transporte da rocha fosfática para a produção de FMP

SUBSISTEMA - Transporte de Rocha Fosfática para Produção de EMP <sup>(a)</sup>			
ENTRADAS		SAÍDAS	
Bases de Cálculo	'Transporte (base de cálculo) (kg matéria)	'Transporte de RI <sup>i</sup> (sistema) ( /t R sistema)	'Transporte de RI <sup>i</sup> (sistema)
Quantidade 'transportada <sup>(b)</sup>	1000,00	1,00	155,44
Distância (km) <sup>(c)</sup>	1,00	1,00	406,00
Fator de Ajuste (kg/km)	1000,00	1,00	63109,55
<b>VALORES FINAIS</b>			
Recurso Consumido	'Transporte (base de cálculo) ( /1000kg.km)	'Transporte de RI <sup>i</sup> (etapa) ( /kg RI <sup>i</sup> lavrada.km)	'Transporte de RI <sup>i</sup> (sistema) ( /t R sistema)
Rocha Fosfática Lavrada (kg)		1,02	158,61
Produtos	'Transporte (base de cálculo) ( /1000kg.km)	'Transporte de RI <sup>i</sup> (etapa) ( /kg RI <sup>i</sup> lavrada.km)	'Transporte de RI <sup>i</sup> (sistema) ( /t R sistema)
Rocha Fosfática Transportada (kg)	1000,00	1,00	155,44
Emissões Atmosféricas	'Transporte (base de cálculo) ( /1000kg.km)	'Transporte de RI <sup>i</sup> (etapa) ( /kg RI <sup>i</sup> lavrada.km)	'Transporte de RI <sup>i</sup> (sistema) ( /t R sistema)
Material particulado (perda por arraste no transp			3,17

(a): Dados extraídos de 'IBAMA' de Ecobilan para Road Transport (Truck 28 t, Diesel Oil, kg/km)

(b): considerando uma eficiência de transporte de concentrado fosfático medida como  $P_2O_5$  de 100%.

(c), estima-se, através do Guia 4 Rodas - 2003 (Ind. Abril) que a distância percorrida entre a mina e a unidade de produção de lMP é de 406 km.

(c) estudos se análese do gênero Thomas (1990) e Caram (1995), que a distância personalizada é

**Anexo A23: Eco-vetor da unidade de processo de transporte de serpentinito para a produção de FMP**

SUBSISTEMA - Transporte de Serpentinito para Produção de FMP <sup>(a)</sup>			
Bases de Cálculo	'Transporte (base de cálculo)	'Transporte de RI' (sistema)	'Transporte de RI' (sistema)
Quantidade Transportada <sup>(b)</sup>	(kg matérias)	(kg RI' britada)	(/UJ; sistema)
1000,00	1000,00	1,00	102,59
Distância (km) <sup>(c)</sup>			211,00
Iatô de Ajuste (kg.km)	1,00	1,00	21646,89
<b>ENTRADAS</b>			
Recurso Consumido	'Transporte (base de cálculo) (/1000kg.km)	'Transporte de CJ' (etapa) (/kg RI' britada.km)	'Transporte de RI' (sistema) (/UJ; sistema)
Serpentinito (kg)			107,99
<b>SAÍDAS</b>			
Produtos	'Transporte (base de cálculo) (/1000kg.km)	'Transporte de CJ' (etapa) (/kg RI' britada.km)	'Transporte de RI' (sistema) (/UJ; sistema)
Serpentinito transportado (kg)	1000,00	1,00	102,59
Límisscos Atmosféricas	'Transporte (base de cálculo) (/1000kg.km)	'Transporte de CJ' (etapa) (/massa total de RI' britada.km)	'Transporte de RI' (sistema) (/UJ; sistema)
Material particulado (perda por arraste no transporte) (g)			5,40
		5,2631,02	
			42800,00

(a): Dados extraídos de 'H2NM<sup>TM</sup>' de Licobilan Road Transport (L'ruck 28k, Diesel Oil, kg.km)

(b): considerando uma eficiência de transporte de concentrado fosfático medida como P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> de 100%;

(c): estimou-se através do Guia 4Rodas - 2003 (Id. Abril), que a distância percorrida pelo serpentinito entre seu local de extração e a unidade de produção de FMP é de 211 km.

(d): como indicado na base de dados de 'H2NM<sup>TM</sup>' para essa operação, considerou-se um valor de PCS para o Óleo díscel de (KJ/kg)

**Anexo A24: Eco-vetor da unidade de processo de transporte do sistema de produto do TSP**

Bases de Cálculo	Transporte (base de cálculo)	Transporte de RI* (sistema)
Quantidade Transportada	(kg matéria) <b>1000,00</b>	( /FR sistema)
Distância (km)	<b>1,00</b>	-
Recurso Consumido	Transporte (base de cálculo)	Transporte total (sistema)
sulfato de bário (BaSO4, recurso natural) (kg)	0,000041	0,0049009211
bauxita (kg)	0,00058	0,0693301028
bentonite (kg)	0,000033	0,0039446438
chumbo (recurso natural) (kg)	0,00019	0,0227115854
cromo (recurso natural) (kg)	0,000019	0,0022711585
ferro (recurso natural) (kg)	0,0029	0,3466505140
calcário (kg)	0,00068	0,0812835688
cobalto (recurso natural) (kg)	2,77E-12	0,0000000003
cobre (recurso natural) (kg)	0,000030	0,0035860398
manganês (recurso natural) (kg)	0,0000060	0,0007172080
molibdênio (recurso natural) (kg)	1,32E-11	0,0000000016
níquel (recurso natural) (kg)	0,000012	0,0014344159
arcila (kg)	0,000073	0,0087260302
prata (recurso natural) (kg)	0,000000021	0,0000025102
sal de rocha (kg)	0,000025	0,0029883665
argila (kg)	0,000017	0,0020320892
água para geração de energia elétrica (kg)	109,00	13029,2779400000
água de processo (kg)	0,72	86,0649552000
zincô (recurso natural) (kg)	0,0000024	0,0002868832
estanho (recurso natural) (kg)	1,17E-08	0,0000013986
metano (kg)	0,000045	0,0053790597
maderira (kg)	0,00052	0,0621580232
petróleo (kg)	0,0091	1,0877654060
Produtos	Transporte (base de cálculo)	Transporte total (sistema)
1000kg de material transportado por 1km	( /1000kg.km) <b>1000,00</b>	( /FR sistema) <b>119534,66</b>
Emissões Atmosféricas	Transporte (base de cálculo)	Transporte total (sistema)
acetaldeído (g)	( /1000kg.km) <b>0,0000073</b>	( /FR sistema) <b>0,0008726030</b>

acetona (g)	0,0000071	0,0008486961
Al (g)	0,000256	0,0306008730
alcanos (g)	0,00019	0,0227115854
alquenos (g)	0,000026	0,0031079012
CxI ly aromaticos (g)	0,0000047	0,0005618129
As (g)	0,000059	0,0070525449
B (g)	0,00014	0,0167348524
Ba (g)	0,0000038	0,0004542317
benzopireno (g)	0,00000028	0,0000334697
Be (g)	0,000000044	0,0000052595
benzaldeido (g)	1,99E-10	0,0000000238
benzeno (g)	0,0018	0,2151623880
Br (g)	0,000017	0,0020320892
butano (g)	0,00063	0,0753068358
buteno (g)	0,0014	0,1673485240
CFC-116 (g)	0,0000063	0,0007530684
Ca (g)	0,00033	0,0394464378
Cd (g)	0,00000758	0,0009060727
CFC-14 (g)	0,000057	0,0068134756
metano (g)	0,086	10,2799807600
cianidas (g)	8,59E-07	0,0001026803
cobalto (g)	0,00000395	0,0004721619
CO (g)	0,084	10,0409114400
CO <sub>2</sub> (g)	25,20	3012,2734320000
Cr (g)	0,0000055	0,0006574406
Cu (g)	0,000029	0,0034665051
HCl/C-21 (g)	0,00039	0,0466185174
ácido acético (g)	0,000034	0,0040641784
ctano (g)	0,00035	0,0418371310
etanol (g)	0,000014	0,0016734852
eteno (g)	0,046	5,4985943600
etilbenzeno (g)	0,000028	0,0033469705
Fe (g)	0,00034	0,0406417844
formaldeido (g)	0,000062	0,0074111489
HALON-1301 (g)	0,0000036	0,0004303248
H <sub>2</sub> S (g)	0,00017	0,0203208922
HCl (g)	0,0030	0,3586039800
heptano (g)	0,00012	0,0143441592
hexano (g)	0,00026	0,0310790116

HBr (g)	0,00040	0,0478138640
Hg (g)	0,0000016	0,0001912555
I (g)	0,0000066	0,0007889288
K (g)	0,00053	0,0633533698
metanol (g)	0,000017	0,0020320892
Mg (g)	0,000096	0,0114753274
Mn (g)	0,00014	0,0167348524
Mo (g)	0,0000015	0,0001793020
N <sub>2</sub> O (g)	0,00065	0,0776975290
Na (g)	0,000084	0,0100409114
amônia (g)	0,00011	0,0131488126
Ni (g)	0,000073	0,0087260302
VOC (exceto metano) (g)	0,082	9,8018421200
NOx (como NO <sub>2</sub> ) (g)	0,058	6,9330102800
P-total (g)	0,0000039	0,0004661852
PAH's (g)	0,000011	0,0013148813
material particulado (PM10) móvel (g)	0,00054	0,0645487164
material particulado de processo (g)	0,031	3,7055744600
material particulado (PM10) estacionário (g)	0,0097	1,1594862020
Pb (g)	0,00064	0,0765021824
pentano (g)	0,00072	0,0860649552
fenol (g)	7,39E-08	0,0000088336
propano (g)	0,0005918	0,0707406118
ácido propiônico (g)	0,0000069	0,0000824789
CFC-11 (g)	7,64E-08	0,0000091324
CFC-114 (g)	0,000002	0,0002390693
CFC-12 (g)	1,64E-08	0,0000019604
CFC-13 (g)	1,03E-08	0,0000012312
HCFC-22 (g)	1,83E-08	0,0000021875
Se (g)	0,000011	0,0013148813
Si (g)	0,00076	0,0908463416
Sn (g)	0,00000029	0,0000346651
SOx (como SO <sub>2</sub> ) (g)	0,18	21,5162388000
Sr (g)	0,0000042	0,0005020456
dioxina (g)	14,70	1757,1595020000
Ti (g)	0,000011	0,0013148813
tolueno (g)	0,000095	0,0113557927
V (g)	0,00020	0,0239069320
xileno (g)	0,0012	0,1434415920

Zn (g)	0,0002	0,0239069320
Zr (g)	3,931E-08	0,0000046977
Efuentes Líquidos	Transporte (base de cálculo) ( /1000kg.km)	Transporte total (sistema) ( /IR sistema)
alcanos (g)	0,000059	0,0070525449
alcenos (g)	0,0000055	0,0006574406
NH <sub>3</sub> (como N) (g)	0,00058	0,0693301028
AOX (g)	0,0000013	0,0001553951
CxI ly aromaticos (g)	0,00027	0,0322743582
benzeno (g)	0,000068	0,0081283569
BOD (g)	0,00046	0,0549859436
1,1,1-tricloroetano (g)	0,00000022	0,0000262976
hexaclorooctano (g)	8,131E-12	0,0000000010
HOCl <sub>x</sub> (g)	0,000040	0,0047813864
OCl <sub>x</sub> (g)	0,000040	0,0047813864
Cl <sup>-</sup> (g)	0,35	41,8371310000
COD (g)	0,0037	0,4422782420
cianidas (g)	0,000014	0,0016734852
DOC (g)	0,000016	0,0019125546
etil benzeno (g)	0,0000012	0,0001434416
óleos e gorduras (g)	0,0090	1,0758119400
VOC (como C <sub>x</sub> ) (g)	0,00016	0,0191255456
I <sup>-</sup> (g)	0,00057	0,0681347562
formaldeídos (g)	0,00000025	0,0000298837
sólidos dissolvidos (g)	0,0040	0,4781386400
Al (g)	0,0097	1,1594862020
As (g)	0,000020	0,0023906932
Ba (g)	0,0019	0,2271158540
Pb (g)	0,00013	0,0155395058
B (g)	0,000019	0,0022711585
Cd (g)	0,00012	0,0143441592
Cs (g)	4,5691E-07	0,0000546154
Ca (g)	0,028	3,3469704800
Cr <sup>3+</sup> (g)	0,00011	0,0131488126
Cr <sup>6+</sup> (g)	0,000000012	0,0000014344
Fe (g)	0,0087	1,0399515420
I (g)	0,000046	0,0054985944
K (g)	0,005	0,5976733000
Co (g)	0,000019	0,0022711585

Cu (g)	0,000069	0,0082478915
Mg (g)	0,0084	1,0040911440
Mn (g)	0,00024	0,0286883184
Mo (g)	0,000030	0,0035860398
Na (g)	0,16	19,1255456000
Ni (g)	0,000053	0,0063353370
Hg (g)	1,756915-07	0,0000210010
Se (g)	0,000049	0,0058571983
Ag (g)	0,0000047	0,0000561813
Si (g)	0,0000061	0,0007291614
Sr (g)	0,0029	0,3466505140
Ti (g)	0,00063	0,0753068358
V (g)	4,9897615-05	0,0059644927
Zn (g)	0,00036	0,0430324776
Sn (g)	5,2215-08	0,0000062397
CxI ly (g)	0,0000019	0,0002271159
nitratos (g)	0,011	1,3148812600
nitritos (g)	0,0000096	0,0011475327
PAH's (g)	0,0000091	0,0010877654
fenois (g)	0,000074	0,0088455648
fosfatos	0,0006	0,0717207960
compostos fosfatados (g)	0,00000026	0,0000310790
sais (g)	0,013	1,5539505800
compostos nitrogenados (g)	0,000094	0,0112362580
sulfatos (g)	0,082	9,8018421200
sulfitos (g)	0,000011	0,0013148813
tolueno (g)	0,000055	0,0065744063
tricileno glicol (g)	0,000016	0,0019125546
sólidos não dissolvidos (g)	0,028	3,3469704800
xileno (g)	0,000049	0,0058571983
Resíduos Sólidos		Transporte (base de cálculo)
		( /1000kg.km)
Al (ind.) (g)	0,00054	0,0645487164
As (ind.) (g)	0,00000022	0,0000262976
C (ind.) (g)	0,0017	0,2032089220
Ca (ind.) (g)	0,0022	0,2629762520
Cd (ind.) (g)	0,00000023	0,0000274930
Co (ind.) (g)	9,08E-09	0,0000010854
Cr (ind.) (g)	0,0000027	0,0003227436

Cu (ind.) (g)	4,5415-08	0,0000054269
Fe (ind.) (g)	0,0011	0,1314881260
Íg (ind.) (g)	1,3915-09	0,0000001662
Mn (ind.) (g)	0,000022	0,0026297625
N (g)	0,00000046	0,0000549859
Ni (ind.) (g)	6,8115-08	0,0000081403
óleo (ind.) (g)	0,00033	0,0394464378
fósforo (ind.) (g)	0,000028	0,0033469705
Pb (ind.) (g)	0,00000023	0,0000274930
S (ind.) (g)	0,00032	0,0382510912
Zn (ind.) (g)	0,0000085	0,0010160446

Anexo A25: Eco-vetor para a unidade de processo de transporte do sistema de produto do FMP

Bases de Cálculo	Transporte (base de cálculo)		Transporte de RI (sistema)	
	(kg matena)	(/1R sistem)	(/1R sistem)	(/1R sistem)
Quantidade Transportada		1000,00	-	-
Distância (km)		1,00	-	-
Recurso Consumido	Transporte (base de cálculo)		Transporte total (sistema)	
	(/100kgkm)	(/1R sistem)	(/1R sistem)	(/1R sistem)
sulfato de bário (BaSO <sub>4</sub> , recurso natural) (kg)	0,000041	0,0034750140		
bauxita (kg)	0,00058	0,0491587352		
bentonite (kg)	0,000033	0,0027969625		
chumbo (recurso natural) (kg)	0,00019	0,0161037236		
cromo (recurso natural) (kg)	0,000019	0,0016103724		
ferro (recurso natural) (kg)	0,0029	0,2457936760		
calcário (kg)	0,00068	0,0576343792		
cobalto (recurso natural) (kg)	2,77E-12	0,0000000002		
cobre (recurso natural) (kg)	0,000031	0,0025426932		
manganês (recurso natural) (kg)	0,00000000	0,0005085386		
molibdénio (recurso natural) (kg)	1,32E-11	0,0000000011		
níquel (recurso natural) (kg)	0,000012	0,0010170773		
artia (kg)	0,000073	0,00061872201		
prata (recurso natural) (kg)	0,000000121	0,0000017799		
sal de rocha (kg)	0,000025	0,0021189110		
argila (kg)	0,000017	0,00014408595		
água para geração de energia elétrica (kg)	109,00	9238,4519600000		
água de processo (kg)	0,72	61,0246368000		
zincos (recurso natural) (kg)	0,0000024	0,00002034155		
estanho (recurso natural) (kg)	1,17E-08	0,0000009917		
metano (kg)	0,000045	0,0038140398		
metanol (kg)	0,00052	0,0440733488		
petróleo (kg)	0,0091	0,7712836040		
Produtos	Transporte (base de cálculo)		Transporte total (sistema)	
	(/100kgkm)	(/1R sistem)	(/1R sistem)	(/1R sistem)
1000kg de material transportado por 1km	1000,00	84756,44		
Emissões Atmosféricas	Transporte (base de cálculo)		Transporte total (sistema)	
	(/100kgkm)	(/1R sistem)	(/1R sistem)	(/1R sistem)
acetaldeído (g)	0,0000073	0,0006187220		

acetone (g)	0,000071	0,000017707
N (g)	0,00256	0,0216976486
alecrim (g)	0,00019	0,0161037236
alcaçuz (g)	0,000026	0,0023036674
C6H <sub>5</sub> aromáticos (g)	0,000047	0,0003983553
As (g)	0,000059	0,0050016300
B (g)	0,00014	0,0118659016
Ba (g)	0,000038	0,0003230745
benzopirano (g)	0,0000028	0,0000237318
Be (g)	0,0000044	0,0000037293
benzaldeído (g)	1,99E-10	0,000000169
benzeno (g)	0,0018	0,1525615920
Br (g)	0,000017	0,0014408595
butano (g)	0,0003	0,05339X5572
buteno (g)	0,0014	0,1186590160
C1C-116 (g)	0,000063	0,0005339X56
Ca (g)	0,00033	0,02790X6252
Cd (g)	0,0000758	0,0006424538
C1C-14 (g)	0,000057	0,0048311171
metano (g)	0,086	7,2890538400
caridão (g)	8,59E-07	0,0000728158
cobalto (g)	0,0000395	0,0003347879
CO (g)	0,084	7,1195409600
CO <sub>2</sub> (g)	25,20	2135,8622880000
Cr (g)	0,000055	0,0004661604
Cu (g)	0,00029	0,0024579368
IUPAC-21 (g)	0,00039	0,030550116
ácido acético (g)	0,000034	0,0028817190
etano (g)	0,00035	0,0296647540
etanol (g)	0,000014	0,0011865902
etero (g)	0,046	3,8987962400
estilbeneno (g)	0,000028	0,0023731803
Fe (g)	0,00034	0,0288171896
formaldeído (g)	0,000062	0,0052548993
I ALCON-1301 (g)	0,000036	0,0003051232
H <sub>2</sub> S (g)	0,00017	0,0144085948
IUPC (g)	0,0030	0,2542693200
heptano (g)	0,00012	0,0101707728
hexano (g)	0,00026	0,0230366744

HF(g)	0,00040	0,0339025760
Hg(g)	0,000016	0,0001356103
I(g)	0,000006	0,0005593925
K(g)	0,00053	0,0449209132
metanol(g)	0,000017	0,0014408595
Mg(g)	0,000096	0,0081366182
Mn(g)	0,00014	0,0118659016
Mo(g)	0,000015	0,0001271347
N <sub>2</sub> O(g)	0,00065	0,0550916860
Na(g)	0,00084	0,0071195410
amônia(g)	0,00011	0,0093233384
Ni(g)	0,000073	0,0061872301
VOC (exeto metano)(g)	0,082	6,9500280800
NOx (como NO <sub>2</sub> )(g)	0,058	4,9158735200
P-total(g)	0,000039	0,0003305501
PAlfs(g)	0,000011	0,0009323208
material particulado (PM10) móvel(g)	0,00054	0,0457684776
material particulado de processo(g)	0,031	2,6274496400
material particulado (PM10) estacionário(g)	0,0097	0,8221374680
Pb(g)	0,00064	0,0542441216
pentano(g)	0,00072	0,0610246368
fenol(g)	7,39E-08	0,0000062635
propano(g)	0,0005918	0,0501588612
ácido propiónico(g)	0,0000069	0,0000584819
CFC-11(g)	7,64E-08	0,0000064754
CFC-114(g)	0,000002	0,0001695129
CFC-12(g)	1,64E-08	0,0000013900
CFC-13(g)	1,03E-08	0,0000008730
HCFC-22(g)	1,83E-08	0,0000015510
Se(g)	0,000011	0,0009323208
Si(g)	0,00076	0,0644148944
Sn(g)	0,0000029	0,0000245794
SOx (como SO <sub>2</sub> )(g)	0,18	15,2561592000
Sr(g)	0,000042	0,0003559770
dioxina(g)	14,70	1245,9196680000
Tl(g)	0,000011	0,0009323208
tolueno(g)	0,000095	0,008518618
V(g)	0,00020	0,0169512890
sileno(g)	0,0012	0,1017077200

	0,0002	0,0169512880
Zn (g)	3,931508	0,0000033309
Xr (g)		
	Transporte (base de cálculo) (/100 kg.km)	Transporte total (sistema) (/tRSistema)
Emisores líquidos		
alcanos (g)	0,00059	0,0050006300
alceros (g)	0,00065	0,004661604
NH <sub>3</sub> (com N) (g)	0,0058	0,0491587352
NOX (g)	0,000013	0,0001101834
Cd y aromáticos (g)	0,0027	0,022842388
benzeno (g)	0,00068	0,0057634379
BOD (g)	0,0046	0,0389879624
1,1,1-tricloroetano (g)	0,0000122	0,0000186464
hexadecano (g)	8,13E-12	0,000000007
1 KCl (g)	0,000040	0,0033902576
CO <sub>2</sub> (g)	0,000040	0,0033902576
tetracloruro (g)	9,66E-10	0,000000819
Cl <sup>-</sup> (g)	0,35	29,664754000
CO <sub>2</sub> D (g)	0,0187	0,3135988280
cianidas (g)	0,000014	0,0011865902
1XXI (g)	0,000016	0,0013561030
etil benzene (g)	0,000012	0,0001017077
óleos e gorduras (g)	0,0090	0,7628079600
VOC (com C) (g)	0,00016	0,0135610304
H <sup>+</sup> (g)	0,00057	0,0483111708
formikácidos (g)	0,0000125	0,0001211891
sólidos disuvidos (g)	0,0040	0,339257600
Al (g)	0,0097	0,8221374680
As (g)	0,00020	0,0016951288
Ba (g)	0,0019	0,1610872360
Pb (g)	0,00013	0,0110183372
B (g)	0,000019	0,0016103724
Cd (g)	0,00012	0,0101707728
Cs (g)	4,569E-07	0,0000387252
Ca (g)	0,028	2,3731803200
Cr <sup>3+</sup> (g)	0,0011	0,0093232084
Cr <sup>6+</sup> (g)	0,00000012	0,0000010171
Hg (g)	0,0087	0,7373810280
I (g)	0,00046	0,0038987962
K (g)	0,005	0,4237823000

<i>Co (g)</i>	0,000019	0,0016103724
<i>Cu (g)</i>	0,000069	0,0058481944
<i>Mg (g)</i>	0,0084	0,7119540960
<i>Mn (g)</i>	0,0024	0,023415456
<i>Mo (g)</i>	0,000030	0,0025426932
<i>Na (g)</i>	0,16	13,5610304000
<i>Ni (g)</i>	0,000053	0,0044923913
<i>Pb (g)</i>	1,756915407	0,0000148909
<i>Sc (g)</i>	0,000049	0,0041530656
<i>Ag (g)</i>	0,0000047	0,0000398355
<i>Si (g)</i>	0,000061	0,005170143
<i>Se (g)</i>	0,0029	0,2457936760
<i>Tl (g)</i>	0,00063	0,033965572
<i>V (g)</i>	4,989761505	0,0042291429
<i>Zn (g)</i>	0,00036	0,0305123184
<i>Sr (g)</i>	5,221508	0,0000044243
<i>Cd ly (g)</i>	0,000019	0,001610372
nitritos (g)	0,011	0,9323208400
nitrosos (g)	0,000096	0,008136618
PAHs (g)	0,000091	0,007712836
fenois (g)	0,000074	0,002719766
fosfatos	0,0006	0,0508538640
compostos fosfatados (g)	0,0000026	0,000220367
sais (g)	0,013	1,1018337200
compostos nitrogenados (g)	0,000094	0,0079671054
sulfatos (g)	0,082	6,9500280800
sulfitos (g)	0,000011	0,0009323208
tolueno (g)	0,000055	0,0046616042
tricloro glicol (g)	0,000016	0,0013561030
solidos não dissolvidos (g)	0,028	2,3731803200
sileno (g)	0,000049	0,0041530656
Resíduos Sólidos		Transporte (base de cálculo)
		( /1000kg.km )
Al (ind) (g)	0,0054	0,0457684776
As (ind) (g)	0,00000122	0,0000186464
C (ind) (g)	0,0017	0,1440859480
Ca (ind) (g)	0,0022	0,1864641680
Cd (ind) (g)	0,0000023	0,0000194940
Co (ind) (g)	9,081509	0,0000007696

Cr (ind) (g)	0.000027	0.0002288424
Cu (ind) (g)	4.541508	0.000038479
Fe (ind) (g)	0.0011	0.0932330840
Fl g (ind) (g)	1.391509	0.000001178
Mn (ind) (g)	0.000022	0.0018646417
N (g)	0.0000046	0.0000389880
Ni (ind) (g)	6.811508	0.000057719
Other (ind) (g)	0.00033	0.027690252
osforn (ind) (g)	0.000028	0.0023731803
Pb (ind) (g)	0.0000023	0.000194940
S (ind) (g)	0.00032	0.0271230008
Zn (ind) (g)	0.000085	0.0007204297

**Anexo A26: Tabela consolidada de aspectos ambientais do sistema de produto de TSP**

INVENTÁRIO CONSOLIDADO - Sistema Produto de Superfosfato Triple (45% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )									
ASPECTOS AMBIENTAIS	ETAPAS	Lavoura de Rocha Fosfática (TSP)	Beneficiamento de Rocha Fosfática (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	Lavoura de Rocha Fosfática (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	Beneficiamento de Rocha Fosfática (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	Produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Produção de TSP	Geração de Gás Natural
		Produção de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Produção de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Geração de Energia Elétrica	Transporte	Total Consolidado			
ENTRADAS (t FR sistema)									
rocha fosfática (como recurso natural) (kg)	2,30E+02	0,00E+00	6,52E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,12E+02
enxofre elemental (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,02E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,02E+01
Aeromóstico (m <sup>3</sup> )	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,68E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,68E+02
sulfato de bário (BaSO <sub>4</sub> , recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,79E-05	2,59E-03	7,51E-03
baritina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,40E-06	8,30E-06	6,93E-02
bertonita (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 4SiO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,69E-06	2,45E-04	3,94E-03
sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> , recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,82E-06	0,00E+00	3,82E-06
cromo (Cr, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,44E-09	4,98E-07	2,27E-03
argila (recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,78E-05	4,84E-04	2,03E-03
cofre (Cu, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,75E-08	2,53E-06	3,59E-03
calcário (não especificado) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,22E-04	0,00E+00	8,13E-02
ferro (Fe, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,32E-04	7,63E-03	3,55E-01
sulfato ferroso (FeSO <sub>4</sub> , recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,65E-06	0,00E+00	3,65E-06
chumbo (Pb, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,44E-09	7,91E-07	2,27E-02
carbonato de cálcio (CaCO <sub>3</sub> , recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,89E-02	3,06E-03	2,19E-02
manganês (Mn, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,00E-09	2,90E-07	7,17E-04
níquel (Ni, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,16E-09	1,68E-07	1,43E-03
petróleo (recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,14E-01	4,55E-03	1,09E+00
areia (recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,38E-05	7,66E-05	8,73E-03



bario (Ba) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,34E-04	2,46E-06	4,54E-04	6,90E-04
benzaldeido (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,26E-12	7,66E-10	2,58E-08	2,46E-08
benzeno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,26E-03	2,56E-02	2,15E-01	2,43E-01
benzopireno (C <sub>16</sub> H <sub>12</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,26E-06	9,57E-07	3,35E-05	3,77E-05
berilio (Be) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,83E-06	1,05E-08	5,26E-06	9,10E-06
boro (B) (g)	0,00E+00	1,85E-03	8,55E-05	1,67E-02						
bromo (Br) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,70E-04	8,23E-06	2,03E-03	2,41E-03
butano (n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,73E-02	5,21E-02	7,53E-02	1,45E-01
buteno (1-C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> CH <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,04E-04	1,74E-05	1,67E-01	1,68E-01
cadmio (Cd) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,46E-04	2,88E-06	9,07E-04	1,06E-03
calcio (Ca) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,69E-03	4,18E-04	3,94E-02	4,20E-02
dioxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,20E-03	4,05E-02	5,04E-03	3,88E-04	3,01E-03
monoxido de carbono (CO) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,31E-01	1,25E+00	1,00E+01	1,16E+01
tetrafluoreto de carbono (CF <sub>4</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,23E-09	6,13E-07	0,00E+00	6,11E-07
CFC-14 (g)	0,00E+00	6,81E-03	6,81E-03							
cloro (Cl <sub>2</sub> ) (g)	0,00E+00	1,00E-08	0,00E+00	1,00E-08						
crumo (Cr <sup>3+</sup> ; Cr <sup>6+</sup> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,15E-04	1,01E-05	6,57E-04	7,83E-04
cobalto (Co) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,50E-04	2,16E-06	0,00E+00	1,52E-04
cobre (Cu) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,43E-04	1,53E-05	3,47E-03	3,72E-03
cianida (CN) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,13E-06	2,02E-06	0,00E+00	7,15E-06
CFC-116 (g)	0,00E+00	7,53E-04	7,53E-04							
CFC-11 (g)	0,00E+00	9,13E-06	9,13E-06							
CFC-114 (g)	0,00E+00	2,39E-04	2,39E-04							
CFC-12 (g)	0,00E+00	1,96E-06	1,96E-06							
CFC-13 (g)	0,00E+00	1,23E-06	1,23E-06							



metano (CH <sub>4</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,44E+00	4,03E+00	1,03E+01	1,88E+01
metanol (CH <sub>3</sub> OH) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,12E-03	8,17E-06	2,03E-03	4,16E-03
molibdenio (Mo) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,74E-05	0,00E+00	1,79E-04	2,5E-04
níquel (Ni) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,88E-03	6,51E-05	8,73E-03	1,17E-02
óxidos de nitrogênio (NOx expresso como NO <sub>2</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,21E+00	1,97E+00	6,93E+00	1,01E+01
óxido nitroso (N <sub>2</sub> O) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,36E-03	7,91E-03	7,77E-02	9,50E-02
materia orgânica (não especificada) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,59E-05	0,00E+00	0,00E+00	3,50E-05
material particulado (não especificado) (g)	3,45E+01	0,00E+00	1,02E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,24E+00	1,10E+01	1,67E+00	9,42E-02	5,16E+03
pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,07E-02	7,71E-02	8,61E-02	1,74E-01
fenol (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,04E-11	5,85E-09	8,83E-06	8,83E-06
fósforo (P) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,72E-04	2,62E-06	4,66E-04	6,41E-04
pentóxido de fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,17E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,17E-07
PAH(*)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,28E-06	6,45E-04	1,31E-03	1,97E-03
potássio (K) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,34E-03	1,33E-03	6,34E-02	6,70E-02
propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,89E-02	5,62E-02	7,07E-02	1,66E-01
propionato de (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHO) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,45E-11	2,10E-09	0,00E+00	2,11E-09
ácido propiónico (CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,87E-08	2,77E-06	8,25E-05	8,53E-05
propileno (CH <sub>2</sub> CHCH <sub>3</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,51E-03	2,53E-05	0,00E+00	1,54E-03
selênio (Se) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,98E-05	2,66E-05	4,57E-06	1,17E-04
silício (Si) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,92E-02	4,85E-04	9,08E-02	1,21E-01
sódio (Na) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,45E-03	3,40E-05	1,00E-02	1,45E-02
estrôncio (Sr) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,81E-04	6,38E-07	5,02E-04	8,84E-04
óxidos de enxofre (SOx expresso como SO <sub>2</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,07E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,18E+00	9,26E-01	2,15E+01	2,64E+02
óxidos de enxofre (SOx expresso como SO <sub>2</sub> ) (g)	0,00E+00	5,07E-00	5,07E-00							
estanho (Sn) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,23E-06	3,47E-05	3,59E-05	3,59E-05

EFLUENTES LÍQUIDOS (I FR sistema)							
alcoóis (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,44E-06
aldeídos (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,77E-08	1,42E-05
alcanos (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,46E-03	7,05E-03
alquenos (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,34E-04	3,33E-05
alumínio (Al3+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,70E-02	0,00E+00	1,34E-03
hidróxido de alumínio (Al(OH)3) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,32E-08	0,00E+00
Amônia (NH4+, NH3, as N) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,83E-03	4,28E-04
AOX (orgânicos halogenados adsoríveis) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,06E-05	1,31E-06
CxHy aromáticos (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,83E-03	2,61E-03
arsénio (As3+, As5+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,15E-06	3,17E-05
bário (Ba2+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,80E-02	2,42E-03
barita (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,23E-03	4,69E-01
benzeno (C6H6) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,46E-03	3,67E-04
DBO (Demanda Biológica de Origem) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,90E-01	0,00E+00	2,75E-04
ácido bórico (H3BO3) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,09E-05	0,00E+00
boro (B3+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,81E-04	4,61E-05
cádmio (Cd2+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,11E-06	2,02E-06
calcio (Ca2+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,67E-01	3,60E-01	1,43E-01



chumbo (Pb2+, Pb4+) (g)	0,00E+00	6,24E-05	2,14E-04	1,55E-02	1,58E-02						
sais de litio (g)	0,00E+00	7,08E-09	0,00E+00	0,00E+00	7,08E-09						
magnésio (Mg2+) (g)	0,00E+00	9,71E-03	1,35E-02	1,00E+00	1,18E-00						
manganês (Mn2+, Mn4+, Mn7+) (g)	0,00E+00	7,78E-04	3,82E-04	2,87E-02	2,98E-02						
mercurio (Hg1+, Hg2+) (g)	0,00E+00	4,69E-08	0,00E+00	2,10E-05	2,10E-05						
metais (não especificado) (g)	0,00E+00	9,91E-06	0,00E+00	0,00E+00	9,91E-06						
cloreto de metila (CH2Cl2) (g)	0,00E+00	1,58E-06	2,29E-04	0,00E+00	2,31E-04						
molibdénio (Mo2+, Mo3+, Mo4+, Mo5+, Mo6+) (g)	0,00E+00	1,07E-05	0,00E+00	3,59E-03	3,60E-03						
morfolina (C4H9NO) (g)	0,00E+00	6,68E-07	0,00E+00	0,00E+00	6,68E-07						
níquel (Ni2+, Ni3+) (g)	0,00E+00	3,59E-05	8,17E-05	6,34E-03	6,45E-03						
nitratos (NO3-) (g)	0,00E+00	1,08E-03	2,92E-04	1,31E+00	1,32E+00						
nitróxidos (NO2-) (g)	0,00E+00	4,11E-08	5,96E-06	1,15E-03	1,15E-03						
material nitrogenado (expresso como N) (g)	0,00E+00	6,25E-03	5,21E-04	1,12E-02	1,80E-02						
óleos (não especificado) (g)	0,00E+00	8,91E-03	6,69E-02	0,00E+00	7,59E-02						
matéria orgânica dissolvida (não especificada) (g)	0,00E+00	5,84E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,84E-06						
ácido oxálico ((COOH)2) (g)	0,00E+00	2,75E-07	0,00E+00	0,00E+00	2,75E-07						
fenol (C6H5OH) (g)	0,00E+00	1,36E-03	3,74E-04	8,35E-03	1,06E-02						
fósforos (PO43-, HPO42-, H2PO4-, H3PO4, expressos c	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,50E-03	1,76E-02	2,34E-06	1,92E-14	7,17E-02	1,6E-02
fósforo (P) (g)	0,00E+00	4,64E-05	9,25E-06	0,00E+00	5,57E-05						
pentóxido de fósforo (P2O5) (g)	0,00E+00	3,48E-06	0,00E+00	0,00E+00	3,48E-06						
PAH(*)	0,00E+00	1,46E-04	3,00E-06	1,09E-03	1,24E-03						
potássio (K+) (g)	0,00E+00	4,94E-02	9,83E-03	5,98E-01	6,57E-01						
rubiúdio (Rb+) (g)	0,00E+00	1,11E-04	0,00E+00	0,00E+00	1,11E-04						
óleos e graxas saponificáveis (g)	0,00E+00	5,45E-02	0,00E+00	1,08E-00	1,13E-00						
sais (não especificado) (g)	0,00E+00	9,02E-03	1,55E-00	1,55E-00	1,56E-00						



	RESÍDUOS SOLUÍDOS ( LIR sistema)									
	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,48E+02	0,00E+00	2,28E-04	3,31E-02	6,45E-02
alumínio (Al) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,32E-05	2,63E-05
arsénico (As) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,96E-05	3,96E-05
cádmio (Cd) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,75E-05	2,75E-05
cálcio (Ca) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,63E-01	3,96E-01
carbono (C) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,03E-01	3,03E-01
chromo (Cr3+, Cr6+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,14E-06	1,65E-04
cobalto (Co) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,09E-06	1,09E-06
cobre (Cu) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,43E-06	5,43E-06
ferro (Fe) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,56E-04	6,60E-02
chumbo (Pb) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,55E-10	1,38E-07
magnésio (Mg) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
manganês (Mn) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,11E-06	1,32E-03
mercurio (Hg) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,61E-12	1,10E-09
níquel (Ni) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,14E-10	4,56E-08
nitrágênio (N) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,18E-07	5,50E-05
óxidos (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,35E-06	1,96E-04
pentóxido de fósforo (P2O5) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
fósforo (P) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,14E-05	1,65E-03
enxofre (S) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,57E-04	1,98E-02
zinc (Zn) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,96E-04	1,02E-03
flúor (F) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,53E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,53E-03
burara de enxofre (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
borra de carvalhalor de V2O5 (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,25E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,25E-03
magnetita (como resíduo sólido) (g)	0,00E+00	2,94E-04	0,00E+00	8,69E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,16E-05
lama (g)	3,09E-04	0,00E+00	9,16E-04	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,22E-05
resíduo não-apagável (g)	0,00E+00	9,84E-04	0,00E+00	2,91E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,90E-05
sulfato de cálcio (CaSO4) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,56E-05	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,56E-05
silica (SiO2) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,59E-03	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,59E-03

(c) hidrocarbonetos aromáticos políciclicos (PAH, não especificados) (g)

**Anexo A27:** Tabela consolidada de valores do sistema de produto de FMP

TABELA CONSOLIDADA DE VALORES - Sistema Produto do Termofosfato Magnesiano Fundido (20% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )						
ETAPAS	Lava de Rocha Fosfática	Britagem de Rocha Fosfática	Produção FMP (20% P2O5)	Geração de Energia Elétrica	Geração de Gás Natural	Total Transporte Consolidado
ASPECTOS AMBIENTAIS						
ENTRADAS (/ FR sistema)						
rocha fosfática (como recurso natural) (kg)	1,67E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
serpentinito (como recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	1,03E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
sulfato de bário (BaSO <sub>4</sub> , recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,85E-04	1,98E-03	3,48E-03
bauxita (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,81E-04	6,35E-06	4,92E-02
bentonita (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .4SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,64E-05	1,88E-04	2,80E-03
sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> , recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,23E-05	0,00E+00	0,00E+00
cromo (Cr, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,41E-08	3,82E-07	1,61E-03
argila (recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,03E-03	3,70E-04	1,44E-03
cobre (Cu, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,77E-07	1,94E-06	2,55E-03
calcário (não especificado) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,13E-02	0,00E+00	5,76E-02
ferro (Fe, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,15E-03	0,00E+00	2,46E-01
sulfato ferroso (FeSO <sub>4</sub> , recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,87E-05	5,84E-03	5,92E-03
chumbo (Pb, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,17E-07	6,06E-07	1,61E-02
carbonato de cálcio (CaCO <sub>3</sub> , recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,07E-01	2,34E-03	0,00E+00
manganês (Mn, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,32E-08	2,22E-07	5,09E-04
níquel (Ni, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,51E-08	1,29E-07	1,02E-03
petróleo (recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,46E+00	3,48E-03	3,23E+00
areia (recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,97E-04	5,86E-05	6,19E-03

	S A I D A S	E M I S S O E S A T M O S F E R I C A S ( / F R sistema)	
prata (Ag, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	1,87E-09
cloreto de sódio (NaCl, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	2,28E-03
zinco (Zn, recurso natural) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	1,39E-05
explosivos (não especificado) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	2,74E-09
aparas de metal (kg)	0,00E+00	0,00E+00	1,41E-08
água (consumo total) (kg)	0,00E+00	0,00E+00	1,77E-05
madeira (kg)	2,27E+01	0,00E+00	8,60E-04
gás natural (KJ)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Eletricidade (KJ)	1,00E+04	1,87E+03	4,54E-01
		9,38E+05	9,30E+03
		0,00E+00	0,00E+00
		7,33E+02	5,69E-02
		0,00E+00	4,41E-02
		9,32E-02	4,89E-04
		0,00E+00	0,00E+00
		9,50E-05	1,79E-06
acetaldeídos ( $\text{CH}_3\text{CHO}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	5,18E-05
ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	5,52E-02
acetona ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	1,34E-02
acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	2,18E-02
aldeídos (não especificado) (g)	0,00E+00	0,00E+00	3,39E-04
alcanos (não especificado) (g)	0,00E+00	0,00E+00	2,45E-01
alcenos (não especificado) (g)	0,00E+00	0,00E+00	2,46E-02
alcinos (não especificado) (g)	0,00E+00	0,00E+00	3,06E-04
alumínio (g)	0,00E+00	0,00E+00	6,28E-07
amônia ( $\text{NH}_3$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	4,20E-01
antimônio (Sb) (g)	0,00E+00	0,00E+00	8,10E-05
AOX (orgânicos halogenados adsoríveis) (g)	0,00E+00	0,00E+00	3,50E-13
CxHy (aromáticos) (g)	0,00E+00	0,00E+00	1,34E-02
arsênico (As) (g)	0,00E+00	0,00E+00	2,04E-03

bártio (Ba) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,03E-03	1,88E-06	3,22E-04	5,36E-03
benzaldeido ( $C_6H_5CHO$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,13E-10	5,86E-10	1,69E-08	1,76E-08
benzeno ( $C_6H_6$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,09E-02	1,96E-02	1,53E-01	2,23E-01
benzopireno ( $C_{20}H_{12}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,03E-05	7,33E-07	2,37E-05	9,47E-05
berflío (Be) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,25E-05	8,06E-09	3,73E-06	8,62E-05
boro (B) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,99E-02	6,55E-05	1,19E-02	5,18E-02
bromo (Br) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,97E-03	6,30E-06	1,44E-03	9,42E-03
butano (n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,84E-01	3,99E-02	5,34E-02	4,77E-01
buteno (1-C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,40E-03	1,33E-05	1,19E-01	1,23E-01
cádmio (Cd) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,16E-03	2,21E-06	6,42E-04	3,80E-03
cálcio (Ca) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,81E-02	3,20E-04	2,80E-02	8,64E-02
díóxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,83E+03	1,22E+05	2,97E+04	1,57E+05
monóxido de carbono (CO) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,14E+00	9,58E-01	7,12E+00	1,52E+01
tetrafluoreto de carbono (CF <sub>4</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,12E-08	4,69E-07	0,00E+00	5,61E-07
CFC-14 (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,83E-03
cloro (Cl <sub>2</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,16E-07	0,00E+00	0,00E+00	2,16E-07
cromo (Cr <sup>3+</sup> ; Cr <sup>6+</sup> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,49E-03	7,72E-06	4,66E-04	2,96E-03
cobalto (Co) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,23E-03	1,65E-06	3,35E-04	3,57E-03
cobre (Cu) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,23E-03	1,17E-05	2,46E-03	7,70E-03
cianida (CN) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,11E-04	1,55E-06	7,28E-05	1,85E-04
CFC-116 (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,34E-04
CFC-11 (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,48E-06
CFC-114 (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,70E-04
CFC-12 (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,39E-06
CFC-13 (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,73E-07

HCFC-21 (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,31E-02
HCFC-22 (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,55E-06
dioxinas (não especificado) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,41E-10	2,19E-11	1,25E+03
etano ( $C_2H_6$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,28E+00	1,44E-01	2,97E-02
etanol ( $C_2H_5OH$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,69E-02	5,72E-06	3,45E+00
etilbenzeno ( $C_8H_{10}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,40E-03	1,32E-05	6,78E-03
etileno ( $C_2H_4$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,04E-01	5,95E-01	2,37E-03
fluoretos (F) (g)	0,00E+00	0,00E+00	1,07E+03	1,61E-06	0,00E+00	3,90E+00
flúor ( $F_2$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,80E-07	0,00E+00	4,80E+00
formaldeído ( $CH_2O$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,45E-02	4,91E-03	5,25E-03
HALON 1301 ( $CF_3Br$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,99E-04	1,32E-06	5,47E-02
heptano ( $C_7H_{16}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,40E-02	6,16E-05	3,05E-04
hexano ( $C_6H_{14}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,78E-02	1,29E-04	5,42E-02
CxHy (exceção $CH_4$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,73E+01	6,47E-01	1,10E-01
CxHy (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,50E-02	0,00E+00	8,05E-04
hidrogénio ( $H_2$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,44E-08	0,00E+00	2,50E-02
ácido clorídrico ( $HCl$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,13E+00	1,24E-03	9,44E-08
ácido fluorídrico ( $HF$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,54E-02	1,76E-04	2,38E+00
gas sulfídico ( $H_2S$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,87E-02	1,88E-02	1,20E-01
iodo (I) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,85E-01	4,24E-04	9,19E-02
Ferro (Fe) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,67E-03	3,07E-06	5,59E-04
chumbo (Pb) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,47E-01	6,06E-05	2,56E-03
magnésio (Mg) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,39E-04	2,73E-04	8,14E-03
manganês (Mn) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,43E-04	9,62E-06	1,31E-02
mercúrio (Hg) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,62E-04	1,36E-04	2,88E-04

metano ( $\text{CH}_4$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,58E+01	3,09E+00	7,29E+00	1,06E+02
metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,58E-02	6,25E-06	1,45E-03	4,72E-02
molibdeno (Mo) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,67E-03	0,00E+00	1,27E-04	1,80E-03
níquel (Ni) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,21E-02	4,98E-05	6,19E-03	6,83E-02
óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ expresso como $\text{NO}_2$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,62E+01	1,51E+00	4,92E+00	3,26E+01
óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,02E-01	6,06E-03	5,51E-02	2,63E-01
matéria orgânica (não especificada) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,73E-04	0,00E+00	0,00E+00	7,73E-04
material particulado (não especificado) (g)	8,35E+00	1,54E+00	0,00E+00	3,61E+01	7,21E-02	1,21E+01	5,81E+01
pentano ( $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,31E-01	5,90E-02	6,10E-02	3,51E-01
fenol ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,71E-10	4,48E-09	6,26E-06	6,27E-06
fósforo (P) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,71E-03	2,01E-06	3,31E-04	4,04E-03
pentóxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,52E-06	0,00E+00	0,00E+00	2,52E-06
PAlI (*)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,35E-04	4,93E-04	9,32E-04	1,56E-03
potássio (K) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,05E-02	1,02E-03	4,49E-02	9,65E-02
propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,39E-01	4,30E-02	5,02E-02	9,32E-01
propionaldeído ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CHO}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,13E-10	1,61E-09	0,00E+00	1,92E-09
ácido propiônico ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,03E-07	2,12E-06	5,85E-05	6,10E-05
propileno ( $\text{CH}_2\text{CHCH}_3$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,26E-02	1,94E-05	0,00E+00	3,26E-02
selênio (Se) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,94E-03	1,73E-05	9,32E-04	2,89E-03
silício (Si) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,29E-01	3,71E-04	6,44E-02	6,94E-01
sódio (Na) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,58E-02	2,60E-05	7,12E-03	1,03E-01
estrôncio (Sr) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,22E-03	4,88E-07	3,56E-04	8,58E-03
óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ expresso como $\text{SO}_2$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,33E+02	7,09E-01	1,53E+01	1,49E+02
estanho (Sn) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,65E-05	0,00E+00	2,46E-05	5,11E-05
titânio (Ti) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,47E-02	1,26E-06	9,32E-04	1,56E-02

EFUENTES LÍQUIDOS (F-R sistema)						
tolueno (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,73E-02	9,83E-03	8,05E-03
vanádio (V) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,47E-01	4,30E-05	1,70E-02
xileno (C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,15E-02	5,67E-05	1,02E-01
zinc (Zn) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,29E-03	1,60E-04	1,70E-02
zircônio (Zr) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,29E-05	0,00E+00	3,33E-06
alcoóis (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,17E-04	0,00E+00	0,00E+00
aldeídos (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,11E-06	1,08E-05	0,00E+00
alcanos (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,14E-02	2,80E-04	5,00E-03
alcenos (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,89E-03	2,55E-05	4,66E-04
alumínio (Al <sup>3+</sup> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	3,76E+01	2,89E-02	1,23E-02	8,22E-01
hidróxido de alumínio (Al(OH) <sub>3</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,36E-06	0,00E+00	0,00E+00
Ammonia (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , NH <sub>3</sub> , as N) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,26E-01	3,28E-04	4,92E-02
AOX (orgânicos halogenados adsorvidos) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,43E-04	1,00E-06	1,10E-04
C <sub>x</sub> Hy aromáticos (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,26E-01	2,00E-03	2,29E-02
arsênico (As <sup>3+</sup> , As <sup>5+</sup> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,33E-04	2,42E-05	1,70E-03
bário (Ba <sup>2+</sup> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,03E-01	1,85E-03	1,61E-01
barita (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,97E-02	3,59E-01	0,00E+00
benzeno (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,14E-02	2,81E-04	5,76E-03
DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,92E-03	1,52E-03	3,90E-02
ácido bórico (H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,74E-03	0,00E+00	0,00E+00
boro (B <sup>3+</sup> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,91E-03	3,53E-05	1,61E-03
cadmio (Cd <sup>2+</sup> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,86E-05	1,54E-06	1,02E-02
cálcio (Ca <sup>2+</sup> ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,76E+00	1,10E-01	2,37E+00
carbonatos (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , CO <sub>2</sub> , expressos como C) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,12E-03	0,00E+00	0,00E+00

césio (Cs2+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,40E-04	0,00E+00	3,87E-05	2,79E-04
clobreios (Cl-) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,45E+02	3,58E-01	2,97E+01	1,75E+02
cloroformio (CHCl3) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,19E-08	6,11E-08	0,00E+00	7,30E-08
cromo (Cr3+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,17E-05	2,66E-04	9,32E-03	9,64E-03
cromo (Cr3+, Cr4+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,40E-04	0,00E+00	0,00E+00	6,40E-04
cromo (Cr6+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,73E-10	4,98E-09	1,02E-06	1,02E-06
cobalto (Co1+, Co2+, Co3+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,19E-06	1,64E-05	1,61E-03	1,63E-03
DQO (Demanda Química de oxigênio) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,09E-01	1,81E-02	3,13E-01	4,40E-01
cobre (Cu1+, Cu2+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,65E-04	5,81E-05	5,85E-03	6,27E-03
cianidas (CN-) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,66E-03	2,52E-05	1,19E-03	4,87E-03
sólidos dissolvidos (não especificado) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,59E+00	4,48E-03	3,39E-01	1,94E+00
cabono orgânico dissolvido (COD) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,92E-03	2,02E-02	1,36E-03	2,55E-02
ácido edético (C10H16N2O8, EDTA) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,97E-06	0,00E+00	0,00E+00	2,97E-06
etilbenzeno (C6H5C2H5) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,78E-03	4,10E-06	1,02E-04	5,88E-03
fluoretos (F-) (g)	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+02	8,00E-03	3,19E-03	4,83E-02	1,00E+02
formaldeído (CH2O) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,51E-10	7,77E-10	2,12E-05	2,12E-05
hexacloroetano (C2Cl6) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,10E-14	1,08E-13	7,00E-09	7,00E-09
hidrazina (N2H4) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,36E-06	0,00E+00	0,00E+00	1,36E-06
CxHy (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,18E-05	0,00E+00	1,61E-04	1,73E-04
hipoclorito (ClO-) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,58E-06	1,84E-05	3,39E-03	3,41E-03
ácido hipocloroso (HClO) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,58E-06	1,84E-05	3,39E-03	3,41E-03
iodo (I-) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,40E-02	1,74E-06	3,90E-03	2,79E-02
ferro (Fe2+, Fe3+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	8,71E+01	5,97E-02	1,19E-02	7,37E-01	8,79E+01
chumbo (Pb2+, Pb4+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,34E-03	1,64E-04	1,10E-02	1,25E-02
sais de lítio (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,53E-07	0,00E+00	0,00E+00	1,53E-07

magnésio ( $Mg^{2+}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,09E-01	1,03E-02	7,12E-01	9,32E-01
manganês ( $Mn^{2+}$ , $Mn^{4+}$ , $Mn^{7+}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,68E-02	2,93E-04	2,03E-02	3,74E-02
mercúrio ( $Hg^{1+}$ , $Hg^{2+}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,01E-06	0,00E+00	1,49E-05	1,59E-05
metais (não especificado) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,14E-04	0,00E+00	0,00E+00	2,14E-04
cloreto de metila ( $CH_2Cl_2$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,40E-05	1,75E-04	0,00E+00	2,09E-04
molybdeno ( $Mo^{2+}$ , $Mo^{3+}$ , $Mo^{4+}$ , $Mo^{5+}$ , $Mo^{6+}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,32E-04	0,00E+00	2,54E-03	2,77E-03
morfolina ( $C_4H_9NO$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,44E-05	0,00E+00	0,00E+00	1,44E-05
níquel ( $Ni^{2+}$ , $Ni^{3+}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,73E-04	6,25E-05	4,49E-03	5,33E-03
nitratos ( $NO_3^-$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,33E-02	2,23E-04	9,32E-01	9,56E-01
nitritos ( $NO_2^-$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,86E-07	4,56E-06	8,14E-04	8,19E-04
material nitrogenado (expresso como N) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,35E-01	3,99E-04	7,97E-03	1,43E-01
óleos (não especificado) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,92E-01	5,12E-02	0,00E+00	2,43E-01
matéria orgânica dissolvida (não especificada) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,26E-04	0,00E+00	0,00E+00	1,26E-04
ácido oxálico ( $(COOH)_2$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	5,93E-06	0,00E+00	0,00E+00	5,93E-06
fenol ( $C_6H_5OH$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,94E-02	2,86E-04	6,27E-03	3,59E-02
fosfatos ( $PO_{43-}$ , $HPO_{42-}$ , $H_2PO_4^-$ , $H_3PO_4$ , expressos co	0,00E+00	0,00E+00	1,14E+02	5,05E-05	1,47E-04	5,09E-02	1,14E+02
fósforo (P) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E-03	7,08E-06	0,00E+00	1,01E-03
pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,50E-05	0,00E+00	2,20E-05	9,71E-05
hidrocarbonetos aromáticos pícicos (PAH, não específico)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,16E-03	2,30E-06	7,71E-04	3,93E-03
potássio ( $K^+$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,40E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,40E-03
rubídio ( $Rb^+$ ) (g)	0,00E+00						
óleos e graxas saponificados (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,63E-01	7,63E-01
sais (não especificado) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,10E+00	1,10E+00
selênio ( $Se^{2+}$ , $Se^{4+}$ , $Se^{6+}$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,15E-04	0,00E+00	4,15E-03	4,37E-03
díóxido de silício ( $SiO_2$ ) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,22E-05	6,30E-05	5,17E-04	5,92E-04

	RESÍDUOS SÓLIDOS ( /FR sistema)					
alumínio (Al) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,92E-03	2,53E-02	4,58E-02
arsênico (As) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,96E-06	1,01E-05	1,86E-05
cadmio (Cd) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,90E-10	4,58E-09	1,95E-05

calcio (Ca) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,96E-02	1,01E-01	1,86E-01	3,07E-01
carbono (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,48E-02	7,59E-02	1,44E-01	2,35E-01
cromo (Cr3+, Cr6+) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,46E-05	1,27E-04	2,29E-04	3,80E-04
cobalto (Co) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,02E-10	4,64E-09	7,70E-07	7,75E-07
cobre (Cu) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,51E-09	2,33E-08	3,85E-06	3,88E-06
ferro (Fe) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,82E-03	5,06E-02	9,32E-02	1,54E-01
chumbo (Pb) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,06E-02	1,06E-07	1,95E-05	2,06E-02
magnésio (Mg) (g)	0,00E+00						
manganês (Mn) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,96E-04	1,01E-03	1,86E-03	3,07E-03
mercurio (Hg) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,64E-10	8,45E-10	1,18E-07	1,19E-07
níquel (Ni) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	6,78E-09	3,49E-08	5,77E-06	5,81E-06
nitrogênio (N) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,70E-08	3,96E-07	3,90E-05	3,95E-05
óleos (não especificados) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,92E-05	1,50E-04	2,80E-02	2,81E-02
pentóxido de fósforo (P2O5) (g)	0,00E+00						
fósforo (P) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,46E-04	1,27E-03	2,37E-03	3,88E-03
enxofre (S) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,95E-03	1,52E-02	2,71E-02	4,52E-02
zinc (Zn) (g)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,39E-05	3,80E-04	7,20E-04	1,17E-03

(\*) hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH, não especificados) (g)

## XI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040 – Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura:** ABNT. Rio de Janeiro, 2001.

AEA Technology.: **User Manual and Software for Hysys Plant.** Release 2. AEA, Calgari. 1997. 94p.

ANDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS. **Plano Nacional de Fertilizantes.** São Paulo.1987. 235p.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes.** São Paulo, ANDA, 1993. 153 p.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes.** São Paulo, ANDA, 1997. 148 p.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes.** São Paulo, ANDA, 2002. 158 p.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes.** São Paulo, ANDA, 2003. 158 p.

ANDO, J.: **Structure and solubility of fused magnesium phosphate.** In: ANNUAL SEMINAR OF NIPPON KAGAKU KAI, 14., Tokyo, 1961.

ANDO, J.: **Studies on fused calcium magnesium phosphate fertilizer.** Department of Industrial Chemistry Faculty of Engineering – Chuo University. Tokyo, 1958. 30p.

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

BECKER, H.J., GOSELE, W., NETH, N. &ADLKOFER, J. **Chemical Ingeneering Technology.** 51 (8). 1979. pp.789-795

BECKER, P. : **Phosphates and phosphoric acid.** Marcel Dekker. New York, 1983, 585p.

BOUSTEAD I.: **Eco-profiles of the European plastics industry – Report 3: polyethylene and polypropylene.** European Centre for Plastics in the Environment (PWMI) (1993), Brussels.

BRASIL - Secretaria de Energia. **Balanço Energético Nacional – 1996.** Brasilia: Ministério de Minas e Energia, 1996. 146p. ISS 0101-6636.

BRASIL - Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária - Divisão de Corretivos e Fertilizantes. **Inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes e biofertilizantes, destinados á agricultura - Legislação.** Brasília: Ministério da Agricultura, 1983. 86p.

BROWN, M.L. : The Lurgui double contact sulfuric acid process. **Proceedings.** Fertilizer Institute Environmental Symposium. New Orleans. 1976. pp.471-486.

BRUNN, H., KIPPELEN, C., SPENGLER, T. und RENTZ, O.: **Luftemission der Prozeßkette: Vergipsung gebrauchter Schwefelsäure.** Chemie Ingenieur Technik. 67. VCH Verlagsgesellschaft, D-69469. Wein-hein. 1995. pp. 1634-1648.

BRUNO, M.: Caracterização básica e tecnológica de rochas fosfatadas. **In: IPT, Tecnologia de fertilizantes fosfatados.** São Paulo. IPT/CEFER. 1980. Cap. 3. p. 53-74. (Publicações Especiais 9).

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).

CASTELLS F., AELION V., ABELIOTIS K.G., PETRIDES D.P.: An Algorithm for Life Cycle Inventory. AICHE Symposium Series on Pollution Prevention via Process and Product Modifications 90 (303), 1995. p. 151-160.

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

CENTRE OF ENVIRONMENTAL SCIENCE – CML. **Life Cycle Assessment. An operational Guide to ISO Standards,** version 2.02. Leiden University, the Netherlands. 2001.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – **Nota Técnica sobre tecnologia de controle em indústrias de fertilizantes.** NT-23. 2300/C338n(RCET)/016451, São Paulo, 2001. 29p.

CHRISTIANSEN, K. Life Cycle Assessment in a Historical Perspective. In. *Anais.* 1º Workshop Internacional sobre Análise do Ciclo de Vida, Rio de Janeiro, 1996.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento: Estimativa da Produção de Grãos 2002/2003 - [www.conab.gov.br/safras](http://www.conab.gov.br/safras) - consultado em 17/01/2003

CONNOCK, L. **What's new for sulphuric acid service?** Sulfur n. 249. 1997. pp. 53-55.

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.

COUTINHO, L.G., FERRAZ, J.C., SANTOS, A. e VEIGA, P.M. (coordenadores) **Estudo da competitividade da industria brasileira: Competitividade da Indústria de Fertilizantes.** Nota técnica setorial do complexo químico. Fundação Economia de Campinas (FECAMP).Campinas. 1993. pp. 41-47.

CURRAN, M.A.(coordinator) **Environmental Life Cycle Assessment.** McGraw Hill, New York, 1996.

DALO, D. & VILANI, E.C. **Manuseio de catalisadores.** In. *Encontro técnico Ácido Sulfúrico.* São Paulo. PTROFERTIL/ABIQUIM. 1984. V.1. p.127.

EFMA – European Fertilizer Manufactures Association - **Production of sulphuric acid.** n. 3. 2000a. 64p.

EFMA – European Fertilizer Manufactures Association **Production of phosphoric acid.** n. 4. 1995. 42p.

EFMA – European Fertilizer Manufactures Association **Production of phosphoric acid.** n. 4. 2000b. 44p.

FAO – Food and Agriculture Association. **The state of food and agriculture, 2003.** FAO Agriculture Series. n. 34. 2003. ISBN – 9251047626. 252p.

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, Vermont, 1991. 134 p.

**FERREIRA, C.R.T. Fertilizantes: mercado aquecido no primeiro trimestre de 2002.** Instituto Econômico Agrícola - Análises de Mercado.  
<http://www.iea.sp.gov.br/ana-fert0401.htm> - consultado em 07/02/2003

**FERREIRA, N.L.: Produção Integrada de Termofosfatos.**  
Documento de Qualificação apresentado a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química. São Paulo. 1999.

**FERREIRA, N.L.: Produção integrada de termofosfatos.** São Paulo, 2001. 131 p.  
Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Food and Agriculture Organization – FAO – Agriculture Data: Agricultural Production - <http://apps.fao.org/page/collections?subset=agriculture> - consultado em 07/01/03

FRISCHKNECHT R., BOLLENS U., BOSSHART S., CIOT M., CISERI L., DOKA G., HISCHIER R., MARTIN A., DONES R., GANTNER U.: **Ökoinventare von Energiesystemen - Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz.** 3<sup>rd</sup> Edition. ETH Zürich: Gruppe Energie-Stoffe-Umwelt 1996 PSI Villigen: Sektion Ganzheitliche Systemanalysen.

GATES,L.E., MORTON, J.R. and FONDY, P.L.: **Selecting agitator systems to suspended solids in liquids.** *Chem. Eng.*, May-24. 1976.

**GAZETA MERCANTIL - Importação de matéria-prima para adubo será menor.**  
Edição de 27/06/2001. Seção de AGRIBUSINESS. p. B-16.

GREMILLION, L.R. & McCLELLAN, G.H. **Evaluation of phosphatic raw materials.** In.: KHASAWNEH, F.C.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J. (eds). *The Role of Phosphorus in Agriculture*. Madison. American Society of Agronomy Inc. cap.5. p. 121-44. 1980. ISBN 0891180621

GUARDANI, R. : Termofosfato magnesiano fundido: novos desenvolvimentos na tecnologia de produção. *Fertilizantes*, 9 (1). 1987, p. 9-13.

GUARDANI, R. **Estudo do efeito da composição química, temperatura de processamento e velocidade de solidificação sobre a estrutura e solubilidade do termofosfato magnesiano fundido.** São Paulo, 1982. 79 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

GUARDANI, R.: **Curso de tecnologia de fertilizantes fosfatados**, IPT, São Paulo, 1979, Notas de aula.

GUARDANI, R.: **Estudo sobre a produção de fertilizantes fosfatados por processos eletroquímicos – teste de fusão.** Centro de Estudos de Fertilizantes – CEFER/IPT. Relatório Técnico. Nº 18469/83, São Paulo, 1983, 86p.

GUARDANI, R.: **Produção de termofosfatos a partir de rochas fosfáticas brasileiras.** Centro de Estudos de Fertilizantes – CEFER/IPT. Relatório Técnico. São Paulo, 1981, 17p.

GUIA 4Rodas Brasil. Edição 2003. Editora Abril S.A. São Paulo, 2003.722p.

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

HERRERA, I.O., KULAY, L., JIMÉNEZ, L. and SCHUHMACHER, M. **Environmental damage assessment applied to process analysis. A decision support alternative.** 2<sup>nd</sup> Biennal Meeting of International Environmental Modelling and Software Society – iEMSSs. Lugano, 24 – 27, June. 2002a. pp. 13-18.

HERRERA, I.O., KULAY, L., SCHUHMACHER, M. and CASTELLS, F.: **Risk assessment, the next step after life cycle impact assessment in the environmental analysis.** 12<sup>th</sup> Annual Meeting of SETAC – Europe. Vienna, 12 – 16 May, 2002b

HERRERA, I.O., SCHUHMACHER, M., JIMÉNEZ, L., and CASTELLS.: **Environmental assessment integrated with process simulation for process design.** 2<sup>nd</sup> Biennal Meeting of International Environmental Modelling and Software Society – iEMSSs. Lugano, 24 – 27, June. 2002. pp. 19-24.

HEIJUNGS, R. ed. **Environmental life cycle assessment of products, Guide,** CML. Leiden, The Netherlands, NOH report 9266, 1992

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

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

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Produção Física da Agroindústria em 2002 - [www.ibge.gov.br/indicadores/industria/Producao\\_Fisica\\_Agroindustria](http://www.ibge.gov.br/indicadores/industria/Producao_Fisica_Agroindustria) - consultado em 07/01/03.

INDI – Instituto de Desenvolvimento Industrial de Minas Gerais **Custos de Insumos Industriais em Minas Gerais**. Relatório Técnico INDI/PR/ET/003/EP, Belo Horizonte, 2002, 19p. <http://www.indi.mg.gov.br/perfil/cii.pdf> - consultado em 15/05/2003

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – 2002  
[www.iso.org](http://www.iso.org) -consultado em 15/03/2003

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.  
**Environmental Management – Life Cycle Assessment – Life cycle impact assessment:** ISO 14042. Genéve, 2000.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.  
**Environmental Management– Life Cycle Assessment – Life cycle interpretation,** ISO 14043. Genéve. 2000b.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.  
**Environmental management – Life cycle assessment – Examples of application of ISO 14042 / Management environmental:** ISO 14047, Draft Technical Report. Genéve, 2000c

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.  
**Environmental manegement– Life Cycle assessment–Principles and framework:** ISO 14040. Genéve. 1997.

ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.  
**Environmental management, life cycle assessment, goal and scoping definition and inventory analysis:** ISO 14041. Genéve, 1998.

JASINSKI, S.M. **Marketable Phosphate Rock—Crop Year 2002.** Mineral Industry Surveys. United. States Geological Survey - USGS.  
<http://minerals.usgs.gov/minerals> Consultado em 24/02/2003

JENSEN, A. A. (coord.): **Life-Cycle Assessment (LCA): A guide to approaches, experiences and information sources**, Report to the European Environmental Agency, Copenhague, 1997

KABE, Y.H.O. and SILVA, G.A.: **A review on phosphogypsum as a source of sulfur**, 2003. (Não Publicado).

KAGEYAMA , A. & SILVA, J.C.. **A dinâmica da agricultura brasileira; do complexo rural aos complexos agroindustriais.** 1987. Campinas. UNICAMP. 101p. (relatório preliminar).

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. - **Eficácia de fosfatos naturais em sistemas de cultivo.** Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Boletim Técnico N.<sup>o</sup> 3. Santa Maria. 1997. 31pp.

KETZIEN, G.T. Modern Sulfuric Acid Practice. **Proceedings.** Fertilizer Society. London, 1974. n.<sup>o</sup> 140.

KOULOHERIS, A.P.: Chemical nature of phosphogypsum as produced by various wet phosphoric acid processes. In: The International Symposium on Phosphogypsum, Florida, 1980. **Proceedings.** Ed. David P. Borries, USA, 1980, p. 8 – 35.

KULAY, L.A.: **Desenvolvimento de modelo de análise de ciclo de vida adequado às condições brasileiras :aplicação ao caso do superfosfato simples.** São Paulo, 2000. 143 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

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.

LEHR, J.R. **Phosphate Raw Materials and Fertilizers.** In: KHASAWNEH, F.C.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J. (eds). The Role of Phosphorus in Agriculture. Madison. American Society of Agronomy. Inc. cap.4. p. 81-120. 1980. ISBN 0891180621

LIMA, N. e SILVA, G.A. : Termofosfatos: Uma opção de fabricação de fertilizantes fosfatados. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, 3 (2).São Paulo, 1979.p.6 – 9.

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

LOPES, A. S. (coordenador). **Manual Internacional de Fertilização de Solos.** Piracicaba. Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1998. 177p.

MALAVOLTA, E.. **Elementos de Nutrição Mineral de Plantas.** São Paulo. Editora Agronômica Ceres, 1980.251p.

MALAVOLTA, E.. **Manual de Química Agrícola; nutrição de plantas e fertilidade do solo.** São Paulo. Editora Agronômica Ceres, 1968. 640p.  
MANN, R., GARDNER, I.J. and MORRIS, C.. **Chemical Engineering** . 4. 1980. p 185-192.

MEADOWS, D.H. et al.: **Limites do crescimento**, Ed. Perspectiva, São Paulo, 1973.

MEINHOLD, T.F., LLOYD Jr, G.M. and BEACH, W.H.: **Chemical Process**, 29 (5). Chicago, 1966, p.70 – 76.

MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária a do Abastecimento  
[www.agricultura.gov.br/spa/pagespa/index.htm](http://www.agricultura.gov.br/spa/pagespa/index.htm) - consultado em 06/01/2003

MOLDOVAN, I., POPOVICI, N. and CHIVU, G.: The technology of mineral fertilizer. The British Sulphur Corporation Limited, London, 1969, p. 289.

MUELER, G.. **Censos agropecuários. Agranalysis**. 1987. Vol. 1. pp.8-21.

MÜLLER, H. Sulfuric Acid and Sulfur Trioxide .

*In:* ULMANN'S ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY, Weinhein, Graphischer Betrieb Konrad Triltsch, 5th edition. 1994. p. 644-647. (volume A 25).

NARAYANASWAMY,C.V., SATHYANARAYANA, P. and RAMACHANDRAN, K. **Chemical Age of India**. 29 (10) 1978. p. 811-817.

PACQUIEZ, P.: **Evolution de la fabrication de l'acide sulfurique pendant les trente dernières années**. Industrial Chimique. 41 (445). 1954. pp.226 – 240

PERRY, R.H. and CHILTON, C.H. **Chemical Engineer's Handbook**. 5<sup>th</sup> Ed. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. London, 1973, Table 3-176, p.3-126.

RAIJ, B. VAN. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba. Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 1981. 142p.

RIBEIRO, F.M.: **Inventário do ciclo de vida da usina de Itaipú – Uma primeira aproximação para a geração hidrelétrica no Brasil**. Documento de Qualificação apresentado ao Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Energia. São Paulo. 2003. p. 30 – 3.

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

SANDER, U.H.F. **Waste Heat Recovery in Sulfuric Acid Plants**. Chemical Engineering Progress 73 (3). 1977. pp. 61-64.

SANDER, U.H.F., FISCHER, H., ROTHE, U., and KOLA, R.. **Sulphur, sulphur dioxide and sulphuric acid.** British Sulphur Corporation Ltd. London. 1984. p. 256-391.

SENDLEIN, L.V.A. ed. **Surfaco mining enviromental monitoring and eclamation handbook.** New York, Elsevier, 1983.

SILVA JÚNIOR, A.F.: Rochas fosfáticas brasileiras. In.: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Tecnologias de fertilizanets fosfatados.** São Paulo, p. 31-52. (IPT – Publicações, 1167 – série Publicações Especiais, 9). 1980

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

SILVA, G.A. **Análise de Ciclo de Vida.** [Apresentado à Disciplina AQ –12: Análise de Ciclo de Vida de Processos Industrias. Módulo de Gestão e Tecnologias Ambientais – Programa de Educação Continuada em Engenharia – PECE. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001 – Apostila]

SILVA, G.A. Disciplina AQ –12: Análise de Ciclo de Vida de Processos Industrias. Módulo de Gestão e Tecnologias Ambientais – Programa de Educação Continuada em Engenharia – PECE. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2002 [notas de aula]

SILVA, G.A. e LIMA NETO, N.: **Estudo do tratamento hidrotérmico do fosfato de Catalão (Goiás- BR).** 31<sup>a</sup> Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência – SBPC, Fortaleza, 1979.

SILVA, G.A.: **Aspectos técnicos e econômicos da utilização do fosfato nacional na fabricação de fosfatos solúveis – Termofosfatos.** I Encontro Nacional de Rocha Fosfática. Instituto Brasileiro do Fosforo, IBRAFOS, Brasília, 1979. p. 1-6

SILVA, G.A.: **Relatório de Visita à Fertilizantes Mitsui S.A..** Centro de Estudos de Fertilizantes – CEFER/IPT. São Paulo, 1979, 11p.

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.

SimaPro 5 software versão 5.1.0.21. **Database Manual ETH-ESU, 1996.**  
©PRéConsultants, Amersfoort, Netherlands, 2002.

SLACK, A.V. : **Phosphoric acid.** Marcel Dekker. v.1. part 1. New York, 1968, 503p.

SONNEMAN, G.: **Environmental damage estimations in industrial process chains – Methodology development with case study on waste incineration and special focus on human health.** Tarragona 2002. 332p. Tese (Doutorado) – Universitat Rovira i Virgili – Espanha.

SOUZA, A.E. **Sumário Mineral 2002.** Departamento Nacional de Produção Mineral - SC. Ministério de Minas e Energia:  
[http://www.dnpm.gov.br/suma2002/FOSFATO\\_revisado.doc](http://www.dnpm.gov.br/suma2002/FOSFATO_revisado.doc) - consultado em 07/02/2003

STERN, S.: **The use of calcined rock in phosphate processing.** International Superphosphate Manufactures Association Technical Conference, Edinburg. September, 1965.

SYNDICAT NATIONAL DES INDUSTRIES DU PLÂTRE, Le Plâtre, Paris, Eyrolles, 1982. 364 p.

TEIXEIRA, P.C. **Sumário Mineral 2002.** Departamento Nacional de Produção Mineral - DF. Ministério de Minas e Energia:  
[http://www.dnpm.gov.br/suma2002/ENXOFRE\\_revisado.doc](http://www.dnpm.gov.br/suma2002/ENXOFRE_revisado.doc) - consultado em 07/02/2003

TILLMAN, A.M. & BAUMANN, H. **General Description of Life Cycle Assessment Methodology.** Chalmers University of Technology, 1995.

Tool for Environmental Analysis and Management – TEAM<sup>TM</sup>, version 3.0. **User Guide Manual.** Ecobilan Group. Paris, 1998.

TRAINA, F. Sulphuric acid catalyst fundamental and kinetic aspects adiabatic reactor optimization. In. *Encontro técnico Ácido Sulfúrico.* São Paulo. PETROFERTIL/ABIQUIM. 1984. V.2. p.175.

**TVA Superfosfate: Its History, Chemistry and Manufacture.** 1964. Prepared by U.S. Department of Agriculture and Tennessee Valley Authority – p. 105 – 106.  
**UNIDO-UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION Fertilizer manual.** 2. ed. New York, United Nations, 1980. (Development and Transfer of Technology, v. 13).

UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Life-Cycle assessment. **Selected topics in environmental management.** Jakarta, UNESCO, 1995. Cap. 4, p.1-35. (UNESCO Series of Learning Materials in Engineering Sciences) [Apresentado ao Multimedia Postgraduate Course in Environmental Engeneering, 1995.]

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

WENZEL, H., HAUSCHILD, M., ALTING,L. **Environmental Assessment of Products – Methodology, tools and case studies in product development.** Kluwer Academic Press, V.1. Copenague, 1997. 543p.

YASUDA, M. & SOUZA, E.C.A.: **Uso agronômico do termofosfato no Brasil.** Manual Técnico. <http://www.fertimitsui.com.br/cinza/index.htm> - consultado em 19/05/2003

ZANARDO, A. (coordenador) **Enciclopédia Multimídia de Dados.** Departamento de Petrologia e Metalogenia Universidade Estadual de São Paulo - UNESP. 2000. <http://www.rc.unesp.br/museudpm> - consultado em 27/02/2003.