HENRIQUE MIGUEL MARTINHO

**Avaliação da Efetividade de Arranjos Tecnológicos e Processuais
na Melhoria do Desempenho Ambiental da Produção de Fosfato
Bicálcico**

São Paulo

2014

HENRIQUE MIGUEL MARTINHO

**Avaliação da Efetividade de Arranjos Tecnológicos e Processuais
na Melhoria do Desempenho Ambiental da Produção de Fosfato
Bicálcico**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como requisito necessário para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia

São Paulo

2014

HENRIQUE MIGUEL MARTINHO

**Avaliação da Efetividade de Arranjos Tecnológicos e Processuais
na Melhoria do Desempenho Ambiental da Produção de Fosfato
Bicálcico**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como requisito necessário para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientador:
Prof. Dr. Luiz Alexandre Kulay

São Paulo

2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Martinho, Henrique Miguel

Avaliação da efetividade de arranjos tecnológicos e processuais na melhoria do desempenho ambiental da produção de fosfato bicálcico / H.M. Martinho. -- São Paulo, 2014.

156 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Ciclo de vida (Avaliação) 2.Fosfato bicálcico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, irmã e namorada,
por todo o carinho, apoio e incentivo
ao longo desta longa jornada.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Valter e Sonia, e minha irmã, Clarissa, pelo carinho, apoio e incentivo. Agradeço por cada final de semana juntos, sempre encerrados pela dolorosa separação aos domingos. A saudade e o amor por vocês são eternos.

A minha querida Madalena, pela amizade, amor e entrega. Certamente a melhor cachorra que alguém poderia querer.

A minha namorada, Chalyta, pelo companheirismo, dedicação e amor. Por me dar força e incentivo quando nem eu mais imaginava ser possível. Por entender meus sonhos e compartilhá-los, e viver minhas conquistas ao meu lado.

Ao Prof. Dr. Luiz Alexandre Kulay, acima de tudo um grande amigo. Uma pessoa maravilhosa que sempre acreditou em mim e na superação aos desafios que este projeto proporcionou. Um homem de grande coração e um tutor por natureza. Obrigado pelo aprendizado.

A todos os amigos do GP2, em especial ao Alex, ao qual agradeço pelo apoio e incentivo nos momentos necessários. Grandes histórias no LCM 2013. Você é uma grande pessoa e tem um futuro primoroso.

Aos meus irmãos de coração Ricardo, Rafael, Franco Neto, José Augusto e André, pela convivência, amizade e incentivo de sempre.

A todos os colegas da Vale Fertilizantes em Cajati que tanto me auxiliaram e torceram por mim, sobretudo àqueles que por tantas vezes cobriram minha ausência de forma magnífica, a equipe de meio ambiente. Luiz Francisco, Ricardo, Jamilson, Raphael e Gabriela, obrigado pela força, apoio e carinho. Essa conquista também é de vocês.

"Há pessoas que transformam o sol numa simples mancha amarela, mas há também aquelas que fazem de uma simples mancha amarela o próprio sol."
(Pablo Picasso)

"O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário."
(Albert Einstein)

RESUMO

Ativo essencial na composição de produtos de nutrição, o fosfato bicálcico é aplicado como fonte de fósforo e cálcio em rações animais, sais minerais, e outros bens regularmente consumidos no segmento pecuário. Mesmo com uma contribuição importante para o sector agrícola nacional, a obtenção de fosfato bicálcico proporciona impactos significativos ao meio ambiente. Isso ocorre não apenas pelo consumo inexorável de rocha fosfática – recursos naturais considerados como reserva estratégica de uma nação –, mas também, por causa das demandas de água, de aditivos e de outros agentes de processo. Além disso, destacam-se nesse mesmo recorte a geração de resíduos sólidos e emissões para a água e para o ar, geradas em virtude da abordagem tecnológica praticado neste processamento.

Este estudo faz uma avaliação do desempenho ambiental da produção de fosfato bicálcico como esta é praticada no Complexo Minerquímico de Cajati -SP, sob a perspectiva de propor ações de melhoria ao mesmo processamento. A fim de levar a cabo a contagem do presente desenvolvimento a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) a técnica foi utilizada para determinar em termos quantitativos, a magnitude das interações entre os sistemas antrópicos e o ambiente.

Os resultados da primeira etapa do projeto mostraram que a importação de enxofre, a produção de ácido fosfórico e o consumo de energia elétrica foram os estágios com o maior potencial de impactos ambientais. O diagnóstico fornecido por esta iniciativa permitiu que arranjos tecnológicos concebidos sob o enfoque ambiental fossem então modelados. Nesses termos, foram propostas melhorias quanto a logística do transporte de enxofre, o consumo de água no complexo industrial, e a aquisição de energia elétrica junto à concessionária.

O estudo conclui que, se a importação de enxofre fosse realizada a partir de diferentes fornecedores, mas desconsiderando a Rússia – o mais importante destes na condição atual – o desempenho ambiental do processo seria afetado positivamente. Quanto ao consumo de água, a implementação de ações de reciclagem trouxe ganhos em termos de esgotamento do recurso, de Eutrofização e de Toxicidades em Água doce e Terrestre. Ainda que estes resultados fossem previsíveis, as magnitudes das reduções foram expressivas. No entanto, o uso de cal virgem para neutralização do efluente na nova Estação de Tratamento (ETEL) aumentou significativamente os impactos como Mudanças Climáticas. Por fim, a alternativa de fornecimento de energia elétrica por cogeração de biomassa será ambientalmente eficaz se acaso esta puder proporcionar de maneira simultânea uma redução da demanda de energia térmica decorrente de combustíveis fósseis.

ABSTRACT

Essential asset in the composition of nutrition products, the dicalcium phosphate is applied as a source of phosphorus and calcium in animal rations, minerals salts and other regularity consumed goods in the livestock sector. Even with an important contribution to the national agricultural sector, the obtaining of dicalcium phosphate provides significant impacts to the environment. This occurs not only by the inexorable consumption of phosphate rock – natural resources considered as strategic reserve of a nation – but also, because of the demand for water, additives and other agents used in the process. Moreover, still regarding environmental effects, must be highlighted the solid waste generation and the emissions for water and to the air released by virtue of the technological approach usually practiced in this processing.

This study makes an evaluation of the environmental performance of dicalcium phosphate production as it is practiced in the Complexo Mineraloquímico of Cajati-SP, under the perspective to propose improvement actions. In order to carry out the development Life Cycle Analysis (LCA) technique was employed in order to determine, in a quantitative way, the magnitude of the interactions between the anthropic systems and its surroundings.

The results of the first step of the project showed that sulfur import, phosphoric acid production and consumption of electric energy were the stages with the most significant environmental impacts. The diagnosis allowed that technological arrangements conceived under the environmental perspective were modeled. Therefore there were proposed improvements concerning the logistic of Sulphur transportation, water consumption in the industrial complex, and to the electricity acquired from the concessionaire.

The study concludes that if the sulphur importation were shared among different suppliers, without considering Russia – the most important of them nowadays –, the environmental performance of the process would be positively affected. Regarding water consumption, the implementation of recycling actions brought gains in terms of water depletion, Eutrophication and both Freshwater and Terrestrial Ecotoxicity. Event that these results could be previously predicted the magnitudes of the decreases were expressive. However, the use of quicklime to neutralize the effluent in the wastewater treatment increased significantly the impacts as Climate Changes. The alternative of energy supplying electricity by cogeneration of biomass will be environmentally effective if it can provide, simultaneously reduction of thermal energy demand from fossil fuels.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1. Introdução	1
2. Objetivos	5
3. Revisão Bibliográfica	6
3.1. Caracterização do Fosfato Bicálcico	6
3.1.1. <i>Fosfato Bicálcico: características, propriedades, usos e aplicações</i>	6
3.1.2. <i>Mercado de Fosfato Bicálcico</i>	9
3.2. Breve descrição de processos	12
3.2.1. <i>Histórico do Complexo Minerquímico</i>	12
3.2.2. <i>Lavra e britagem de minério</i>	15
3.2.3. <i>Usina de beneficiamento mineral</i>	16
3.2.4. <i>Produção de ácido sulfúrico</i>	19
3.2.5. <i>Produção de ácido fosfórico</i>	23
3.2.6. <i>Produção de fosfato bicálcico</i>	27
3.2.7. <i>Aspectos ambientais associados ao produto</i>	29
3.3. Avaliação de Ciclo de Vida – ACV	30
3.3.1. <i>Conceitos e Definições</i>	30
3.3.2. <i>Breve histórico e aspectos normativos da ACV</i>	31
3.3.3. <i>Método de ACV</i>	33
3.3.3.1. <i>Definição de objetivo e escopo</i>	34
3.3.3.2. <i>Análise de Inventário</i>	36
3.3.3.3. <i>Avaliação de Impactos Ambientais</i>	37
3.3.3.4. <i>Interpretação</i>	38
3.3.4. <i>Usos e aplicações</i>	39
3.4. Estudos de ACV de Fertilizantes e Suplementos disponíveis na literatura	40
3.4.1. <i>ACV sobre Fertilizantes</i>	40
3.4.2. <i>ACV sobre Suplementos Animais</i>	42
3.4.3. <i>ACV sobre Fosfato Bicálcico</i>	43
4. Método de Trabalho	45
5. Resultados e Discussões	47
5.1. Avaliação do Ciclo de Vida para o Fosfato Bicálcico.....	47
5.1.1. <i>Inventários de Ciclo de Vida da produção de Fosfato Bicálcico</i>	52
5.1.2. <i>Avaliação de Impactos Ambientais</i>	52

5.1.3.	<i>Propostas de melhorias no processamento</i>	56
5.2.	Alternativa de melhoria nº. I: ACV da logística de importação de enxofre..	57
5.2.1.	<i>Resultados obtidos</i>	60
5.3.	Alternativa de melhoria nº. II: ACV do sistema de fechamento do circuito de efluentes líquidos	64
5.3.1.	<i>Resultados obtidos</i>	68
5.4.	Alternativa de melhoria nº. III: ACV de fontes alternativas de energia	71
5.4.1.	<i>Resultados obtidos</i>	76
6.	Conclusões	83
7.	Recomendações e Trabalhos Futuros	85
8.	Referências Bibliográficas	86

APÊNDICE A.1 – Inventário do processo de extração de rocha fosfática.....	92
APÊNDICE A.2 – Inventário do processo de britagem de rocha fosfática	94
APÊNDICE A.3 – Inventário do processo de beneficiamento de rocha fosfática	96
APÊNDICE A.4 – Inventário do processo de importação de enxofre	101
APÊNDICE A.5 – Inventário do processo de importação de enxofre da Alemanha	102
APÊNDICE A.6 – Inventário do processo de transporte de enxofre (Alemanha até Cajati)	103
APÊNDICE A.7 – Inventário do processo de produção de ácido sulfúrico	104
APÊNDICE A.8 – Inventário do processo de produção de ácido fosfórico.....	108
APÊNDICE A.9 – Inventário do processo de produção de ácido fosfórico.....	111
APÊNDICE A.10 – Inventário do cultivo e obtenção de cavaco de madeira	114
APÊNDICE A.11 – Inventário do consumo de diesel nas movimentações internas de máquinas e equipamentos	116
APÊNDICE A.12 – Inventário do processo de aquecimento a diesel de caldeira ...	118
APÊNDICE A.13 – Inventário do processo de supressão de madeira para cavaco	120
APÊNDICE A.14 – Inventário do processo de consumo de gás natural na geração de eletricidade	121
APÊNDICE A.15 – Inventário do processo de queima de gás natural em fornalhas.....	123
APÊNDICE A.16 – Inventário do processo de queima de gás natural em fornalhas.....	124

APÊNDICE A.17 – Inventário do processo de queima de gás natural em fornalhas.....	126
APÊNDICE A.18 – Inventário do processo de queima de óleo combustível	128
APÊNDICE A.19 – Inventário do processo de fabricação de cavaco de madeira a partir de sobras de serralherias	131
APÊNDICE A.20 – Inventário do processo de queima de cavaco de madeira.....	132
APÊNDICE A.21 – Inventário do processo de transmissão de eletricidade em alta tensão	136
APÊNDICE A.22 – Inventário do processo de transmissão de eletricidade em média tensão	137
APÊNDICE A.23 – Inventário do processo de transmissão de eletricidade em baixa tensão	138
APÊNDICE A.24 – Inventário do processo de produção da matriz elétrica brasileira ...	139
APÊNDICE A.25 – Inventário do processo de cogeração de energia	140
APÊNDICE A.26 – Inventário do processo de produção de eletricidade a partir de queima de cavaco	141
APÊNDICE A.27 – Inventário do processo de produção de eletricidade a partir da queima de gás natural	145
APÊNDICE A.28 – Inventário do processo de produção de calor a partir da queima de cavaco	146
APÊNDICE A.29 – Inventário do processo de produção de água no processo	150
APÊNDICE A.30 – Inventário do processo de produção de água deionizada.....	152
APÊNDICE A.31 – Inventário do processo elementar de transporte de água bruta	154
APÊNDICE A.32 – Inventário do processo de produção de calcário calcítico.....	155
APÊNDICE A.33 – Inventário do processo de lubrificação industrial	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1: Fósforo na alimentação de um bovino	8
Figura 3. 2: Disponibilidade de fósforo em pastagens e forrageiros	8
Figura 3. 3: Composição da alimentação de bovinos, suínos e aves	10
Figura 3. 4: Demanda de rações comerciais e integrações.....	11
Figura 3. 5: Processos industriais realizados no complexo mineroquímico de Cajati-SP	14
Figura 3. 6: Produções em cada etapa do processo para obtenção de 1 t. de FBC.....	15
Figura 3. 7: Fluxograma em blocos das operações de lavra, britagem e beneficiamento.....	17
Figura 3. 8: Diagrama referente ao processamento de produção de ácido sulfúrico	20
Figura 3. 9: Esquema da Análise do Ciclo de vida de um produto	31
Figura 3. 10: Estágios do estudo de ACV	34
Figura 5. 1: Etapas associadas à produção de fosfato bicálcico	49
Figura 5. 2: Perfil de impacto ambiental para a produção de fosfato bicálcico	54
Figura 5. 3: Localização dos países fornecedores de enxofre.....	58
Figura 5. 4: Comparativo entre custos operacionais e desempenho ambiental.....	62
Figura 5. 5: Indicador de desempenho ambiental associado a importação de enxofre.....	63
Figura 5. 6: Balanço hídrico do complexo de Cajati	67
Figura 5. 7: Perfil de impacto para a categoria mudanças climáticas	78
Figura 5. 8: Perfil de impacto para a categoria depleção de fósseis.....	78
Figura 5. 9: Comparação entre os perfis de impacto para as categorias mudanças climáticas e depleção de fósseis	79
Figura 5. 10: Perfil de impacto para a categoria toxicidade humana	79
Figura 5. 11: Perfil de impacto para a categoria exotoxicidade terrestre	80
Figura 5. 12: Perfil de impacto para a categoria ocupação de solo agriculturável	81
Figura 5. 13: Perfil de impacto com valores normalizados (tox. humana x ecotox. terrestre x ocupação de solo agriculturável)	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1: Exigências de cálcio e fósforo para funções específicas	8
Tabela 3. 2: Efetivo dos rebanhos brasileiros (milhões de cabeças)	9
Tabela 3. 3: Dados de produção de ração no Brasil (2013) e previsão de demanda (2014) ..	9
Tabela 3. 4: Consumo de fosfato bicálcico – estimativa (2013) e demanda (2014)	11
Tabela 3. 5: Balanço energético para produção industrial de H_2SO_4 (98%)	22
Tabela 3. 6: Vantagens e desvantagens do uso da tecnologia Dihidrato (DH) na fabricação de H_3PO_4	25
Tabela 5. 1: Categorias de impacto do processamento de 1 t. de FBC.....	55
Tabela 5. 2: Descritivo do processo de importação de enxofre	59
Tabela 5. 3: Valores totalizados de custos e impactos ambientais associados ao processo de importação de enxofre	61
Tabela 5. 4: Valores do indicador conjugado ambiental-econômico derivados dos custos de importação de enxofre e de seu desempenho ambiental correspondente.....	62
Tabela 5. 5: Consumo de água (m^3/h) nas correntes indicadas na Figura 5.6.....	69
Tabela 5. 6: Categorias de impacto das alternativas II-A e II-B.....	70
Tabela 5. 7: Categorias de impacto das alternativas II-A e II-B com inclusão de índice de relação.....	70
Tabela 5. 8: Distribuição dos consumos de energia elétrica (rede x cogeração).....	72
Tabela 5. 9: Combinações propostas à alternativa de fontes alternativas de energia	73
Tabela 5. 10: Categorias de impacto das alternativas III-A a III-H.....	77

1. Introdução

O nível crescente de exigência por parte dos mercados consumidores – tanto daqueles já constituídos, como de outros, ainda por serem explorados – impõe, e de certa forma até incentiva, a criação de práticas mais eficientes de produção. Na competição por esses nichos, as organizações fazem uso de modelos de gestão para os quais o conceito de qualidade vai além de disponibilizar produtos e oferecer serviços capazes de atender às necessidades de seus clientes com a mais elevada eficiência possível. Na versão atual, o sentido do termo qualidade não apenas faz incorporar, mas predispõe que convivam em equilíbrio e de maneira sustentável, componentes como crescimento econômico, justiça social e preservação do meio ambiente.

Dentro deste contexto, a vertente que abrange a preservação ambiental passa a receber delineamentos distintos daqueles que sua origem ecológica instituiu: de proteção, defesa, e salvaguarda do entorno. No mundo empresarial moderno, o ato de preservar o ambiente também não está restrito à postura reativa do simples atendimento a padrões estabelecidos na legislação pertinente. Dinâmica e alinhada com outros conteúdos da pauta corporativa, esta abordagem se materializa por meio das reduções do consumo de recursos e geração de rejeitos, alcançadas a partir de investimentos em tecnologias de transformação de alto desempenho, de adoção de rotinas de reaproveitamento, seleção de fornecedores por meio de critérios ambientais, e da incorporação de outras condutas de Produção mais Limpa (P+L).

Ao ser expressa desta forma – sistêmica e proativa –, a preservação ambiental pode ser integrada às demais vertentes da qualidade, tornando-se assim mais concreta, inteligível e, portanto, gerenciável. Consumos de matéria e energia são facilmente quantificáveis em termos econômicos, assim como custos associados ao tratamento de rejeitos previamente à disposição no ambiente. Por extensão, desperdícios e ganhos nesse mesmo segmento tornam-se igualmente monetizáveis.

A aderência com a expressão social da qualidade se reflete em distintas escalas. No nível local, por propiciar menor grau de exposição a trabalhadores que atuam em processos estáveis e enxutos. No âmbito de mercado, a partir da possibilidade de oferecer bens de consumo a valores acessíveis. Por fim, na esfera mais ampla e

idealista da questão, esta ligação se dá no desdobramento natural e compulsório do conceito de sustentabilidade: de disponibilizar recursos e meios para que às próximas gerações lhes seja possível atender as necessidades.

Atentas a tais tendências, empresas brasileiras de grande volume de circulação vêm promovendo adequações em seus modelos de gestão com vistas a perpetuar – e na medida da possibilidade, ampliar – suas operações nos mercados nacional e estrangeiro. A Vale Fertilizantes S.A. ramificação do Grupo Vale S.A. para o segmento de nutrientes básicos – amônia anidra, rocha fosfática e cloreto de potássio – e produtos intermediários – sulfato de amônio, ureia, superfosfatos simples e triplo (SSP e TSP), fosfatos de mono e de diamônio (MAP e DAP) e fosfato bicálcico – corrobora com essa filosofia.

Levantamentos realizados pelo *Deutsche Bank* em 2011 deram conta ser a empresa a maior fornecedora de produtos nitrogenados e fosfatados para a produção de fertilizantes no Brasil. No caso específico desses últimos, a hegemonia da Vale Fertilizantes se faz notar tanto para os fosfatados de alta concentração – segmento em que detinha à época 37% do mercado interno –, como de baixa concentração – para os quais sua capacidade produtiva era de 2,75 Mt/ano – (DB, 2011).

Para sustentar tais desempenhos, a Vale Fertilizantes possui cinco minas próprias de rocha fosfática – sendo três em Minas Gerais, uma em Goiás e outra em São Paulo –, seis unidades de processamento industrial que contam com usinas de beneficiamento de rocha, e duas unidades químicas de produção de nitrogenados. A estas se soma um sistema de logística que compreende centrais rododiferroviárias, minerodutos e um terminal portuário que juntos perfazem patrimônio imobilizado de 5,89 R\$ bilhões (DB, 2011).

Uma sinalização de como a empresa coordena suas ações de gestão está no destino de seus investimentos. Apenas no primeiro trimestre de 2013 foram injetados exatos 382 US\$ milhões em suas instalações, sendo 83% deste montante destinados a novos projetos; 13,9% para ações de manutenção nas unidades; e os demais 3,1%, consumidos em pesquisas e novos desenvolvimentos (VALE, 2013). Como resultado de todas essas ações, a empresa acumulou no período em referência 1,53 R\$ bilhões, uma contribuição equivalente a 6,9% da Receita Operacional do Grupo Vale S.A. (VALE, 2013).

Dentre as unidades de processamento industrial, deve merecer especial destaque aquela localizada no Município de Cajati (SP). A unidade industrial, pioneira na mineração de rocha fosfática no Brasil, atua hoje junto aos mercados de fertilizantes, nutrição animal e químicos, para os quais dispõe de dezessete opções de produtos em seu portfólio. O complexo mineroquímico de Cajati respondeu em 2012, pela quinta parte das receitas da Vale Fertilizantes. Esse resultado foi alcançado, em sua maior parcela de contribuição, a partir da produção de fosfato bicálcico (VALE, 2013). Tal desempenho, aliás, foi fator decisivo para seleção do produto como objeto central da presente iniciativa, assim como ficará explicitado mais adiante.

Princípio ativo essencial na composição de produtos voltados à nutrição animal, o fosfato bicálcico é aplicado como fonte de fósforo e cálcio em rações, sais minerais e outros bens de consumo do mesmo segmento. Dessa forma, toma parte da dieta alimentar de pouco mais de 21 milhões de cabeças de gado, 124 milhões de suínos e 9 bilhões de frangos (VALE, 2013). O Complexo de Cajati – único de sua classe no país que opera de forma totalmente verticalizada – é o maior produtor nacional de fosfato bicálcico, atendendo atualmente não apenas ao mercado interno – do qual detém cerca de 50% de participação –, mas também a clientes internacionais.

Apesar da importância que possui no setor agropecuário nacional, o processamento do fosfato bicálcico e sua disponibilização para as funções às quais se destina não estão isentos de proporcionar impactos ao meio ambiente. Isto ocorre não apenas em função do consumo inexorável de rocha fosfática – recurso natural considerado reserva estratégica de uma nação – mas também de água e outras utilidades, de aditivos e agentes de processo, e da geração de rejeitos nas formas sólida, líquida, e gasosa, em virtude da maneira como as tecnologias associadas à sua obtenção são praticadas.

Indo ao encontro da filosofia de qualidade praticada pelo Grupo Vale S.A., o Complexo de Cajati vem promovendo ações com o intuito de proporcionar melhorias de desempenho do processo no campo da preservação ambiental que, espera-se, venham a se traduzir depois em ganhos e benefícios de viés econômico. O presente projeto de pesquisa compreende uma dessas ações, e trata de avaliar a produção industrial de fosfato bicálcico com vistas à elaboração de diagnóstico de caráter ambiental, considerando para tanto procedimentos operativos e características exercitadas na unidade.

Em termos de estrutura, a iniciativa está organizada na forma de dois blocos intercomunicados, sendo o primeiro destes de elaboração *per se* do diagnóstico; e o segundo, de formulação de cenários de melhoria de desempenho. O estabelecimento do perfil de desempenho ambiental para o processamento será conduzido com graus de detalhe e aprofundamento compatíveis com a segunda etapa do projeto: de proposição de ações que resultem tanto em redução do consumo de insumos e utilidades de processo, como na redução de disposição no ambiente dos rejeitos que dele emanam.

A fim de que tais propósitos sejam levados adiante de maneira satisfatória e efetiva – ou seja, contemplando o arranjo produtivo de maneira ampla –, a formulação do diagnóstico será conduzida por meio da aplicação da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

O motivo que justifica e sustenta tal opção reside no papel desempenhado pela ACV junto aos contextos da gestão ambiental e da prevenção à poluição: de expressar de maneira quantitativa a magnitude das interações entre os sistemas antrópicos e seu entorno, dentro de um viés sistêmico.

Para o caso presente, esta abordagem se dá por intermédio da magnificação de impactos ambientais associados à produção do fosfato bicálcico desde a extração dos recursos naturais utilizados, até o momento em que o produto se torna disponível para atender as funções para as quais foi concebido. Assim como já foi mencionado antes, a formulação do diagnóstico encerra a primeira etapa do projeto. A partir disso, serão testados arranjos tecnológicos e operativos, propostos com vistas à melhoria do desempenho do processo, os quais derivam das oportunidades de melhoria de desempenho ambiental identificadas pelo diagnóstico. Esses arranjos serão dimensionados e deles serão produzidos modelos lógicos, os quais serão objeto de novas avaliações via aplicação da técnica de ACV. Para as situações em que forem comprovados benefícios ambientais serão providenciadas ainda, e de maneira complementar, análises de viabilidade econômica.

2. Objetivos

Tendo em vista o contexto apresentado no capítulo anterior, bem como a carência de estudos quanto ao tema apresentado, o presente estudo tem por objetivo geral avaliar a efetividade de arranjos tecnológicos propostos para potencializar a melhoria do desempenho ambiental da produção de fosfato bicálcico.

Como propósitos complementares imediatamente decorrentes desta iniciativa, pretende-se ainda:

- Proporcionar à unidade industrial em que é levada a cabo a fabricação de fosfato bicálcico, um perfil quantitativo atualizado dos impactos proporcionados por esta ação antrópica sobre o entorno;
- Avaliar, previamente à implantação, a efetividade ambiental de ações de melhoria de processo que tenham sido concebidas a partir do diagnóstico supramencionado;
- Fornecer subsídios ao processo gerencial de tomada de decisão que circunscreve a efetivação dessas alternativas de melhoria por meio de uma análise conjugada de teores ambiental e econômico;
- Por fim, porém não com menor importância, contribuir para a ampliação do banco de dados brasileiro para apoio a estudos de Avaliação de Ciclo de Vida.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Caracterização do Fosfato Bicálcico

3.1.1. Fosfato Bicálcico: características, propriedades, usos e aplicações

Segundo levantamentos efetuados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE em 2012, o Brasil possui o maior rebanho bovino comercial do mundo, com 213.228.888 cabeças de gado, e que corresponde a 21% da disponibilidade atual (IBGE, 2012). Além disso, o país constitui-se no maior exportador mundial de carne bovina e ocupa posições de destaque equivalente nos segmentos de criação de suínos e aves.

Ainda assim, existem indícios de que os índices de produtividade obtidos no país poderiam ser ainda mais expressivos caso houvesse uma adequação do desempenho do modelo de exploração extensiva, baseado muitas vezes apenas nas pastagens. ROSATI (2009) comenta que esse resultado se explica a partir de diversos motivos; no entanto, o autor destaca as deficiências minerais no solo como fator determinante. Neste grupo irá merecer especial destaque o fósforo (P), mineral essencial no crescimento de animais, e cuja contribuição representa em torno de 1% de seu peso vivo. Dentre as funções do P, é possível listar: formação e fortalecimento de ossos e dentes; elevação dos potenciais de reprodução e crescimento do rebanho; aumento do peso médio por unidades a partir da disponibilização de fosfolipídios como lecitinas e cefalinas; e estimulação do metabolismo energético, nas estruturas de adenosina di e trifosfato (ADP e ATP). Em contrapartida, deficiências de P no organismo podem levar a crescimento retardado e reprodução com baixos índices de fertilidade (TOKARNIA et al, 1988; ROSA, 1994; TOKARNIA et al, 2000).

Por outro lado, muito embora a deficiência de cálcio (Ca) em pastagens seja rara nas regiões tropicais – dado que as forrageiras encerram em seus tecidos concentrações adequadas; e que os níveis de Ca nas forrageiras não declinam com a maturidade e senescência da planta – uma dieta deficiente neste nutriente pode ocasionar sérios problemas ao rebanho. Em animais jovens, traz alterações no desenvolvimento ósseo, raquitismo e crescimento retardado. Já a deficiência severa em vacas reduz a produção leiteira, podendo levar até a manifestação de tetania

(convulsões) (CONRAD et al, 1985; BOCK, et al., 1991). Apesar da concentração do fósforo alterar conforme o ciclo da forrageira (plantas gramíneas ou leguminosas usadas como fonte de alimento para animais) há a oferta do volumoso, a qual reduz consideravelmente no período da seca, encadeando um aporte ainda maior do concentrado mineral. Todas estas circunstâncias tornam o nutriente em questão um dos fatores essenciais para a produção de um rebanho de alto rendimento.

A situação antagônica estabelecida entre a responsabilidade de atender compromissos de mercado, e a carência de nutrientes essenciais como P e Ca abre uma perspectiva assaz auspiciosa para a síntese de suplementos capazes de preencher esta lacuna. Neste contexto, se insere como alternativa bem recebida pelo mercado de nutrição de animais o fosfato bicálcico.

A principal vantagem deste ativo reside na especificidade de teores de seus elementos constituintes, proporcionada por controles extensivos de qualidade realizados no curso do processo de fabricação, e que permitem atender dietas bastante variadas com respostas bastante satisfatórias. Em termos de composição média, o sal mineralizado que integra a ração diária dos animais é composto de: 38% fosfato bicálcico; 48 % cloreto de sódio; 10% de calcário; e 4 % de micro minerais como selênio (Se), iodo (I), cobalto (Co), ferro (Fe), cobre (Cu), zinco (Zn), entre outros. É importante salientar que existem estágios diferenciados nos requerimentos de fósforo, como crescimento, engorda, manutenção, reprodução e lactação, vide **Tabela 3.1**. As **Figuras 3.1** e **3.2** apresentam informações acerca da quantidade de fósforo presente na dieta de um bovino padrão, bem como a disponibilidade deste composto na produção de pasto e forragem. Nesta última fica evidente a queda de disponibilidade natural do fósforo, muito associada com o período de secas.

Tabela 3. 1: Exigências de cálcio e fósforo para funções específicas

Função	Exigência	
	Cálcio	Fósforo
Manutenção	16 mg/kg de peso vivo	12 mg/kg de peso vivo
Crescimento	14 g/kg de ganho	8 g/kg de ganho
Lactação	1,2 g/kg de leite	0,96 g/kg de leite
Gestação		
Início	3,2 g/dia	1,57 g/dia
Meio	5,2 g/dia	3,4 g/dia
Final	7,8 g/dia	4,75 g/dia

Figura 3. 1: Fósforo na alimentação de um bovino

(Fonte: SANTIN, 2013)

Figura 3. 2: Disponibilidade de fósforo em pastagens e forrageiros

(Fonte: SANTIN, 2013)

3.1.2. Mercado de Fosfato Bicálcico

Os mercados a que se destina majoritariamente a produção de fosfato bicálcico são as culturas de aves, bovinos e suínos. Estatísticas do IBGE de 2012 fazem crer que a projeção de crescimento desses segmentos está relacionada de forma direta ao aumento do consumo de carne por parte da população mundial.

A **Tabela 3.2** descreve o avanço do rebanho efetivo nacional em cada qual dessas modalidades ao longo do quadriênio 2008-2011.

Tabela 3. 2: Efetivo dos rebanhos brasileiros (milhões de cabeças)

Anos	Bovinos	Suínos	Aves
2008	202,31	36,82	990,99
2009	205,31	38,04	1.021,22
2010	209,54	38,96	1.028,15
2011	212,82	39,31	1.051,99

(Fonte: IBGE, 2012)

A **Tabela 3.3** apresenta ainda estimativas de produção de carne proveniente de diferentes rebanhos nacionais em 2013, bem como as previsões da demanda para 2014. Os dados apontam inflexão ascendente – ainda que discreta – em termos de volume de produção para o período em praticamente todos os subsetores analisados.

Tabela 3. 3: Dados de produção de ração no Brasil (2013) e previsão de demanda (2014)

Subsetor	2013 (milhões de t.)	2014 (milhões de t.)
Aves	35,8	37,0
Suínos	14,9	14,9
Gado	7,5	7,7
Equínos	0,58	0,59
Aquacultura	0,74	0,84
Outros	0,80	0,82

(Fonte: SINDIRAÇÕES, 2014)

Com relação ao ciclo de vida destes animais, sabe-se que para o frango é de quarenta e cinco dias, cem dias para os suínos e até mil dias para os bovinos.

A dieta das aves e suínos é totalmente satisfeita com ração, onde a participação do fosfato bicálcico está entre 1 e 1,5%. Quanto aos bovinos, ela é satisfeita basicamente com o volumoso (forrageira), sendo complementada com concentrado mineral, onde a participação do fosfato bicálcico varia entre 25 a 50% (**Figura 3.3**).

Figura 3. 3: Composição da alimentação de bovinos, suínos e aves

(Fonte: SANTIN, 2013)

Ainda para bovinos, há uma pequena parcela (menor que 1%, variando diretamente conforme os preços dos alimentos energéticos), onde o acabamento de carcaça é realizado pelo confinamento, onde o animal recebe ração completa por aproximadamente 90 dias. Importante ressaltar que vacas em produção ou lactação recebem uma dieta mais rica em relação a outras categorias nos bovinos.

Na **Tabela 3.4** estão descritos dados de consumo de fosfato bicálcico no mercado nacional em 2013 e de previsão da demanda deste produto para 2014, tanto para a composição de rações quanto para o consumo como suplemento animal. Tais

estimativas levam em consideração a previsão da demanda de carne para o mercado esquadrinhada antes na Tabela 3.3.

Tabela 3. 4: Consumo de fosfato bicálcico – estimativa (2013) e demanda (2014)

Segmento	2013	2014
Rações (t.)	332.618	340.242
Suplementos (t.)	540.000	594.000
Total (t.)	872.618	934.242

(Fonte: SINDIRAÇÕES, 2014)

Por fim, a **Figura 3.4** apresenta a demanda de rações comerciais e integrações para diversas culturas de animais.

Figura 3. 4: Demanda de rações comerciais e integrações

(Fonte: SANTIN, 2013)

Os dados apresentados reforçam a importância do produto fosfato bicálcico tanto na cadeia de nutrição animal, crescimento dos rebanhos brasileiros, e manutenção da liderança mundial em produção.

3.2. Breve descrição de processos

3.2.1. Histórico do Complexo Mineroquímico

O município de Cajati-SP encontra-se na região conhecida como Vale do Ribeira, porção sul do estado de São Paulo que abriga integralmente a área de 31 municípios (22 paulistas e 9 paranaenses) e, parcialmente, outros 18 municípios paulistas e 21 paranaenses. A região detém mais de 60% dos remanescentes de Mata Atlântica existentes no Brasil, além de ser Patrimônio Natural da Humanidade, conforme reconhecimento declarado pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) em 1999.

A ocorrência de minerais de ferro sob a forma de concentrações eluviais e aluviais de magnetita provenientes do carbonatito e jacupiranguito existentes no local levaram, desde o século XIX, à indicação de uma possível jazida de minério deste metal (ANDERY, 1967).

Com os trabalhos geológicos realizados com base nestas indicações, descobriu-se no local uma fonte de fosfatos, informação que levou o governo do Estado de São Paulo a requerer a área do Morro da Mina junto ao DNPM, obtendo a autorização de pesquisa em 1941 e autorização de lavra em 1943.

Em 1944, a Serrana S/A de Mineração (atual Vale Fertilizantes S.A.) arrendou do mesmo governo a jazida Morro da Mina por contrato de preposição onde se obrigou a produzir concentrados adequados à fabricação de insumos agrícolas (ANDERY, 1967).

Então, no ano seguinte iniciou-se a lavra do minério apatítico residual desta jazida, e para isto implantou-se nas proximidades do empreendimento toda a infraestrutura necessária para fixação de mão-de-obra, tais como vila residencial, escola, clube recreativo e cinema.

Desde o início da lavra, em 1945, adotaram-se os métodos considerados adequados à época para a obtenção de concentrados para manufatura de fertilizantes e outros

produtos. Até 1953, julgava-se que a mineração no local se limitaria ao manto intemperizado, quando então, no início da década de 1960, prevendo o esgotamento do minério residual rico em fósforo, a empresa investiu na descoberta de novas tecnologias de beneficiamento de minérios.

Um convênio firmado com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), tendo por provedor do lado da universidade o Prof. Dr. Paulo Abib Andery, permitiu com que fosse desenvolvido um processo de concentração por flotação de minérios de baixo teor de fósforo, possibilitando a recuperação de apatita em concentrado de alto teor.

A flotação de fosfatos tratou-se de uma inovação tecnológica que possibilitou não apenas a continuidade das operações em Cajati, mas também e até, principalmente, a expansão do mercado de fertilizantes, visto a descoberta ter sido cedida sem custos a outras empresas e negócios.

Números indicam que nos primeiros vinte anos de operação da mina foram lavrados cerca de dois milhões de toneladas de minério com teor médio de 23% de P_2O_5 , o que levou à produção de mais de 600.000 toneladas de concentrado com 36% de P_2O_5 .

Após o desenvolvimento de novas tecnologias, foi possível não apenas a manutenção das operações na região, mas também a elevação da produção, elevando os resultados de produção nas décadas de 1970 e 1980, quando a escala de produção se aproximara da escala atual.

Desde o início dos anos 80, o parque industrial existente em Cajati constitui um complexo industrial integrado, com produção de rocha fosfática, calcário para cimento e calcário agrícola, ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido fosfórico (H_3PO_4) e fosfato bicálcico, sendo este último o produto final da empresa voltado para o mercado de nutrição animal.

A **Figura 3.5** apresenta e destaca o caráter de verticalidade das operações minerais (lavra e beneficiamento mineral) e químicas (plantas de fabricação de ácido sulfúrico, ácido fosfórico e fosfato bicálcico) realizadas no complexo em estudo, desde a extração do minério junto à natureza, até o ensaque e expedição do fosfato bicálcico.

Constam deste mesmo esquema, não apenas as unidades operacionais que integram a planta em questão, mas também, produtos e rejeitos que são gerados em cada uma das etapas do processo. Deve-se esclarecer que muitas dessas perdas são hoje em dia objeto de ações de revalorização, e assim, antes de proporcionarem impactos sobre o entorno local, servem de insumos para outras transformações antrópicas.

Figura 3. 5: Processos industriais realizados no complexo mineroquímico de Cajati-SP

(Fonte: Vale Fertilizantes, 2014)

A **Figura 3.6** apresenta as quantidades de materiais consumidos em cada etapa do processo para produção de uma tonelada de fosfato bicálcico.

Figura 3. 6: Produções em cada etapa do processo para obtenção de 1 t. de FBC

3.2.2. Lavra e britagem de minério

As operações realizadas no ciclo de produção do fosfato bicálcico em estudo iniciam-se na atividade de lavra do minério, operação que, em Cajati, é realizada a céu aberto, com bancadas e bermas devidamente projetadas e utilizando-se de explosivos para desmonte do material. Tal método permite a obtenção de uma relação estéril/minério administrável operacionalmente, o qual se baseia em um teor de corte limite para concentrações de P_2O_5 no minério a ser consumido. A partir do desmonte e retomada, o minério é enviado para as operações de britagem, enquanto o estéril é encaminhado para deposição em pilhas a céu aberto ou, em menor quantidade, britado e classificado em um circuito operacional, servindo-se de brita para a pavimentação de estradas internas e externas (estas últimas através de doações institucionais). Tanto o transporte do minério para as operações de britagem, quanto do estéril para as pilhas de deposição é realizado através de caminhões basculantes, proporcionando elevados valores de consumo de óleo diesel nestas operações.

O minério, depois de transportado, é cominuído em um britador cuja função é promover a britagem primária do material até blocos com dimensões aproximadas de um metro. Em seguida, ocorre a transferência para pilhas intermediárias, de onde

seguem para a britagem secundária e circuito de peneiras que visam à classificação do minério.

Como a rocha fosfática caracteriza-se pela falta de uniformidade ao longo da mina, o material de aceite da classificação deverá ser homogeneizado a fim de aumentar sua eficiência na usina de beneficiamento. Ao passo que a porção rejeitada retorna à britagem por meio de um circuito fechado composto por correias transportadoras (SILVA, 1994).

Os principais aspectos ambientais associados a esta unidade estão relacionados ao elevado consumo de combustível para movimentação tanto de minério quanto de estéril, as emissões de ruído e vibração por conta das operações de desmonte de rocha via detonação, além de claramente, dos impactos visuais e da ocupação do solo, intimamente relacionados às atividades minerais.

3.2.3. Usina de beneficiamento mineral

É necessário elevar os teores de P_2O_5 obtidos na lavra da rocha fosfática, visando atender especificações necessárias para a fabricação de ácido fosfórico e outros compostos.

O processo é denominado concentração ou beneficiamento mineral, e compreende a realização de operações industriais visando à elevação dos teores médios de P_2O_5 presente no material. De maneira geral, combinam-se os circuitos de moagem, de desmagnetização, deslamagem, condicionamento, flotação, desaguamento, filtração e secagem, e como produto final obtém-se o chamado concentrado fosfático, cujo teor de fósforo pode variar entre 32% e 36% P_2O_5 . Uma sequência típica das operações realizadas em uma unidade de beneficiamento de rocha é demonstrada na **Figura 3.7**.

Inicia-se o processo na usina com a retomada do minério britado junto às pilhas homogeneizadas, enviando-o por meio de correias transportadoras para o circuito de moagem. Este é realizado em circuito fechado e linhas paralelas através de moinhos tubulares de barras e, após sua descarga, o material é transportado para separadores magnéticos onde se coloca em contato com a suspensão minério-água um cilindro imantado que, valendo-se de propriedade magnéticas, separa desta suspensão a magnetita.

Figura 3. 7: Fluxograma em blocos das operações de lavra, britagem e beneficiamento

(Fonte: KULAY, 2004)

Este composto pode ser classificado 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 Fe_3O_4 . Quanto a sua composição, é formada essencialmente por óxidos de ferro, dentre os quais aproximadamente 31% são óxidos ferrosos (FeO) e 69% óxidos férricos (Fe_2O_3) (ZANARDO, 2000).

O material passante, ou seja, não magnético da desmagnetização, é bombeado para ciclones de classificação, nos quais as correntes de *underflow* retornam aos

moinhos como carga circulante, ao passo que as de *overflow* são enviadas para a deslamagem também em ciclones e, posteriormente, para o condicionamento de grossos.

O próximo estágio tem por objetivo separar a apatita dos minerais ainda presentes na corrente, dentre eles calcário. Este nada mais é do que uma rocha formada a partir do mineral calcita, o qual ZANARDO (2000) descreve como 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 CaCO_3 . Sua composição aproximada contém 53% de carbonato de cálcio (CaCO_3), 44% de dióxido de carbono (CO_2) e 3% de outros constituintes menores.

Para realizar a referida separação, faz-se necessário um condicionamento prévio do meio no qual a suspensão minério-água se encontram. O condicionamento ocorre com a adição de reagentes à suspensão, os quais funcionarão como agentes coletores e depressores e possuem função de modificar as propriedades superficiais do sistema, garantindo que a concentração dos compostos de fósforo ocorra com maior grau de eficiência (LEAL, 1991).

A tecnologia de separação utilizada é conhecida como flotação e opera com a alimentação das correntes condicionadas em células (de bancada ou coluna), nas quais também é introduzido ar atmosférico. A fração sobrenadadamente proveniente destas células apresenta concentrações elevadas de apatita e é submetida a uma operação de espessamento, sendo posteriormente transferida para um filtro a vácuo e, por fim, enviada para fabricação de ácido fosfórico.

Já a fração que escoar pelo fundo das células trata-se de calcário, que pode ser encaminhado para pilhas de deposição final ou reaproveitado. Neste último caso, e dependendo do reaproveitamento previsto, este material será enviado a um secador rotativo para adequação de sua umidade.

Quanto aos aspectos ambientais associados a essa unidade de beneficiamento mineral citam-se o elevado consumo de água (fluidização de correntes), o consumo de energia elétrica, e o consumo de cavaco de madeira como matriz energética em secador industrial.

3.2.4. *Produção de ácido sulfúrico*

Quanto à produção de ácido sulfúrico, ressalta-se que sua tecnologia de produção mais difundida recai sobre a dupla absorção. Neste sentido, e alinhado com as operações industriais em análise neste projeto, apresenta-se na Figura 3.3 o diagrama esquemático referente a tal processamento. A primeira etapa da produção envolve a fusão do enxofre elementar em um tanque dotado de serpentina e agitador, empregando-se vapor superaquecido de baixa pressão como fluido de aquecimento. O material liquefeito é enviado a um filtro prensa para que as impurezas possam ser eliminadas. De modo a justificar esta etapa de filtragem, KETZIEN (1974) cita que, ainda que o enxofre elementar apresente elevado grau de pureza, algumas de suas espécies contaminantes são capazes de comprometer de sobremaneira o bom andamento da produção do ácido. O enxofre livre de impurezas é então alimentado em queimadores instalados em uma fornalha na qual, em presença de ar atmosférico seco e desprovido de umidade, irá se transformar em anidrido sulfuroso (SO₂).

Essa reação de combustão de enxofre elementar (Eq. 1) possui uma elevada liberação de calor, explicando assim os elevados valores de temperatura dos efluentes gasosos (entre 950 e 1100°C) da câmara de combustão. (SANDER, 1977).

Em seguida, o gás rico em dióxido de enxofre é resfriado e enviado para a etapa de conversão em anidrido sulfúrico (SO₃), a qual comumente ocorre em um equipamento denominado conversor catalítico. Neste, o SO₂ gasoso passa por leitos catalíticos, aquecendo-se e resfriando-se novamente a cada saída, propiciando a conversão desejada (Eq. 02).

TRAINA (1984) descreve o conversor catalítico como um vaso vertical, de perfil cilíndrico, segmentado internamente em compartimentos de mesmo volume e com comunicação entre si, ocupados pelos leitos catalíticos. Com relação a estes, o autor ressalta serem definidos por três camadas de material sobrepostas: externas – camadas de suporte – formadas por materiais cerâmicos inertes à reação; central, onde se localiza o catalisador da reação

Figura 3. 8: Diagrama referente ao processamento de produção de ácido sulfúrico

(Fonte: Adaptado de Kulay, 2004)

A camada cerâmica inferior tem por principal função evitar que o catalisador entre em contato com a grelha metálica instalada no fundo de cada compartimento para dar sustentação ao conjunto. O recobrimento do agente catalisador com material inerte visa assegurar uma dispersão gasosa mais uniforme, bem como evitar a formação de cavidades no corpo deste, fato este que poderia afetar de maneira adversa seu perfil de temperaturas.

Dentre as substâncias testadas como catalisadores para a oxidação do SO_2 , apenas determinados compostos de vanádio e os óxidos de platina e de ferro apresentaram desempenho técnico satisfatório. O pentóxido de vanádio (V_2O_5) se difundiu de sobremaneira entre os fabricantes de ácido sulfúrico, pelo fato de demonstrar uma relação custo-benefício mais atrativa que as demais opções (MÜLLER, 1994).

O anidrido sulfúrico (SO_3) produzido por ocasião da oxidação catalítica do dióxido de enxofre reage com soluções de ácido sulfúrico para produzir H_2SO_4 concentrado. Esta absorção ocorre em torres recheadas denominadas torres de absorção. A totalidade destes equipamentos opera em regime contracorrente, com os gases de processo sendo alimentados pela parte inferior do equipamento, e circulando no sentido ascendente por entre os elementos que constituem seu recheio. Este, por sua vez, deverá ser irrigado uniformemente a partir do topo com soluções de ácido sulfúrico. O equilíbrio estequiométrico que caracteriza a hidrólise do SO_3 em ácido sulfúrico concentrado aparece representado a seguir pela equação Eq. 03:

A tecnologia de dupla absorção destacou-se das que a precederam por ter rendimentos globais de processo superiores a 99,5% na fabricação de ácido sulfúrico. Não bastasse sua significância em termos processuais, este resultado é considerado bastante expressivo também sob o ponto de vista ambiental, dadas as reduzidas quantidades de emissões atmosféricas provenientes pela fração do enxofre elementar não convertida em ácido.

Ressalta-se também uma particularidade associada às tecnologias de contato quanto à recuperação da energia gerada ao longo das etapas de fabricação do H_2SO_4 . SANDER et. al. (1984) reportam que em virtude do caráter exotérmico das reações envolvidas neste processamento, a energia na forma de calor é produzida durante a fabricação ácido sulfúrico (100%) a partir de enxofre elementar.

Na **Tabela 3.5** encontra-se representado um balanço energético típico para a produção de ácido sulfúrico (98% em massa) a partir de enxofre elementar obtido em uma planta com a tecnologia de dupla absorção. Diante dos resultados apresentados, verifica-se que 97% da energia introduzida no sistema se origina 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 kgf/cm² de pressão.

Tabela 3. 5: Balanço energético para produção industrial de H₂SO₄ (98%)

Entrada do sistema		Saída do sistema	
Origem	(%)	Origem	(%)
Reação exotérmica S ↔ H ₂ SO ₄	97	Vapor superaquecido (40 kgf/cm ² e 400°C)	60
		Energia perdida em diversos estágios de processo	37
Energia elétrica	3	Emissões atmosféricas	2,5
		Ácido sulfúrico (98%)	0,5

(Fonte: Adaptado de Kulay, 2004)

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 dos correntes gasosas que circulam entre os leitos catalíticos.

Conforme relatam BRUNO et. al. (1985) a partir de levantamentos realizados juntos 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;
- Acionamento do soprador de ar de combustão e da bomba de alimentação de água da caldeira;
- Pré-aquecimento intermediário do gás que retorna ao conversor após sua passagem pela torre de absorção intermediária;
- Produção de energia elétrica por cogeração;
- Suprimento das demandas de vapor e de energia elétrica na própria planta e em unidades adjacentes, no caso de parques industriais integrados.

Os principais aspectos ambientais associados a esta etapa do processo são a necessidade de importação de enxofre elementar de países distantes do Brasil, acarretando em impactos ambientais pelas longas distâncias de transporte, bem como as potenciais emissões atmosféricas da operação.

3.2.5. Produção de ácido fosfórico

Com relação à produção de ácido fosfórico (H_3PO_4), cita-se a tecnologia de processo via úmida, amplamente difundida no ramo industrial nacional. Descrevendo de forma simplificada, nesta reação alimenta-se em um reator multicompartimento o concentrado fosfático em conjunto como ácido sulfúrico, sob condições controladas, produzindo assim ácido fosfórico e sulfato de cálcio (CaSO_4), materiais posteriormente separados por um processo de filtração. A equação Eq. 04 indica a reação química citada:

O sulfato de cálcio produzido no sistema poderá ser obtido nas formas dihidratada, hemihidratada ou mesmo anidra conforme relatado por CEKINSKI (1990). Constitui-se prática usual selecionar condições de processo que levem à precipitação do sulfato de cálcio nas formas di e hemihidratadas.

Se é de desejo o precipitado de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, a faixa de temperatura de trabalho do reator deve variar entre 70 e 80°C, enquanto que a concentração do ácido fosfórico produzido deve por sua vez permanecer entre 28 e 32% de P_2O_5 .

Por outro lado, para sistemas produtivos que visam obter sulfato de cálcio na forma hemihidratada – $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}$, 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% P_2O_5 (SLACK, 1968).

As diferenças mais marcantes encontradas entre as tecnologias de produção de ácido fosfórico residem no tipo de reator para a digestão do concentrado fosfático. Plantas que apresentem 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, 200b). 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).

Do ponto de vista construtivo os sistemas de reação costumam ser fabricados em aço ou concreto e 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.

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 (Al_2O_3),

ferro (Fe_2O_3), magnésio (MgO) e silício (SiO_2) podem causar, quando associados à alguns cloretos inorgânicos, ao ácido fluorídrico (HF) e ao dióxido de carbono (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 3.6**.

Tabela 3. 6: Vantagens e desvantagens do uso da tecnologia Dihidrato (DH) na fabricação de H_3PO_4

Substância	Problemas no processo
MgO	<ul style="list-style-type: none"> • Forma compostos que dificultam a filtração
Al_2O_3 e Fe_2O_3	<ul style="list-style-type: none"> • Diminui a recuperação de P_2O_5 ao formar compostos tais como AlPO_4 e FePO_4 • Tende a formar lodo altamente viscoso após o estágio de concentração
SiO_2	<ul style="list-style-type: none"> • Caso se apresente em baixos teores, permite a formação de ácido fluorídrico (HF) que é corrosivo • Em altas concentrações causa erosão de tubulações e de elementos internos de bombas
Cl^-	<ul style="list-style-type: none"> • Teores acima de 0,01% aumentam consideravelmente a corrosão das instalações
HF	<ul style="list-style-type: none"> • O HF reage com a sílica presente na rocha originando fluorsilicatos que podem também levar a corrosão de equipamentos
CO_2	<ul style="list-style-type: none"> • Sua presença produz espuma que reduz a eficiência de conversão na etapa de reação

(Fonte: Adaptado de Kulay, 2004)

Após a reação, a suspensão segue para a unidade de filtração e lavagem, no 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_2O_5 entre 28 e 30%.

Esse produto é então encaminhado à zona de estocagem, 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 entre 16 e 20% P_2O_5 , é recirculado ao estágio de reação com o intuito 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_2O_5 , 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.

De modo geral, a concentração do ácido fosfórico se procede em duas etapas: na primeira etapa a concentração do ácido é elevada até um valor entre 40 e 42% de P_2O_5 por meio de troca indireta de calor com vapor superaquecido. (BRUNO et al., 1985). Na segunda etapa, análoga a anterior, o ácido fosfórico atinge novo patamar de concentração, cujos teores variam entre 50 e 52% P_2O_5 , 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.

Esses evaporados são constituídos por um trocador de calor, por uma câmara de “flasheamento” e por duas bombas, sendo uma de vácuo e outra de 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 hexafluorsilícico (H_2SiF_6). Tal arranjo busca reduzir as emissões atmosféricas da planta a níveis aceitáveis.

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.

RÜGER (1996) reporta que ao longo da produção do ácido fosfórico por meio do processo dihidrato, são geradas em média 4,9 t fosfogesso para cada tonelada de P_2O_5 obtida no produto final. Os principais aspectos ambientais associados a esta etapa de produção voltam-se as elevadas quantidades de água que o sistema requer, bem como os teores de flúor e fósforo presentes nos efluentes líquidos, e as perdas já apontadas de fosfogesso.

3.2.6. Produção de fosfato bicálcico

A obtenção de fosfato bicálcico (FBC) se dá a partir da reação entre ácido fosfórico e calcário calcítico em condições controladas. Esta transformação química não gera subprodutos; os principais resíduos gerados são materiais associados à manutenção das plantas e processos, caso de filtros, sacarias, isolamento térmico, borrachas, sucatas metálicas, entre outros.

O ácido fosfórico (H_3PO_4) é um triácido poliprótico, semiforte, com massa molar de 98g/mol, $d_{20^\circ\text{C}} = 1,685\text{g/mL}$, e aparência líquida viscosa nas condições ambientes. Tendo em vista os valores de suas constantes de ionização a 20°C – $\text{pK}_{a1} = 2.12$; $\text{pK}_{a2} = 7.21$; e $\text{pK}_{a3} = 12,67$ – apenas cerca de 30% de seus íons H^+ são dissociáveis (ZUMDAHL, 2009).

Os calcários (do latim *calx* (*gen. calicis*) ou *calcariu*, "cal") são rochas sedimentares que contêm minerais com quantidades acima de 30% de carbonato de cálcio (aragonita ou calcita). Quando o mineral predominante é a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ou $\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3$) a rocha calcária é denominada calcário dolomítico. Na forma bruta, não são incomuns elevados teores de impureza na forma de sílicas, argilas, fosfatos, carbonato de magnésio, gipso, glauconita, fluorita, óxidos de ferro e magnésio, sulfetos, siderita, sulfato de ferro dolomita e matéria orgânica entre outros (GALOPIM DE CARVALHO, 2006).

O calcário ocorre regularmente na natureza em deposições sedimentares. Também pode ser encontrado em áreas de vulcões extintos com cristalografia específica e ligações mais rígidas que aumentam a dureza deste mineral. Seus principais usos compreendem: produção de cimento Portland, e de cal (CaO); correção de acidez do solo na agricultura; fundente em indústria metalurgia; fabricação de vidro; e adubação química (TREWIN e DAVIDSON, 1999).

A reação – descrita a seguir pela equação Eq. 1 – é simples sob o ponto de vista químico, consistindo de contato entre um ácido de reatividade média e um sal de caráter alcalino. O produto está livre de quaisquer implicações que venham a influenciar negativamente a sua formação.

A reação química entre H_3PO_4 e a fonte de Ca (representada na reação Eq. 5 por CaCO_3) para produção de fosfato bicálcico ocorre em duas etapas – mesmo que de maneira instantânea – dependendo das condições de equilíbrio químico e de outros mecanismos associados. O primeiro passo consiste de neutralização do primeiro hidrogênio ácido; se acaso após a conclusão desta etapa persistir no meio fonte de base (Ca^{2+}) em quantidade residual, há também a neutralização do segundo hidrogênio. Ambas as reações ocorrem em pH ácido. Os casos mais extremos, e portanto, menos frequentes de neutralização do terceiro hidrogênio presente no H_3PO_4 se desenvolvem em meio alcalino (HAVLIN et al. 2005).

A reatividade deste processo está diretamente ligada a "força" da base e a outros conceitos mais complexos. Podem ser usadas três bases para neutralizar o H_3PO_4 no processo de fabricação do fosfato bicálcico. São elas: cal virgem, cal hidratada e calcário. Com a cal, constata-se maior poder de reação; no entanto, o calcário acaba sendo mais empregado por questões de viabilidade econômica (McMURRY e FAY, 2004).

A tendência mundial para o momento é a produção de FBC na forma microgranulado. Esta tecnologia de produção consiste em aproveitar o caráter lento da reação entre o H_3PO_4 e o calcário em um reator horizontal com múltiplas pás, que proporcionam uma quebra das partículas através de uma agitação intensa. O processo conta ainda com a mistura, no próprio reator, do reciclo (FBC seco), que atua como auxiliar na formação de partículas microgranuladas. O FBC

microgranulado respondeu em 2011 cerca de 70% de toda a produção realizada no Complexo Mineroquímico de Cajati. Como adiantado no curso desta argumentação esse desempenho foi determinante para defini-lo como produto de interesse desta iniciativa.

3.2.7. Aspectos ambientais associados ao produto

A produção do fosfato bicálcico na região em que se localiza o Complexo Mineroquímico de Cajati resulta em diversas intervenções – diretas e indiretas – sobre o meio ambiente local. Dentre estas são identificáveis como mais relevantes as alterações no meio biótico terrestre e aquático; alterações na qualidade do ar em virtude do lançamento de material particulado e gases para a atmosfera; possíveis contaminações de solos, e de reservatórios de disposição de rejeitos; alterações na qualidade da água de meios hídricos superficiais e subterrâneos da região e emissões de gases de efeito estufa, diretamente relacionados a questões associadas a mudanças climáticas.

O equacionamento de soluções para tais efeitos nocivos ao ambiente passa – mas não se esgota – pelo atendimento regular aos requisitos legais aplicáveis ao processo pelo organismo regulador. No entanto, a visão proativa da empresa sobre a questão ambiental – de que ações dentro desta esfera podem se reverter em melhoria de produtividade com consequente redução de custos de processo, e por conseguinte, prática de melhores preços junto ao mercado – revê e amplia esta atuação.

Assim sendo, programas de monitoramento de ar, águas, resíduos sólidos, geotécnico e hidrológico, atividades de gerenciamento de passivos ambientais, consumo de água e energia – nas formas elétrica e térmica – e até a forma de relacionamento da empresa com a comunidade local, passam a ser ações coordenadas, que integram um Sistema de Gestão Ambiental (SGA).

Este projeto dá andamento ao processo de consolidação de lógicas preventivas – estruturadas segundo a filosofia de Produção mais Limpa – em complementação às ações de comando e controle que se desenvolvem no complexo mineroquímico, motivadas por exigências constantes em suas licenças de operação e nas legislações pertinentes ao trato da matéria ambiental para o Estado de São Paulo.

3.3. Avaliação de Ciclo de Vida – ACV

3.3.1. Conceitos e Definições

SILVA (2010) apresenta o conceito de Ciclo de Vida como um sistema constituído pelo conjunto de todas as interações antrópicas com o meio ambiente, necessárias para que um produto cumpra integralmente todas as suas funções, desde a extração dos recursos naturais, percorrendo por todos os elos de sua cadeia produtiva, por seu uso e chegando até sua destinação final.

Por analogia e extensão, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) pode então ser entendida como técnica de gestão desenvolvida com o intuito de fornecer um diagnóstico quantitativo do desempenho ambiental do conjunto de etapas antrópicas que devem ser cumpridas para que um produto – mas também, um processo, ou serviço – cumpra com os propósitos para os quais este foi produzido ou exercitado (SILVA, 2012).

Em suma, a ACV faz uso da abordagem sistêmica para avaliar o desempenho ambiental de um produto, processo, ou serviço no exercício da função para a qual este foi concebido. Esta avaliação magnifica em termos de impactos ambientais o uso de recursos e a geração de rejeitos na forma de matéria e energia que circulam através de fronteiras reais, ou hipotéticas, que delimitam todo o seu ciclo de vida. A **Figura 3.9** descreve etapas genéricas de um ciclo de vida, destacando fluxos de matéria-prima, correntes de reciclo, e cenários de destinação final de resíduos.

Figura 3. 9: Esquema da Análise do Ciclo de vida de um produto

(Fonte: Adaptado de Hansen, 2013)

As correntes de matéria e energia que definem as interações do ciclo de vida de um produto – processo ou serviço – com o entorno são denominados aspectos ambientais. Por outro lado, conceitua-se o termo impacto ambiental no âmbito de atuação da ACV como modificações efetuadas sobre o meio ambiente em decorrência da ação de aspectos ambientais (BAUMANN e TILLMAN, 2004; ABNT 2009).

3.3.2. Breve histórico e aspectos normativos da ACV

Relatos de CHEHEBE (2002) dão conta que o primeiro estudo na busca de se inventariar o desempenho ambiental de um produto, com enfoque no consumo de energia, matérias-primas, água, e em partes nas emissões geradas no processo de fabricação, ocorreu entre final da década de 1960 e início da década de 1970. Esta análise, desenvolvida para a Coca-Cola Co., foi motivada pela mudança de atitude da organização na busca de medidas preventivas quanto à ocorrência de impactos ambientais. Inicialmente denominado de *Resource Environmental Profile Analysis* (REPA), o estudo buscava a resposta para a pergunta “Qual recipiente tem o menor lançamento de rejeitos no ambiente e menos afeta as reservas de recursos naturais?”. Diferenciando-se de estudos realizados àquela época, focados essencialmente em inventariar consumos energéticos, este trabalho quantificava, além dos primeiros, também matérias-primas e perdas ocorridas ao longo do processo de fabricação de cada recipiente. Aproximadamente um ano após a

elaboração do REPA, foram conduzidos outros dois inventários de consumo de energia no ciclo de vida de embalagens. Segundo BAUMANN & TILLMAN (2004) ambos os esforços foram conduzidos dentro do meio acadêmico, por universidades nos Estados Unidos.

Entre as décadas de 1970 e 1980, o desenvolvimento de trabalhos para a quantificação dos consumos e impactos associados ao exercício da função de um produto disseminou-se por diversos países na Europa, viabilizando a fundamentação teórica necessária para a concepção do conceito de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Entretanto, a ausência de padronização metodológica nos estudos até então publicados alimentava certo ceticismo por parte da comunidade científica, sobretudo a respeito da credibilidade dos resultados apresentados nestes trabalhos. A partir desta constatação, surgem grupos de pesquisa que se propõe a proceder o desenvolvimento de procedimentos confiáveis e exequíveis para a avaliação das interações entre um produto e o meio ambiente ao longo de seu ciclo de vida.

É neste contexto que na década de 1980 a Europa retoma e incrementa a técnica de ACV para produtos e serviços. Desta feita, porém, conceitos então disponíveis de desenvolvimento ambiental foram aplicados no sentido de magnificar os impactos das interações entre produtos e o meio ambiente. No mesmo período, a ACV é indicada pela Comunidade Europeia como abordagem mais adequada para o monitoramento do consumo de recursos naturais e geração de resíduos no processo (CHEHEBE, 2002).

Ao perceber a importância que o tema adquiria, a *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) organiza entre 1990 a 1993 nove conferências de âmbito internacional com o intuito de reforçar a base conceitual e de difundir a ACV pelo planeta. Essas iniciativas resultaram na elaboração do *SETAC Guidelines for Life Cycle Assessment: a Code of Practice*, primeiro documento voltado à padronização da técnica (MOURAD, GARCIA & VILHENA, 2002).

Subsidiado pelo trabalho da SETAC, a *International Organization for Standardization* (ISO) decidiu, em 1996, pela normatização e a padronização das práticas e condutas de realização de estudos de ACV. Um longo caminho foi percorrido até que as normas ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043 fossem compiladas. Em 2006, este conjunto passou por uma releitura do que decorreu a forma revisada

da ISO 14040 e da ISO 14044, em torno da qual se fundiram as outras normas de fundo metodológico (SILVA, 2010). Estes arraoados normativos tratam respectivamente de Princípios e Estrutura, e Requisitos e Diretrizes da Avaliação do Ciclo de Vida. A elas se somaram outras normas, de aplicação em situações específicas associadas à prática da ACV. Tratam-se das normas ISO 14047, de exemplos ilustrativos de aplicação da ISO 14044 em situações de impacto ambiental; e ISO 14048, que trata do formato de documentação de dados (MONTEIRO, 2008).

No Brasil a difusão das normas ficou a cargo da Associação Brasileiro de Normas Técnicas (ABNT). Convocando voluntariamente especialistas brasileiros no tema, a instituição vem organizando a tradução dos conjuntos gerados pela série 14040 da ISO. Estão disponíveis para consulta nesse segmento as normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044, todas elas editadas em 2009 (SILVA, 2012).

3.3.3. Método de ACV

Um estudo de ACV consiste, em termos de método, do cumprimento de quatro etapas, sendo uma delas, de planejamento, duas outras, etapas executivas e, por fim, aquela que irá aferir aspectos de consistências e representatividade do estudo (RIBEIRO, 2009). Na forma como estão organizadas na norma ABNT NBR ISO 14040, estas se intitulam, respectivamente: *Definição de Objetivo e Escopo*; *Análise do Inventário*; *Avaliação de Impactos Ambientais*; e, *Interpretação*.

Figura 3. 10: Estágios do estudo de ACV

(Fonte: Adaptado da norma ABNT NBR ISO 14040:2009)

Tais ações são representadas na **Figura 3.10** seguindo o encadeamento em que devem ser exercitadas. Destaque-se nesta disposição a iteração entre as etapas, motivado por readequações sucessivas de premissas em decorrência de dificuldades surgidas por conta do avanço do estudo.

Passam agora a serem descritos de maneira sintética, porém consubstanciada, elementos constituintes e características de cada etapa de um estudo de ACV.

3.3.3.1. *Definição de objetivo e escopo*

No tocante a *Definição de Objetivos*, esta etapa da técnica de ACV se ocupa em descrever de maneira clara e inequívoca os objetivos do estudo; os motivos e utilizações pelos quais este será desenvolvido; e o público alvo a que seus resultados se destinam.

Na *Definição de Escopo* são estabelecidas premissas, condicionantes e orientações de caráter geral para o estudo. Estes requisitos são fundamentais no sentido de: estabelecer a função a ser exercitada pelo produto, processo, ou serviço em análise; estabelecer as fronteiras que separam o espectro de aplicação da ACV de suas vizinhanças; reger o processo de coleta de dados; e definir os impactos ambientais para os quais o desempenho ambiental será mensurado. Segundo as normas ABNT

NBR ISO 14040 e 14044 (2009a, 2009b), serão definidos principalmente nesta etapa os seguintes elementos:

- a) *Função do sistema de produto*: estabelece o propósito para o qual o produto, processo ou serviço em análise terá seu desempenho ambiental diagnosticado pela ACV.
- b) *Unidade funcional*: quantifica o exercício da função definida ao produto de acordo com o escopo da ACV. Este valor pode ser entendido como a base de cálculo para a quantificação das entradas e saídas do sistema. Trata-se de um valor arbitrário.
- c) *Fluxo de referência*: quantidade de produto necessário para atender a unidade funcional estabelecida para o estudo. Para efeito de seu estabelecimento, deve-se levar em conta o desempenho técnico do produto no exercício da função.
- d) *Fronteiras do Sistema de Produto*: delimita a abrangência do estudo, em relação ao sistema natural – ou Biosfera –, e a outros sistemas antrópicos – Tecnosfera. Nesse sentido, a fronteira delimita o conjunto de processos elementares que proporcionam o atendimento da função previamente definida e que modela o ciclo de vida de um produto.
- e) *Sistema de produto*: conjunto de processos elementares conectados entre si por meio de fluxos materiais ou energéticos, a partir do qual será realizada a função previamente definida.
- f) *Procedimentos de alocação*: válido apenas para estudo de ACV com enfoque atribucional, estes procedimentos buscam distribuir de maneira adequada as contribuições dos fluxos de entrada e saída aos impactos em situações de multifuncionalidade. Nesse caso, empregam-se critérios de partição baseados em componentes físicas – como massa –; ou econômicas. Os procedimentos de alocação não são consenso entre a comunidade científica dedicada ao avanço da ACV. Na opinião de muitos, o uso desse recurso pode ser objeto de juízo de valor, do que derivariam eventualmente distorções nos resultados finais de um estudo. Como alternativa a essa prática sugere-se a adoção de enfoques como a expansão das fronteiras do sistema de produto, a fim de circunscrever ao sistema os efeitos da multifuncionalidade, ou mesmo, adotar

o chamado enfoque consequencial (BAUMANN and TILLMAN, 2004). No entanto, o recurso da alocação é reconhecido pelas normas da série 14000 que dispõe sobre a técnica de ACV. Nesses termos, seu uso é recorrente, sempre quando efetuado em associação com uma Análise de Sensibilidade (HANSEN, 2013).

- g) *Crítérios de exclusão de dados*: rotinas quantitativas – na forma de contribuições cumulativas de massa e de energia para certo processo elementar – ou qualitativas, baseadas em grau de relevância ambiental, utilizadas para selecionar aspectos ambientais a serem considerados em cada processo elementar que compõe o sistema de produto.
- h) *Requisitos de qualidade*: especifica as características dos dados necessários ao estudo para alcance dos objetivos pré-estabelecidos, incluindo os seguintes parâmetros: período de tempo coberto; área geográfica; tecnologias envolvidas; completeza e representatividade dos dados; reprodutibilidade dos métodos usados ao longo da ACV; fonte dos dados e incertezas da informação.
- i) *Categorias de impacto e Metodologia para a avaliação de impacto*: define não apenas o método mais adequado para magnificar a influência dos aspectos ambientais, mas também, e dentro deste, identifica as categorias de impacto a serem utilizadas no estudo. Os objetivos definidos para o estudo serão elementos essenciais neste processo de seleção.
- j) *Análise crítica*: verifica se o estudo satisfaz os requisitos adotados quanto à metodologia, aos dados e ao relatório.

Além dessas definições, a etapa de *Definição de Objetivo e Escopo* contempla eventuais limitações e suposições incorporadas para o andamento da ACV, a fim de relatar de forma fiel, completa e consistente os resultados do trabalho (ABNT, 2009a).

3.3.3.2. Análise de Inventário

Segundo SANTOS (2005), a análise do Inventário de Ciclo de Vida (ICV) consiste de um procedimento sistemático, gradual e objetivo para quantificar os fluxos de matéria e energia no ciclo de vida. O primeiro passo a ser realizado nesse âmbito consiste da coleta de dados. Esta ação deverá ser conduzida de forma que ao final

do processo, os dados que a partir dela forem gerados reflitam com elevado grau de representatividade os fluxos de entrada e saída de matéria e energia que descrevem a relação entre o sistema de produto em análise e o meio ambiente ou outro sistema.

Para que a coleta de dados seja efetiva em seus propósitos, algumas ações prévias a esta incursão – que corresponde à etapa mais exaustiva da ACV, como a construção de um fluxograma de processo, a elaboração de dispositivos para coleta e registro de dados, e a descrição do objeto em estudo – devem ser providenciadas.

Os dados utilizados para o estudo podem ser obtidos em campo (dados primários) ou em literatura (dados secundários). Dados quantitativos utilizados na comparação de materiais ou processos e dados qualitativos empregados para a descrição de aspectos ambientais ou etapas não quantificáveis, podem ser selecionados a partir da aplicação dos critérios de exclusão de dados (ABNT, 2009b).

Após a coleta, os dados são tratados, a fim de se adequar ao fluxo de referência constituído para o estudo. Nesse instante, devem também ser incorporados os critérios de alocação a fim de proceder a uma ponderação minimamente coerente de aspectos ambientais entre os distintos produtos gerados em determinado processo inscrito no sistema de produto.

Dada característica iterativa da ACV, RIBEIRO (2009) destaca que durante a execução do inventário será necessário efetuarem-se análises de sensibilidade para eventuais redefinições da fronteira do sistema, exclusão de aspectos ambientais, ou de processos elementares identificados como não significativos para o estudo.

O produto final da etapa de ICV compreende uma planilha constituída por aspectos ambientais, ajustados ao fluxo de referência do estudo e, quando for necessário, tratados por meio da aplicação de critérios de alocação.

3.3.3.3. *Avaliação de Impactos Ambientais*

A Avaliação de Impactos Ambientais do Ciclo de Vida (AICV) analisa as magnitudes e significâncias dos impactos ambientais potenciais causados sobre o ambiente e sobre o ser humano, relacionados ao atendimento da função exercitada pelo produto, processo, ou serviço objeto do estudo.

De acordo com as normas da série ISO 14040 que discorrem sobre o tema, a AICV é composta por elementos obrigatórios e opcionais. Como elementos obrigatórios têm-se: *Seleção de categorias de impactos e de seus respectivos indicadores*; *Classificação*; *Caracterização*; e, *Definição do Perfil de Impacto Ambiental* (ABNT, 2009a).

De acordo com PEREIRA (2004), a Seleção das Categorias de Impacto Ambiental baseia-se nos resultados do ICV, particularmente nos aspectos ambientais de maior relevância para o estudo. Concluída esta ação, as categorias de impacto serão correlacionadas com os resultados gerados pelo ICV. Esta ação ocorre em dois momentos: primeiramente em termos qualitativos – segundo procedimento de Classificação –; a seguir, procede-se uma interação quantitativa – a Caracterização.

A quantificação dos resultados para cada categoria de impacto é realizada com base no estabelecimento de *fatores de referência*, os quais são representados algebricamente por um combinado de valores provenientes dos impactos de cada processo elementar em estudo, expressando a magnitude de contribuição de cada um deles na categoria avaliada. A partir da expressão em termos de combinado de valores, são definidos os fatores de equivalência para cada substância dentro de cada uma das categorias de impacto. Assim sendo, as contribuições de todos os fluxos de matéria e energia dentro do processo em estudo, passarão a serem expressas a partir dessas mesmas substâncias de referência.

A composição dos desempenhos ambientais do atendimento da função expressa em todas as categorias gera o chamado *Perfil de Impacto Ambiental*.

A ACV considera categorias de impacto tais como: Mudança climática; Redução (ou Depleção) da camada de ozônio; Acidificação; Depleção de recursos abióticos; Eutrofização, Formação de foto-oxidantes, Depleção de Recursos hídricos e Fósseis, Transformação e Ocupação do solo, Toxicidade humana e Ecotoxicidade, entre outros.

3.3.3.4. *Interpretação*

A etapa de Interpretação compreende a identificação dos temas de maior relevância ambiental, avaliando os resultados do estudo para o estabelecimento de recomendações e conclusões.

O desenvolvimento minucioso de todas as etapas relatadas, que por essência da metodologia estão inter-relacionadas, é fundamental para o êxito da ACV, evidenciando a abordagem holística dos impactos ambientais associados ao material de estudo.

Desta forma, a ACV se apresenta como uma ferramenta importante dentro dos sistemas de gestão, discutindo com clareza e objetividade as questões ambientais relacionadas ao gerenciamento de recursos ambientais e à identificação de pontos críticos de processos e produtos, possibilitando aperfeiçoar sistemas, insumos e matérias-primas, e desenvolver novas tecnologias.

O conjunto dos indicadores de categoria de impacto (perfil ambiental) do produto é analisado na última fase da ACV, a fase de interpretação dos resultados. Esta etapa de análise crítica objetiva combinar, resumir e discutir as constatações da análise de inventário e da avaliação de impacto, de maneira iterativa aos objetivos e escopo da ACV, bem como da natureza e da qualidade dos dados coletados.

3.3.4. Usos e aplicações

Atualmente, a expansão do interesse pela técnica de Avaliação do Ciclo de Vida coincide com uma diversidade de aplicações e usos a que mesma se destina em frentes diferente, tais como Setores Industrial e Agrícola, Agências Governamentais e Organizações não Governamentais (ONG), Organismos reguladores, e mesmo, o mercado consumidor. Neste contexto, destacam-se como aplicações da ACV: identificação de oportunidades de melhoria de desempenho ambiental; comparação de desempenho ambiental de produtos com mesma função; concessão de rótulos ou selos; projeto de novos produtos e processos, ou remodelação dos já existentes, a partir da variável ambiental; comunicação ambiental; entre outras (SILVA e KULAY, 2006).

Na primeira das vertentes – de identificação de oportunidades de melhoria – a ACV é conduzida com o intuito de aprimorar processos e produtos, por meio de busca de novos insumos, fontes alternativas de energia ou tecnologias capazes de atender às funções originalmente previstas para o produto, mas com menores impactos ambientais. Isso é possível pelo fato de a técnica explorar o desempenho ambiental do objeto em estudo em cada etapa de seu ciclo de vida, possibilitando identificar a

origem dos impactos ambientais mais significativos. De forma similar, a ACV pode ser adotada como meio de verificação de desempenho no processo de concepção de novos produtos, de forma que este seja concebido com um melhor desempenho ambiental que seu predecessor para o exercício de uma mesma função.

A ACV se propõe também a fornecer dados quantitativos de desempenho ambiental para a verificação de atendimento de critérios estabelecidos por selos ou rótulos desenvolvidos por governos, ONGs ou até mesmo pela indústria. Esta aplicação é amplamente utilizada para difusão informações aos consumidores e usuários dos produtos, de forma que estes possam atribuir ao seu critério de escolha a matéria ambiental (BAUMANN e TILLMAN, 2004).

Por fim, a ACV propicia a identificação de estratégias capazes de alterar o desempenho ambiental de produto, processos e serviços que cumpram a mesma função por meio de vias distintas. Neste cenário, as análises têm como objetivo verificar que estratégias diferenciam um produto do outro em termos ambientais. A minimização de rejeitos no processo, ações de prevenção à poluição, capacidade de reuso e reciclagem e substituição de insumos são algumas das causas potenciais de mudança de desempenho ambiental que podem ser identificadas a partir do uso da ACV (SILVA e KULAY, 2006).

3.4. Estudos de ACV de Fertilizantes e Suplementos disponíveis na literatura

Realizou-se levantamento bibliográfico sobre produções acadêmicas associadas ao tema em estudo junto a bases de busca científicas de amplo espectro. Esta ação teve por propósito único identificar resultados de pesquisa que compreendessem avaliações de desempenho ambiental de fertilizantes e suplementos minerais os quais, por ventura já tivessem sido objeto de interesse do segmento acadêmico. O produto deste esforço aparece descrito nos tópicos que seguem.

3.4.1. ACV sobre Fertilizantes

A busca por artigos que descrevessem aplicações de ACV voltadas a fertilizantes deveu-se à similaridade em termos de tecnologia de produção guardada entre aqueles e o fosfato bicálcico. De maneira geral, observou-se em todas as produções

recolhidas junto à literatura uma opinião unânime dos autores quanto à adequação da técnica de ACV para avaliação dos impactos ambientais associados à produção destes bens.

BRENTUP et al. (2001) avaliaram, via aplicação de ACV, impactos ambientais da produção agrícola da beterraba sacarina no nordeste da Alemanha. O estudo comparou a utilização de três formulações diferentes de fertilizantes nitrogenados. Os autores concluíram que em todos os sistemas analisados os impactos ambientais de acidificação e eutrofização despontaram como principais comprometedores de desempenho ambiental do referido processamento agrícola.

BRENTUP et al. (2004) analisaram também os impactos ambientais associados à utilização de diferentes doses de fertilizantes nitrogenados na produção de trigo, e novamente a ACV foi usada para quantificação de impactos. Concluiu-se que doses muito pequenas de nutrientes proporcionavam maiores impacto no uso de solo, em virtude da necessidade de maiores áreas de cultivo, ao passo que elevados teores de fertilizante resultaram em impactos associados à eutrofização.

NIE et al. (2010) estudaram impactos ambientais de diferentes sistemas de cultivo (milho, milho + soja, e milho + amendoim) para a condição chinesa de cultivo desses gêneros. Os resultados obtidos por estes pesquisadores demonstraram que quando cultivado em rotação com outros produtos agrícolas – como amendoim e soja – o milho pode reduzir os efeitos adversos do excesso de aplicação de fertilizante nitrogenado sobre o meio ambiente, em comparação com o desempenho obtido quando seu processamento agrícola se dá de maneira isolada.

RIBEIRO (2009) apresenta uma contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio aos estudos de ACV, obtendo o perfil detalhado do setor de fertilizantes nitrogenados do país, identificando e quantificando as entradas de recursos naturais e as disposições de rejeitos associados ao ciclo de vida destes fertilizantes. O estudo traz ainda uma discussão sobre os principais aspectos ambientais associados à produção de três fertilizantes nitrogenados brasileiros: amônia, ureia, e sulfato de amônia.

Com relação aos fertilizantes fosfatados, KULAY (2000) utilizou a metodologia da ACV para avaliar o caso da produção nacional de superfosfato simples. Esta produção permitiu verificar que a manufatura do SSP não traz impactos significativos

sobre o meio ambiente, e que as maiores contribuições que possam a ela ser atribuídas relacionam-se a mudanças climáticas – dada a predominância de transporte rodoviário no país –, eutrofização – relacionada a perdas no P no processo – e ao uso do solo – por conta da elevada geração de resíduos sólidos no beneficiamento da rocha fosfática.

Em outro estudo voltado à produção de fertilizantes fosfatados no Brasil, SILVA e KULAY (2003) compararam as rotas úmida e térmica de produção de nutrientes desta classe. O estudo estabelece, por meio da ACV, os perfis de desempenho ambiental de superfosfato triplo (TSP) e de termofosfato magnésiano fundido (FMP) destes processamentos. A rota úmida mostrou-se mais comprometidora em termos de eutrofização terrestre – dadas as perdas de PO_4 –, e de Depleção de Água – na concentração mineral. Já a rota seca mostrou-se mais agressiva em termos de Mudanças Climáticas, não apenas em virtude dos transportes, mas também do consumo de eletricidade para funcionamento dos fornos de fusão com eletrodos de grafite.

MONTEIRO (2008) utiliza a ACV dentro da abordagem do “berço ao portão” para também avaliar a produção de SSP. Os resultados apontaram que a etapa de ataque ao concentrado fosfático por parte do ácido sulfúrico traz associada carga ambiental proveniente da produção (41,6 %) e transporte marítimo do enxofre (18,4 %), além do processo produtivo do ácido sulfúrico (10,2 %).

Finalmente, MANJARE e MOHITE (2012) utilizam ACV para avaliar o desempenho ambiental da produção do fosfato de diamônio (DAP), encontrando as categorias de maior impacto emissões atmosféricas e acidificação/nitrificação terrestre.

3.4.2. ACV sobre Suplementos Animais

O levantamento bibliográfico identificou também aplicações da ACV na avaliação do desempenho ambiental de produtos cuja obtenção predispõe consumo de suplementos animais. MOGENSEN et al. (2009) fazem referência ao uso da técnica para leite, carne suína e bovina na Escandinávia.

Em seus ensaios os autores concluíram que os impactos ambientais gerados na pecuária superam de maneira considerável aqueles gerados de atividades de industriais, e de transportes.

Com foco semelhante WERF (2005) utilizou ACV para avaliar os principais impactos ambientais associados à produção e fornecimento de suplementos animais para suínos. O estudo, conduzido estritamente segundo práticas europeias de criação destes animais, identificou impactos significantes em termos de Mudanças Climáticas, Eutrofização, Ecotoxicidade terrestre, Consumo de Recursos Fósseis e Ocupação de solo ao longo do processamento de ração. Complementarmente a isso, contribuições expressivas em termos de Mudanças Climáticas, Acidificação e mais uma vez, na forma de Depleção de Fósseis foram detectadas por conta de transportes de até 500km de distância.

OGINO et al. (2007) avaliaram os impactos ambientais de um sistema de produção de carne bovina para a situação japonesa. Dado que o estudo se propunha a definir cenários para redução de impactos, processos que em outras circunstâncias seriam potencialmente desconsiderados – como a própria produção de suplementos animais – foram adicionados ao sistema de produto. Os resultados obtidos confirmaram as constatações de outros pesquisadores ao indicar impactos significantes em termos de Mudanças Climáticas, Acidificação Terrestre, Eutrofização e Consumo de energia na pecuária.

Por fim, devem merecer destaque os estudos realizados CEDERBERG et al. (2009) e (2010) voltados especificamente à produção de carne bovina no Brasil. Os desenvolvimentos, que se restringiram a determinação da Pegada de Carbono, e transformação do uso do solo identificaram contribuições muito discretas de suplementos animais dentro dos recortes analisados. Em ambos os casos, os autores constataram serem os métodos de criação desenvolvidos no país – extensivo em essência, e com grande ocupação de área, o que predispõe muitas vezes avanço sobre mata nativa, principais responsáveis pelos impactos nas categorias analisadas.

3.4.3. ACV sobre Fosfato Bicálcico

O levantamento bibliográfico não pôde identificar produções acadêmicas dedicadas à avaliação do desempenho ambiental do fosfato bicálcico. As bibliografias acumuladas que tratam do tema centram seus levantamentos na utilização do produto.

A produção que mais se assemelha ao estudo de desempenho ambiental do processamento de FBC foi publicado por KOWALSKI et al. (2012). Os autores aplicaram a técnica de ACV em uma análise comparativa entre processos de fabricação de fosfatos voltados para a alimentação. As rotas analisadas compreenderam um processo térmico e duas unidades com processos endotérmicos de diferentes conceitos tecnológicos: uma planta química que produz intermediários inorgânicos e uma planta de produção de fertilizantes.

Os resultados indicaram que a tecnologia mais atraente do ponto de vista ambiental é a unidade de obtenção de adubos. Como consideração adicional, os autores comentam ser a ACV uma abordagem eficiente para efeito de diagnósticos ambientais; mas recomendam que seus resultados devam ser comparados com respostas obtidas da aplicação de outros métodos de medição.

4. Método de Trabalho

A estrutura metodológica que pauta a condução do presente trabalho foi definida em seis etapas, conforme descrição a seguir:

- I. *Revisão Bibliográfica*: levantamento de dados e informações junto a fontes consistentes e referenciáveis, que possibilitem uma análise plena e meticulosa dos conceitos e estudos já realizados sobre o assunto em que se trata o projeto.
- II. *Caracterização do processo industrial em estudo*: detalhamento das etapas do processo industrial em estudo, considerando as rotas tecnológicas atualmente utilizadas em suas transformações e condições operacionais.
- III. *Avaliação do Ciclo de Vida*: realização da ACV da produção de fosfato bicálcico na forma como o mesmo é produzido atualmente no Complexo de Cajati da empresa Vale Fertilizantes S.A., com o intuito de se estabelecer em um âmbito sistêmico o status ambiental deste processamento. A estrutura desta etapa é baseada nas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044, próprias para a condução de estudos desta natureza. Esta etapa é constituída por três grandes marcos:
 - a) *Caracterização do objeto em estudo*: descrição dos processos em análise quanto às tecnologias empregadas, definição das coberturas temporais e geográficas, delimitação do sistema de produto; desenvolvimento dos critérios de exclusão e alocação, seleção do modelo de avaliação de impacto e fixação do fluxo de referência;
 - b) *Elaboração de Inventários de Ciclo de Vida (ICV)*: que compreende a identificação e quantificação das correntes de matéria e de energia que entram e saem dos sistemas em análise, desde (ou para) outros sistemas antrópicos, ou mesmo, para o meio ambiente;
 - c) *Avaliação de Impactos Ambientais*: identificação e levantamento da magnitude dos efeitos sobre o entorno e sobre o ser humano que as atividades de transformação contempladas no estudo propiciam, na forma da determinação de Perfil de Impactos Ambientais como meio para o

estabelecimento do desempenho ambiental do processamento em análise.

- IV. *Estudos de novos arranjos tecnológicos*: análise conduzida no intuito de melhorar no desempenho ambiental do processamento em análise. Nesta etapa do projeto são avaliados de maneira aditiva, cenários que compreendam soluções potenciais de melhoria para o processamento de fosfato bicálcico.
- V. *Avaliação da eficiência dos novos arranjos tecnológicos propostos*: avaliação da efetividade das alterações propostas e dimensionamento dos possíveis benefícios que as mesmas proporcionarão ao processo – e consequente, à empresa – e ao meio ambiente. Esta análise se dará por meio da realização de nova ACV, à qual se soma uma análise de fundo econômico para efeito de monetarização das proposições.
- VI. *Análise crítica dos resultados*: etapa conclusiva do projeto, onde serão avaliados os resultados obtidos nas dimensões ambiental e econômica, mantendo esta avaliação sempre dentro de um enfoque gerencial de tomada de decisão.

5. Resultados e Discussões

Após terem sido apresentados os resultados parciais da Revisão de Literatura, primeira etapa do Método de Trabalho descrito no capítulo anterior, passou-se à etapa subsequente que compreende a realização do estudo de ACV com vistas à formulação do diagnóstico de desempenho ambiental da produção de fosfato bicálcico no complexo industrial de Cajati.

Para tanto, e como aparece indicado no método de trabalho, efetuou-se como preparação para este desenvolvimento um detalhamento ostensivo das etapas industriais desta síntese. Por motivos de confidencialidade e proteção industrial, o produto desta segunda etapa será dado a conhecer apenas nas circunstâncias em que tais conteúdos sejam necessários para elucidação e avanço das discussões a que esta produção se propõe.

No tópico que a este se segue, encontra-se detalhado em termos de resultados obtidos, de premissas e de condicionantes de caráter metodológico, o diagnóstico de desempenho ambiental do processamento em questão.

5.1. Avaliação do Ciclo de Vida para o Fosfato Bicálcico

Iniciou-se o projeto com a elaboração da Avaliação do Ciclo de Vida do fosfato bicálcico na forma como este é produzido na unidade industrial em estudo, de acordo com as diretrizes descritas nas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT 2009a; 2009b). Quanto à definição do escopo da avaliação, foram estabelecidos os seguintes requisitos:

Sistema de produto: fosfato bicálcico comercializado no mercado na forma de micro granulado P18 e P20, em pó P18 e micro granulado MCPD.

Função do sistema de produto: o estudo em questão se restringe, em termos de aplicação da ACV, a uma abordagem do tipo “berço ao portão”, excluindo tantos os aspectos ambientais e seus respectivos impactos decorrentes da pós-produção. Desta forma, definiu-se como função do sistema para o estudo, produzir fosfato bicálcico na formulação P18 micro granulado.

Unidade Funcional: estabeleceu-se, como unidade funcional do estudo, produzir 1000 kg de fosfato bicálcico na formulação P18 micro granulado.

Fronteiras do sistema de produto: o sistema de produto sob análise considerou oito subsistemas, a saber: extração de minério, usina de beneficiamento, extração e importação de enxofre, produção de ácido sulfúrico, produção de ácido fosfórico, cogeração de energia elétrica, produção de fosfato bicálcico e transportes internos ao processo. Um esquema balanceado do sistema de produto aparece indicado na Figura 5.1 de maneira simplificada.

Critérios de exclusão: foram excluídos da ACV aspectos ambientais cujas contribuições de massa e energia apresentaram valores inferiores a 1% em seus processos elementares. Também foram excluídas cargas cuja relevância ambiental foi considerada pouco significativa, seguindo as instruções definidas na ABNT NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). São exemplos da aplicação dos critérios em questão as exclusões de cordeis de detonantes na lavra de minério fosfatado, e o uso de diatomita para obtenção de H_3PO_4 .

Fontes de dados: o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos sólidos ao meio ambiente, os quais estão diretamente relacionados com a fabricação de fosfato bicálcico, foram modelados a partir de dados primários coletados para o objetivo do estudo. O mesmo ocorreu com aspectos ambientais associados com o transporte de matérias-primas no interior da unidade, assim como o consumo de utilidades.

Para os elementos de produção de outros sistemas – energia elétrica de concessionária e transporte da importação de enxofre – foram utilizados dados secundários (EcoInvent).

Qualidade de Dados: no que se refere à cobertura temporal, foram utilizados dados – primários e secundários – para uma série histórica contínua e homogênea definida durante os doze meses de 2011. Em termos de dimensão geográfica, foi considerado o estado de São Paulo, pois é a região em que a unidade fabril em estudo está localizada. Para o caso específico da importação de enxofre, foram identificadas as regiões produtivas dos países fornecedores deste material, a saber: Alemanha, Canadá, Emirados Árabes Unidos, Estados Unidos, Itália, Catar e Rússia. Finalmente, quanto à dimensão tecnológica, foi observado o

sequenciamento das operações estabelecido na descrição do processamento produtivo – **Figura 5.1** –, considerando toda a produção estudada como sendo do produto fosfato bicálcico P18 micro granulado.

Figura 5. 1: Etapas associadas à produção de fosfato bicálcico

Metodologia para Avaliação de Impacto: a fim de se obter um perfil de impacto ambiental gerado por um grupo de indicadores de análise, selecionou-se o método ReCiPe Midpoint (H) – versão 1.08 (GOEDKOOP, 2013). O perfil ambiental do produto foi definido, em primeira instância, para todas as categorias de impacto.

Uma análise detida dos resultados obtidos fez, no entanto, com que fossem desconsideradas desta análise efeitos em termos de eutrofização marinha e ecotoxicidade marinha – em virtude de os aspectos ambientais derivados do processo que chegam ao meio marinho o fazerem em quantidades de microgramas por tonelada de FBC ($\mu\text{g/t}$); radiação de ionização – pelo fato não haverem fontes de radioisótopos no processo, e pela contribuição de energia nuclear na matriz energética nacional ser de 2,7% de acordo com registros do Balanço Energético Nacional (BEN, 2012).

A ocupação do solo urbano foi desconsiderada em virtude das próprias características do estudo – de foco de aplicação da ACV baseado em abordagem “berço ao portão”. A transformação de terra também foi descartada dada a idade de operação da mina, que à época da coleta de dados seguia instalada há setenta e dois anos. Por fim, a depleção de metais foi também preterida pelo o fato de que bens de capitais foram desconsiderados para efeito elaboração do estudo.

Alocação: especificamente para a produção de vapor e de H_2SO_4 , utilizou-se o critério energético para alocação, visto que todo o vapor gerado e consumido no complexo é gerado a partir das operações de fabricação de ácido sulfúrico. Em qualquer outra situação, empregaram-se critérios de massa para alocação de aspectos ambientais.

A tecnologia do processamento realizado na unidade de Cajati encontra-se totalmente verticalizada, desde sua etapa de extração de minério, passando pelas operações de beneficiamento mineral, produção de ácido sulfúrico e ácido fosfórico, e por fim, fabricação de fosfato bicálcico. A única matéria-prima destes processos não originária do próprio complexo de Cajati é o enxofre, importado de diversas localidades.

Esta característica única em plantas de fabricação de fosfato bicálcico facilitou a obtenção de dados primários referentes a este processamento, tornado reduzida a necessidade de estimativas e dados secundários obtidos através de bibliografias.

Ainda que seja um processo verticalizado e permita a coleta de inúmeros dados primários, para que o estudo tenha um resultado mais próximo da realidade foram necessárias que algumas premissas fossem estabelecidas, a citar:

- a) Para os casos em que dados primários não estavam disponíveis, foram realizadas estimativas por meio de balanços de massa e energia, tomando-se por referência dados complementares junto a literatura técnica disponível;
- b) Para as emissões de material particulado provenientes das atividades de lavra, os dados foram estimados a partir de bancos de dados específicos, recolhidos junto a base de dados Ecoinvent (ALTHAUS et al, 2007). Nesses casos em especial, foram realizadas – na medida da possibilidade – adaptações daqueles parâmetros para as condições de operação do Complexo Mineroquímico de Cajati. Com isso, foram conduzidos –

complementarmente – testes de significância para aferição da magnitude das imprecisões geradas a partir das referidas adaptações;

- c) O consumo de ar para combustão de enxofre para a produção de ácido sulfúrico – de 2,97 kg/t. H_2SO_4 – foi obtido de LUTGENS e TARBUCK (1995);
- d) Mesmo com as contribuições acumuladas de massa inferiores a 1% em seus respectivos processos elementares, agentes coletores, depressores e catalisadores foram considerados para efeito de elaboração da ACV, ao nível dos fluxos de entrada elementares;
- e) A unidade de cogeração de energia opera em conformidade com o ciclo de Rankine, sendo sua taxa de conversão de energia térmica em energia elétrica na turbina estimada em 70%. Para a caldeira de vapor, considerou-se que o vapor por ela produzido possuísse as características de vapor superaquecido a 10 bar de pressão. Já o vapor de calda deixa a turbina de recompressão a 0,1 bar de pressão e na forma de vapor úmido ($x = 0,89\%$). As propriedades termodinâmicas destes vapores foram obtidas a partir de fonte específica (MORAN & SHAPIRO, 2006);
- f) Foram consideradas que a estação de tratamento de efluentes líquidos remova 95% de fluoretos e fosfatos presentes nestas correntes líquidos;
- g) O modelo elaborado para o transporte de enxofre, considerou transporte ferroviário entre o site de extração até o porto de embarque. Adicionalmente, considerou-se o transporte transoceânico ocorrendo por navio cargueiro. Em todos os casos analisados usou-se itinerários reais. O transporte entre o porto de Santos e a unidade industrial foi modelado por via rodoviária, a uma distância de 225km;
- h) O descarte de resíduos sólidos inertes gerados no processo ocorreu considerando o destino dos mesmos para aterro industrial. Os aspectos ambientais gerados por esta ação foram modeladas por bancos de dados específicos para este cenário (DOKA, 2009);
- i) Com relação a emissões de energia em formas de ruído e vibração, no âmbito deste projeto não foram consideradas as mesmas. Explica-se que a empresa possui implementado um programa de monitoramento quanto ao impactos que estas emissões possam causar a vizinhança, e os resultados encontram

muito abaixo dos limites estabelecidos. Ressalta-se também que, no capítulo em que trará a tona as propostas para os próximos passos que envolvam a avaliação do desempenho ambiental do processamento estudado, indica-se que, com o aprofundamento dos dados e refinamento das informações, estas emissões sejam consideradas, mesmo que apresentando valores muito pequenos.

- j) Com relação às emissões gasosas, o cenário é o mesmo discutido para emissões de ruído e vibração.
- k) Da mesma forma, aspectos ambientais associados a bens de capital envolvidos no processo não foram consideradas.

5.1.1. Inventários de Ciclo de Vida da produção de Fosfato Bicálcico

Os Inventários de Ciclo de Vida que descrevem consumos de recursos e gerações de rejeitos para a produção de uma tonelada de fosfato bicálcico nas condições em que esta foi ensaiada aparecem indicados nos Apêndices A.1 até A.33 colocados ao final deste trabalho.

Neste arrazoado será possível encontrar também premissas ainda mais específicas que aquelas supramencionadas, as quais funcionaram como recursos de suporte à elaboração do modelo de sistema de produto.

5.1.2. Avaliação de Impactos Ambientais

A avaliação do desempenho ambiental do processo em estudo foi levada adiante com auxílio do software SimaPro 7.0 - versão 7.3 (PRÉ-CONSULTANTS, 2010). A **Figura 5.2** e **Tabela 5.1** apresentam os resultados totalizados do desempenho do processo para cada categoria de impacto analisada. Nestes ainda se incluem as categorias de impacto que foram desconsideradas do estudo para efeito de análise.

A interpretação de resultados se inicia com a uma leitura do desempenho do sistema para a categoria *mudanças climáticas*. Nesta as principais contribuições ocorreram por conta das cargas ambientais associadas à produção de ácido fosfórico, principalmente relacionadas as cargas ambientais que o ácido sulfúrico (matéria prima para fabricação de ácido fosfórico) aporta do sistema. Além desta

contribuição, a queima de gás natural em fornalhas de secagem de FBC contribui com 36% nesta categoria.

Os impactos associados à categoria *depleção da camada de Ozônio* foram considerados residuais. Os resultados observados em termos de *acidificação terrestre* já eram de certa forma esperados, principalmente em virtude de emissões residuais provocadas pelo processo de fabricação de ácido sulfúrico. Em termos de *eutrofização em água doce*, a fonte mais significativa está associada às perdas de fosfato no processo de fabricação de ácido fosfórico.

Figura 5. 2: Perfil de impacto ambiental para a produção de fosfato bicálcico

Tabela 5. 1: Categorias de impacto do processamento de 1 t. de FBC

Categoria de Impacto	Unidade	Total
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	126,72
Depleção do ozônio	kg CFC-11 eq	9,55E-06
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq	3,80
Eutrofização em águas doces	kg P eq	0,09
Eutrofização marinha	kg N eq	0,03
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	31,09
Formação de foto oxidantes	kg NMVOC	0,93
Formação de MP	kg PM ₁₀ eq	0,90
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	0,14
Ecotoxicidade em águas doces	kg 1,4-DB eq	0,30
Ecotoxicidade marinha	kg 1,4-DB eq	0,37
Radiação ionizante	kg U235 eq	13,32
Ocupação de solo agrícola	m ² a	13,04
Ocupação de solo urbano	m ² a	0,77
Transformação de solo natural	m ²	0,04
Depleção de água	m ³	7,42
Depleção de metais	kg Fe eq	2,72
Depleção de fósseis	kg óleo eq	43,61

Nas categorias *toxicidade humana e ecotoxicidade aquática*, destacam-se as perdas de metais e compostos orgânicos no cultivo da madeira, utilizada no processo como fonte de energia térmica, e a produção do catalisador de pentóxido de vanádio, utilizado este na fabricação de ácido sulfúrico.

As principais contribuições em termos de *formação de foto oxidantes* estão associadas a emissões de NO_x provenientes das sucessivas operações de transporte para a importação de enxofre, estas últimas que recaem sobre a produção de ácido fosfórico.

Da mesma forma, estas operações são apontadas como as principais contribuições para a categoria *formação de material particulado*. O uso de defensivos agrícolas no cultivo de madeira para produção de energia é o principal contribuinte nas categorias *ecotoxicidade terrestre e ocupação de solo agricultável*.

Já para a categoria *depleção de água*, as contribuições mais expressivas ocorrem nas etapas de concentração de rocha fosfática e produção de H_3PO_4 e, em termos de *depleção de material fóssil*, pontuam-se o consumo de óleo diesel (movimentação interna à unidade industrial), bem como o consumo de gás natural e energia elétrica proveniente da rede de distribuição nacional.

5.1.3. *Propostas de melhorias no processamento*

Na quarta etapa do método de trabalho, tem início os levantamentos para proposição de arranjos de soluções capazes de reduzir – e na medida da possibilidade até, de eliminar – impactos ambientais significantes associados ao processo em análise. Como hipótese essencial dessas propostas está a conservação do desempenho técnico destes estágios.

A aplicação da ACV ao processo de produção de fosfato bicálcico fez notar que as etapas de processo com contribuições mais expressivas e incidentes para o perfil de impacto determinado na etapa anterior do projeto são: (1) importação de enxofre, a qual impacta na produção de ácido sulfúrico e, posteriormente, produção de ácido fosfórico; (2) fabricação de ácido fosfórico. Além dessas deve merecer destaque (3) a participação da energia elétrica adquirida junto à concessionária, em virtude de sua participação sistêmica ao longo do processo.

A dependência da matriz energética é bastante amortecida no complexo químico, em virtude da cogeração de eletricidade a partir de energia química, ocorrida durante a produção de SO_2 . No entanto, no complexo mineral da Unidade de Cajati, os grid de eletricidade nacional tem participação marcante. Esta situação suscitou que tal fluxo de produto fosse incluído dentro o elenco de alternativas a serem avaliadas no nível de potenciais melhorias por este estudo.

Nesses termos, e de comum acordo com o corpo gerencial da organização, decidiu-se estabelecer três focos principais para aplicação de ações de melhoria. São eles:

- Revisão da logística de importação de enxofre;
- Dimensionamento de sistema para fechamento parcial do circuito de efluentes líquidos com vistas a seu retorno para funções específicas de processo;
- Estudos de implementação de fontes alternativas de energia.

5.2. Alternativa de melhoria nº. I: ACV da logística de importação de enxofre

Incluído no contexto apresentado e, conforme os resultados da ACV realizada para a produção de fosfato bicálcico, pontuou-se que a importação de enxofre para a fabricação de H_2SO_4 poderia se tornar alvo de ações que melhorassem o desempenho ambiental do processo.

Como já apresentado neste documento, a empresa importa enxofre de diversos destinos diferentes, e para o ano de 2011 (cobertura temporal estudada) foi adquirido enxofre proveniente dos seguintes países: Estados Unidos, Canadá, Itália, Alemanha e Rússia, além de Emirados Árabes Unidos e Catar. É do interesse da empresa contar com fornecedores que demonstrem não apenas adequado desempenho ambiental, mas também, que sigam praticando preços acessíveis, e que ofereçam garantias de regularidade de distribuição. Dado o quadro, sobretudo em termos de exigências de parte da organização, decidiu-se que o primeiro passo dentro da presente abordagem seria determinar associativamente, custos e impactos ambientais para o enxofre de cada procedência.

Essas dimensões de análise foram expressadas na forma de indicadores específicos para cada análise, os quais pudessem posteriormente ser relacionados por meio da aplicação de um critério matemático a partir do qual será obtido um indicador único para cada situação. Feito este preâmbulo, passa-se agora a descrever as decisões que foram tomadas para efeito de *Definição de Escopo* dos estudos de ACV a partir dos quais seriam determinados os indicadores ambientais individuais para o enxofre de cada procedência.

Assim como no caso anterior, a definição destes diagnósticos foi baseada nas diretrizes estabelecidas pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14.044 (ABNT 2009a; 2009b). Dessa forma, e quanto à *Definição do Escopo* da avaliação, foram definidos os seguintes requisitos:

Sistema de produto: produção e transporte de enxofre para suprimento de demanda dos processos industriais da unidade de Cajati-SP da empresa Vale Fertilizantes S.A.

Função do sistema de produto: disponibilizar enxofre no Complexo Mineroquímico da Cajati desde os centros de fornecimento fornecedores deste material. A **Figura 5.3** traz indicados os países a partir dos quais a Vale Fertilizantes adquiriu enxofre para operação de sua planta localizada em Cajati.

Unidade Funcional: estabeleceu-se, como unidade funcional do estudo, transportar e fornecer 1.000 kg de enxofre para a unidade industrial em estudo.

Fronteiras do sistema de produto: o sistema de produto sob análise considerou oito subsistemas, a saber: tecnologia de extração de enxofre, modal e distâncias de transporte até o porto de saída de cada país, modal e distâncias de transporte transoceânico entre os portos, modal de transporte entre o porto de Santos-SP e a unidade de Cajati-SP. Tais informações são descritas na **Tabela 5.2**.

Figura 5. 3: Localização dos países fornecedores de enxofre

Crítérios de exclusão: foram excluídos destas análises, aspectos ambientais cujas contribuições de massa e energia apresentaram valores inferiores a 1% em seus processos elementares. Também foram excluídas cargas cujas relevâncias ambientais foram consideradas insignificantes, seguindo as instruções definidas na norma ABNT NBR ISO 14.044 (ABNT, 2009b).

Fontes de dados: as informações constantes da **Tabela 5.2** procedem de dados primários coletados junto a empresa. A partir dos mesmos, calculou-se então os impactos ambientais referentes às atividades de transporte do enxofre, percorrendo as rotas de transporte informadas pela empresa. Para determinação dos aspectos

ambientais gerados em decorrência da extração de enxofre em cada localidade, foram utilizados dados secundários.

Tabela 5. 2: Descritivo do processo de importação de enxofre

País	Tecnologia de Extração de Enxofre	Local da Extração	Modal de transporte até porto de saída	Porto de saída	Transporte entre portos	Porto de chegada
Rússia	Dessulfurização de gás natural	Astrakhan	Hidrovia + Ferrovia	Kavkas, Kerch, Ust Luga	Marítimo	Santos-SP
Alemanha	Refino de petróleo	Brake	Ferrovia	Brake	Marítimo	Santos-SP
Emirados Árabes Unidos	Dessulfurização de gás natural	Abu Dhabi	Rodovia	Ruwaiss	Marítimo	Santos-SP
Canadá	Dessulfurização de gás natural	Edmonton + Calgary	Ferrovia	Vancouver	Marítimo	Santos-SP
Itália	Refino de petróleo	Genoa	Rodovia	Genoa	Marítimo	Santos-SP
EUA	Refino de petróleo	Texas City + Beaumont	Ferrovia	Beaumont + Long Beach	Marítimo	Santos-SP
Catar	Dessulfurização de gás natural	Ras Laffan	Rodovia	Ras Laffan	Marítimo	Santos-SP

Qualidade de Dados: no que se refere à cobertura temporal, foram utilizados dados – primários e secundários – para uma série histórica e contínua definida durante os doze meses de 2011. Em termos de dimensão geográfica, foram identificadas as regiões produtivas dos países fornecedores deste material – **Figura 5.3**. Quanto a dimensão tecnológica, observou-se o sequenciamento das operações estabelecido na descrição da Tabela 5.2.

Metodologia para Avaliação de Impacto: a fim de se obter um perfil de impacto ambiental gerado por um grupo de indicadores de análise, foi selecionado o método ReCiPe Endpoint (H) – versão 1.08 (GOEDKOOP, 2013).

Para a constituição do perfil de impactos ambientais, foram adotadas em uma primeira aproximação todas as categorias de impacto exercitadas pelo método. No entanto, assim como ocorrera antes na elaboração do diagnóstico do processamento de fosfato bicálcico, algumas delas – casos de Eutrofização e Ecotoxicidade Marinha, Radiação Ionizante, Ocupação do Solo Urbano, Transformação de Terra e Depleção de metais – fossem desconsideradas. Os motivos que fizeram com que essas categorias fosse preteridas pela análise já foram descritos anteriormente.

O fato de uma parte significativa da informação empregada nas ACVs originar-se de dados secundários, fez com que fossem definidas premissas específicas para os cenários em análise. Estas aparecem listadas a seguir:

- a) Para os impactos associados as metodologias de extração de enxofre de cada país fornecedor, foram utilizados dados disponíveis em bibliografia;
- b) O modelo elaborado para o transporte de enxofre considerou os itinerários reais para todos os casos. O transporte entre o porto de Santos e a unidade industrial foi modelado por viagens rodoviárias, a uma distância de 225 km;
- c) O descarte de resíduos sólidos inertes gerados no processo ocorreu considerando o destino dos mesmos para aterro industrial. Os aspectos ambientais gerados por esta ação foram modeladas por bancos de dados específicos para este cenário (DOKA, 2009);
- d) Emissões de energia na forma de ruído e vibrações não foram contemplados no estudo;
- e) Da mesma forma, aspectos ambientais associados a bens de capital envolvidos no processo não foram consideradas.

5.2.1. Resultados obtidos

Em termos de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) para a presente análise, encontra-se indicado nos **Apêndices A.4 a A.6** desse estudo exemplos de modelo de sistema de produto para o transporte de enxofre desde o local de produção até a unidade de Cajati. O exemplo escolhido foi aquele que retrata a malha de transportes a partir da Alemanha pelo fato de ali estarem explicitados diferentes modais de transporte.

Com as premissas admitidas para a confecção da ACV referente à importação de enxofre, foi possível construir modelos individuais de sistemas de produtos da aquisição deste material em função da origem do ativo. A utilização do método ReCiPe Endpoint (H) – versão 1.07 do software SimaPro tornou viável a criação de pontuações individuais para a combinação de atividades de extração e transporte do enxofre proveniente de cada um dos países fornecedores.

A **Tabela 5.3** e a **Figura 5.4.** apresenta a compilação de dados referentes ao custo unitário de fornecimento de enxofre (US\$/t.) por cada fornecedor, bem como o desempenho ambiental do ciclo de vida de fornecimento do material, individualizado por país. Da forma como está constituída, permite que fornecedores de enxofre para o complexo de Cajati sejam hierarquizados em termos de seus desempenhos econômico e ambiental. Os dados de custo de enxofre por localidade compreendem despesas com extração e transporte do mesmo até a unidade de Cajati.

Tabela 5. 3: Valores totalizados de custos e impactos ambientais associados ao processo de importação de enxofre

País	Custo Unitário (C) (US\$/t.)	Desempenho Ambiental (E) (Points)
Rússia	227	107
Alemanha	227	94.2
Em. Árabes Unidos	228	102
Canadá	227	103
Itália	227	92.4
USA	217	102
Catar	228	100

Figura 5. 4: Comparativo entre custos operacionais e desempenho ambiental

Para padronizar uma classificação que envolvesse critérios econômicos (custo unitário) associados a critérios ambientais (desempenho ambiental), foi desenvolvido um fator denominado F, obtido a partir de média geométrica – sem aplicação de pesos – entre os parâmetros C (Custo Unitário) e E (Desempenho Ambiental). A **Tabela 5.4** e a **Figura 5.5** apresentam os resultados obtidos.

Tabela 5. 4: Valores do indicador conjugado ambiental-econômico derivados dos custos de importação de enxofre e de seu desempenho ambiental correspondente

País	Custo Unitário (C) (US\$/t.)	Desempenho Ambiental (E) (Points)	$F = (C * E) ^ 0.5$
Rússia	227	107	155.85
Alemanha	227	94.2	146.23
Em. Árabes Unidos	228	102	152.50
Canadá	227	103	152.91
Itália	227	92.4	144.83
USA	217	102	148.77
Catar	228	100	151.00

Figura 5. 5: Indicador de desempenho ambiental associado a importação de enxofre

Considerando-se os resultados obtidos através do indicador F, o fornecimento de enxofre proveniente da Rússia apresenta o pior desempenho econômico-ambiental entre as alternativas em análise (155,85).

No outro extremo de uma possível classificação hierárquica de fornecedores figuram respectivamente, produtos importados da Itália e Alemanha. O indicador mostra o desempenho do enxofre alemão ligeiramente pior – 1,9% – do que daquele distribuído por seu concorrente italiano.

Outro aspecto a ser destacado é a semelhança entre os fatores encontrados para o enxofre importado da América do Norte (Canadá e EUA), com o originário do Oriente Médio (Emirados Árabes e Catar).

Considerando as maiores distâncias transoceânicas do material proveniente da Ásia, o produto originário naquela região do globo faz compensar essa deficiência com menores impactos nos processos de extração.

5.3. Alternativa de melhoria nº. II: ACV do sistema de fechamento do circuito de efluentes líquidos

Ainda de acordo com o contexto discutido sobre os resultados da ACV realizada para o processamento de fosfato bicálcico, a segunda alternativa de melhoria a ser desenvolvida envolve o fechamento do circuito de efluentes líquidos.

O complexo estudado possui operações minerais e químicas, e ambos os processos consomem água em suas atividades. No complexo mineral o consumo total é maior, ao passo que o complexo químico, especialmente as operações de produção de ácido fosfórico, apresentam maiores impactos na qualidade de seus efluentes.

Os resultados da ACV corroboraram para este cenário, indicando como os processos elementares de maior impacto a produção de ácido fosfórico e o beneficiamento de rocha fosfática. Com estas informações, analisou-se em um âmbito geral o impacto que estes dois processos proporcionam nas categorias eutrofização e toxicidade de águas frescas. Neste contexto, a produção de ácido fosfórico se mostrou mais impactante frente ao beneficiamento mineral, e portanto o circuito de fechamento de águas a ser proposta priorizará a recirculação de águas das operações químicas.

Concluída esta avaliação inicial, e alinhada a questão com representantes da empresa, definiu-se os passos a serem seguidos para a modelagem da alternativa a ser simulada, delimitando assim a *Definição de Escopo* do estudo de ACV a ser realizado, tanto para a condição atual (cenário II-A), bem como para a condição proposta (cenário II-B).

Como regra dos modelos utilizados, a definição deste diagnóstico baseou-se em diretrizes estabelecidas pelas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14044 (ABNT 2009a; 2009b). Dessa forma, e quanto à *Definição do Escopo* da avaliação, foram definidos os seguintes requisitos:

Sistema de produto: água de processo utilizada nas atividades industriais associadas à produção de fosfato bicálcico no complexo mineroquímico de Cajati.

Função do sistema de produto: fornecimento de água para suprimento de demandas associadas à produção de fosfato bicálcico no complexo mineroquímico de Cajati.

Unidade Funcional: fornecimento de água para suprimento de demandas associadas à produção de 67,0t fosfato bicálcico no complexo mineroquímico de Cajati. O valor em questão corresponde a produção de uma hora de funcionamento do complexo em condições regulares de operação. Essa decisão foi tomada em virtude das alteração em termos de captação de água bruta e de geração de efluentes para o corpo receptor, motivadas pela remodelação da estação de tratamento de efluentes líquidos (ETEL).

Desta última ação derivou imediatamente, o fechamento de parte do circuito hídrico da planta como poderá ser constatado mais adiante, por conta da descrição do presente cenário de análise.

Fronteiras do sistema de produto: o sistema de produto sob análise está apresentado na **Figura 5.6**, e envolve os sistemas de captação de água bruta, distribuição para as unidades consumidoras, tratamento dos efluentes líquidos gerados, recirculação e descarte de efluentes tratados.

Critérios de exclusão: foram excluídos destas análises, quaisquer aspectos ambientais cujas contribuições de massa e energia apresentaram valores inferiores a 1% em seus processos elementares. Também foram excluídas cargas cujas relevâncias ambientais foram consideradas insignificantes, seguindo as instruções definidas na norma ABNT NBR ISO 14.044 (ABNT, 2009b).

Fontes de dados: a maior parte das informações as quais subsidiaram os modelos dos cenários II-A II-B, a citar, volume de água captada e consumida nos processos, volume de efluentes gerados, insumos para tratamento de efluentes, distâncias de bombeamento de água e efluentes, entre outros, foram coletadas junto a empresa.

As demais informações, como por exemplo o consumo energético nas operações de bombeamento (água e efluentes) foram obtidas através de dados secundários. A partir destes dados foram calculados os impactos ambientais referentes a função do sistema de produto em estudo.

Qualidade de Dados: no que se refere à cobertura temporal, foram utilizados dados – primários e secundários – para uma série histórica e contínua definida durante os doze meses de 2011. Em termos de dimensão geográfica, foi considerado o processamento realizado no complexo industrial no interior do estado de São Paulo.

Quanto à dimensão tecnológica, observou-se o encaminhamento das águas conforme o balanço hídrico apresentado na **Figura 5.6**.

Metodologia para Avaliação de Impacto: a fim de se obter um perfil de impacto ambiental gerado por um grupo de indicadores de análise, foi selecionado o método ReCiPe Midpoint (H) – versão 1.08 (GOEDKOOOP, 2013).

Para a constituição do perfil de impactos ambientais, foram adotadas em uma primeira aproximação, todas as categorias de impacto exercitadas pelo método. No entanto, uma análise dos resultados obtidos fez com que fossem consideradas para efeito das análises dos cenários II-A e II-B apenas recortes em termos de Mudanças Climáticas, Eutrofização em águas doces, Ecotoxicidade e em águas doces, a Depleção de água em si, que funcionou depois como indicador de referência, e a Depleção de fósseis.

O fato de uma parte significativa da informação empregada nas ACVs originar-se de dados secundários, fez com que fossem definidas premissas específicas para os cenários em análise. Estas aparecem listadas a seguir:

- a) Observaram-se apenas aspectos associados à captação, tratamento, uso e ao transporte de água ao longo dos compelsos mineral e químico da planta;
- b) Emissões de energia na forma de ruído e vibrações não foram contemplados no estudo;
- c) Da mesma forma, aspectos ambientais associados a bens de capital envolvidos no processo não foram consideradas.

Figura 5. 6: Balanço hídrico do complexo de Cajati

5.3.1. Resultados obtidos

Em termos de Inventário de Ciclo de Vida (ICV) para a presente análise, encontra-se indicado nos **Apêndices A.31** os dados referentes ao processo de captação de água bruta, a fim de exemplificar o modelo de sistema de produto de uma etapa presente nos dois cenários estudados.

Com as premissas admitidas para a confecção da ACV referente a implantação do circuito de fechamento de água, foi possível a elaboração de modelos individuais de sistemas de produtos para as condições atual e proposta (fechamento de circuito). A proposta de fechamento de circuito prevê a implantação de uma nova estação de tratamento de efluentes dedicada para as correntes originárias nas operações químicas, sendo assim efluentes gerados nas unidades de fabricação de ácido sulfúrico, ácido fosfórico e fosfato bicálcico. Desta feita, um tratamento dedicado a a unidade que mais impacta categorias como depleção de água, eutrofização e ecotoxicidade de águas doces, a produção de ácido fosfórico, estará sendo simulado.

A etapa de tratamento dos efluentes líquidos gerados nas plantas químicas que foi executada no período de cobertura temporal (2011) previa a neutralização de efluentes ácidos com a utilização de uma corrente de lama calária, com posterior agitação para homogeneização. A proposta a ser modelada no cenário II-B, prevê a instalação de uma nova estação de tratamento de efluentes líquidos, alterando o agente neutralizador para cal virgem (em forma de leite de cal).

Para efeito de avaliação dos impactos associados a tal modificação de processo, empregou-se uma vez mais, o método de AICV ReCiPe Midpoint (H) – versão 1.08 (GOEDKOOP, 2013) a fim de manter a conformidade e a corencia com as abordagens anteriores.

Como forma de alimentar o sistema no que tange as correntes líquidas, dimensionou-se os consumos ao longo dos pontos apresentados na **Figura 5.6**, compilando estas informações na **Tabela 5.5**.

Tabela 5. 5: Consumo de água (m³/h) nas correntes indicadas na Figura 5.6

Corrente	Referência	Cenário II-A	Cenário II-B
1	Captação água bruta	3.487,2	2.648,8
2	Perdas evaporação	4,0	4,0
3	Água bruta lavra/britagem	30,0	30,0
4	Efluente operações lavra/britagem	30,0	30,0
5	Água bruta usina	2.454,0	2.374,0
6	Transporte lama e calcário	1.614,0	1.814,0
7	Perdas evaporação	2,0	2,0
8	Over flow barragem de finos	887,0	1.087,0
9	Over flow pilha calcário grosso	725,0	725,0
10	Efluente operação usina	100,0	100,0
11	Lama calcária para neutralização	200,0	0,0
12	Efluente magnetita	460,0	460,0
13	Efluente para sulfato de cálcio	80,0	0,0
14	Água bruta operações ETA	126,0	126,0
15	Água potável	18,8	18,8
16	Efluente sanitário tratado	18,8	18,8
17	Purgas da ETA	36,0	36,0
18	Água desmineralizada	71,2	71,2
19	Água bruta ácido sulfúrico	108,0	85,8
20	Perdas evaporação	80,0	80,0
21	Incorporação ao ácido sulfúrico	22,0	22,0
22	Efluente ácido sulfúrico	77,2	55,0
23	Efluentes para ETEL	77,2	32,0
24	Efluente recirculado	0,0	23,0
25	Água bruta ácido fosfórico	697,0	29,0
26	Perdas evaporação	40,0	40,0
27	Incorporação ao sulfato de cálcio	81,0	81,0
28	Incorporação ao ácido fosfórico	17,0	17,0
29	Efluente ácido fosfórico	581,0	264,0
30	Efluente sulfato de cálcio	161,0	0,0
31	Efluente sulfato de cálcio	0,0	81,0
32	Água bruta fosfato bicálcico	68,2	0,0
33	Perdas evaporação	26,0	26,0
34	Efluente 1 fosfato bicálcico	20,2	4,0
35	Efluente 2 fosfato bicálcico	28,3	0,0
36	Incorporação ao fosfato bicálcico	10,7	10,0
37	Efluentes químicos tratados	878,4	30,0
38	Recirculação efluentes ácido fosfórico	0,0	270,0
39	Efluente canal de drenagem	1.712,5	674,8
40	Perdas evaporação	2,0	2,0
41	Efluente final	3.322,5	2.484,8

A partir de então, avaliou-se os desempenhos dos cenários, obtendo os valores apresentados na **Tabela 5.6**.

Tabela 5. 6: Categorias de impacto das alternativas II-A e II-B

Categoria de Impacto	Unidade	Cenário II-A	Cenário II-B
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	94,94	5998
Eutrofização em águas doces	kg P eq	241,6	12,54
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	437,2	22,89
Ecotoxicidade em águas doces	kg 1,4-DB eq	26571	1370
Depleção de água	m ³	3488	2655
Depleção de fósseis	kg óleo eq	21,47	839,7

A **Tabela 5.7** descreve a criação de um indicador de desempenho. Este procedimento se assemelha àquele efetuado para o Cenário I, quando as dimensões ambiental e econômica foram conjugadas para efeito de análise.

No caso presente, decidiu-se estimar a magnitude os efeitos em termos de Mudanças Climáticas, Eutrofização, Ecotoxicidades terrestre e em águas doces, e de Depleção de Recursos fósseis em termos específicos, por metro cúbico de água captada. A seguir os resultados obtidos para o Cenário II-A para cada categoria de impacto em análise, foram divididos por seus correspondentes para o Cenário II-B. Essa ação buscou permitir identificar a magnitude relativa de II-A → II-B com respeito aos impactos ambientais da remodelação da ETEL e do fechamento de circuito de efluentes

Tabela 5. 7: Categorias de impacto das alternativas II-A e II-B com inclusão de índice de relação

Categoria de Impacto	Unidade	Cenário II-A	Cenário II-B	Razão R (= I_{CIIA}/I_{CIIIB})
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	0,027	2,259	0,012
Eutrofização em águas doces	kg P eq	0,069	0,0047	14,66
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	0,125	0,0086	14,54
Ecotoxicidade em águas doces	kg 1,4-DB eq	7,618	0,516	14,76
Depleção de fósseis	kg óleo eq	0,006	0,316	0,019

Considerando-se os resultados obtidos, verifica-se que o cenário II-B apresentou reduções nas categorias de eutrofização e ecotoxicidade de águas doces e ecotoxicidade terrestre, reduções relacionadas a redução nas concentrações de fósforo no efluente final. Além disso, houve também uma redução de 24% na captação de água bruta para os processos.

Em contrapartida, as categorias de depleção de fósseis e mudanças climáticas apresentaram valores mais impactantes no cenário II-B. Com relação a emissões de CO₂ em comparação com a produção de 1,0 tonelada de FBC, o acréscimo foi de aproximadamente 70 kg CO₂ eq.. Este valor não está associado as operações da nova estação de tratamento de efluentes simulada para o cenário II-B, mas estão associados a cargas ambientais referentes a produção de cal virgem ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), somadas ao transporte deste material até o complexo de Cajati.

5.4. Alternativa de melhoria nº. III: ACV de fontes alternativas de energia

Por fim, e ainda alinhado com as alternativas propostas, será confeccionada a ACV referente a utilização de fontes alternativas de energia a energia elétrica adquirida junto a concessionária. Esta parte do estudo, além de vislumbrar melhorias no desempenho ambiental do processamento, busca da mesma forma atender a interesses da empresa na busca por alternativas energéticas

Inicialmente, o estudo realizou um levantamento dos consumos de energia elétrica em cada planta industrial existente na unidade, assim como a fonte desta energia. Como já descrito no capítulo sobre o processamento de ácido sulfúrico, esta unidade possui um sistema de reaproveitamento do vapor gerado, e a transformação de parte de parte desta energia térmica em energia elétrica em um turbo gerador. Esta energia gerado nesta operação abastece grande parte das plantas de produção de ácido sulfúrico, ácido fosfórico e fosfato bicálcico.

Em contrapartida, as operações realizadas nos setores da mineração não recebem aporte de energia proveniente da cogeração, e transformam-se assim nos maiores consumidores de energia elétrica proveniente da rede, a saber: 10% consumida nas operações de lavra e britagem e 79% consumida nas operações da usina de beneficiamento. A **Tabela 5.8** apresenta as distribuições dos consumos de energia elétrica advinda da rede e de cogeração.

Tabela 5. 8: Distribuição dos consumos de energia elétrica (rede x cogeração)

Etapas do processo	Rede	Cogeração
Lavra e Britagem	10%	0%
Usina de Beneficiamento	79%	0%
Prod. Ác. Sulfúrico	1%	24%
Prod. Ác. Fosfórico	3%	43%
Fosfato bicálcico	7%	33%

Concluída este levantamento, representantes da empresa decidiram que os estudos de fontes alternativas de energia deveriam ser realizados naquela que foi, ao longo de 2011, a maior consumidora de energia proveniente da rede, a usina de beneficiamento.

Em paralelo, avaliou-se qual etapa do processo de beneficiamento mineral apresentava-se como a mais impactante no que tange o consumo de eletricidade, identificando as operações de moagem (vide **Figura 3.7**, capítulo 3), como sendo a responsável por aproximadamente 35% do total de energia elétrica consumida na usina.

Propuseram-se assim, oito combinações factíveis para serem simuladas, utilizando-se como fonte de energia alternativa duas matrizes já utilizadas em fornos de secagens industriais que operam na unidade: cavaco de madeira e gás natural. A **Tabela 5.9** apresenta as combinações propostas para o cenário III.

Concluídos estes levantamentos e as definições estabelecidas, definiu-se os passos a serem seguidos para a modelagem das combinações propostas, delimitando assim a *Definição de Escopo* do estudo de ACV a ser realizado, tanto para a condição atual (cenário III-A), bem como para as condições a serem simuladas (cenários III-B a III-H).

Tabela 5. 9: Combinações propostas de fontes alternativas de energia

Cenários	Combinações
Cenário III-A	100% rede
Cenário III-B	100% GN
Cenário III-C	100% cavaco
Cenário III-D	50% GN + 50% cavaco
Cenário III-E	65% rede + 35% GN
Cenário III-F	65% rede + 35% cavaco
Cenário III-G	35% rede + 65% GN
Cenário III-H	37,5% rede + 62,5% cavaco

Com estes alinhamentos, serão apresentadas as decisões definidas para a *Definição de Escopo* dos estudos de ACV, que novamente baseou-se nas normas ABNT NBR ISO 14040 e 14.044 (ABNT 2009a; 2009b). Assim sendo, quanto à *Definição do Escopo* da avaliação, os seguintes requisitos foram definidos:

Sistema de produto: energia elétrica adquirida junto à concessionária e utilizada nas atividades industriais desenvolvidas na etapa de beneficiamento de rocha fosfatada com vistas à produção de fosfato bicálcico no complexo mineroquímico de Cajati.

Função do sistema de produto: fornecimento de eletricidade para suprimento de demandas associadas à produção de fosfato bicálcico no complexo mineroquímico de Cajati.

Unidade Funcional: atender a demanda de eletricidade originalmente provida pela concessionária e que será necessária à produção de 1,0t de fosfato bicálcico na forma como a presente tecnologia é praticada.

Fronteiras do sistema de produto: o sistema de produto sob análise considerou três sistemas para obtenção de energia elétrica, a saber: rede concessionária, queima de gás natural e queima de cavaco de madeira.

Critérios de exclusão: foram excluídos destas análises, quaisquer aspectos ambientais cujas contribuições de massa e energia apresentaram valores inferiores a 1% em seus processos elementares. Também foram excluídas cargas cujas

relevâncias ambientais foram consideradas insignificantes, seguindo as instruções definidas na norma ABNT NBR ISO 14.044 (ABNT, 2009b).

Fontes de dados: as informações referentes aos valores de demanda energética foram coletadas a partir de dados primários (**Tabela 5.8**). A partir dos mesmos, calculou-se então através de dados secundários as demandas de combustíveis alternativos para se atingir os cenários descritos na **Tabela 5.9**.

Após levantamento quanto à tecnologias disponíveis para o atendimento da função do estudo, optou-se pela adoção de ciclo combinado de cogeração Termodinâmica, via ciclo Rankine. O provimento de energia foi considerado como sendo originário de duas fontes potenciais: gás natural e cavacos.

No caso do gás natural admitiu-se que este se originasse da matriz gasífera nacional, e portanto, aparte das contribuições offshore das bacias de Campos (RJ) e de Santos (SP), seria considerada também a produção escoada a partir do Gasoduto Brasil-Bolívia. Em 2010, esta fonte atendeu a 43,8% da demanda interna do país (BEN, 2011).

Em termos de tecnologia, o gás natural é queima em uma fornalha e, os gases de combustão derivados dessa transformação acionam o ciclo combinado. Após essa ação, estes são lançados na atmosfera, não sem antes serem tratados em sistemas de controle de poluição para arrefecer seus efeitos.

A alternativa que considera cavacos como meio de provimento de energia térmica para o ciclo Rankine opera de maneira ligeiramente diferente. A queima desse insumo produz vapor superaquecido o qual movimentava um motor elétrico, de onde se produz a energia para abastecer a usina de beneficiamento.

No entanto, a energia acumulada pelo vapor é suficiente ainda para atender a outros demandas da planta, agora em termos de energia térmica. Nesse contexto, foram experimentadas dentre os cenários em análise, alternativas nas quais essa fonte de calor substitui a queima de cavacos para secagem da calcita – depois empregada na produção do fosfato bicálcico –, e do produto final em si. O processo de secagem da calcita consome cerca de 260MJ/t concentrado fosfatado. A secagem do fosfato bicálcico ocorre em duas linhas paralelas sendo uma, abastecida também por cavacos (692MJ/t FBC) e outra, por gás natural (732MJ/t FBC).

Para efeito de definição das alternativas avaliadas pelo Cenário III admitiu-se, quanto à substituição da energia térmica que:

- a) O suprimento da demanda de energia térmica para secagem da calcita na usina de beneficiamento terá sempre prioridade de uso da energia cogenerada sobre as demais possibilidades de uso desta fonte.
- b) A energia gerada pela quima de cavacos substituiria a sempre que possível a demanda maior das unidades de secagem de fosfato bicálcico;
- c) A demanda que não puder ser atendida pela unidade de cogeração seguirá sendo suprida por sua fonte original.
- d) O consumo de entalpia do vapor será dimensionado dentro de limites bem definidos, de forma que não haja saturação desta corrente, o que originaria problemas de qualidade de produto tanto na secagem da calcita como do FBC.

Qualidade de Dados: no que se refere à cobertura temporal, foram utilizados dados – primários e secundários – para uma série histórica e contínua definida durante os doze meses de 2011. Em termos de dimensão geográfica, as modelagens foram realizadas para uma unidade industrial no interior do estado de São Paulo.

Metodologia para Avaliação de Impacto: a fim de se obter um perfil de impacto ambiental gerado por um grupo de indicadores de análise, foi selecionado o método ReCiPe Midpoint (H) – versão 1.08 (GOEDKOOOP, 2013).

Para a constituição do perfil de impactos ambientais para cada cenário, foram adotadas em um primeiro momento, todas as categorias de impacto exercitadas pelo método. No entanto, em uma análise crítica, identificou-se que as únicas categorias que sofreram variação significativa ao longo dos ensaios foram as categorias mudanças climáticas, toxicidade humana, uso do solo agriculturável e depleção de fósseis. .

Novamente, o fato de existirem informações utilizadas nestas modelagens que foram empregadas de dados secundários fez com que fossem definidas premissas específicas para os cenários em análise. Estas aparecem listadas a seguir:

- a) Emissões de energia na forma de ruído e vibrações não foram contemplados no estudo;

- b) Aspectos ambientais associados a bens de capital envolvidos no processo não foram consideradas.

5.4.1. *Resultados obtidos*

Apresenta-se em anexo, a **Tabela 5.10**, com as categorias de impacto das alternativas III-A a III-H, onde representa-se em destaque as categorias de impacto priorizadas.

Conforme já explicado anteriormente, a avaliação será realizada sob as categorias de impacto que mais apresentaram variações nos resultados obtidos.

Dentre elas, encontram as categorias de mudanças climáticas e depleção de fósseis, que apresentaram resultados homogêneos entre si ao longo dos ensaios. O melhor desempenho sob o ponto de vista destas categorias ocorreu no cenário III-D (100% cavaco de madeira). Este valor está associado a dois fatores: (1) redução do consumo de energia elétrica proveniente do grid e; (2) possibilidade de utilização da sobra excedente de calor em secagens movidas a gás natural (planta de FBC).

Esta alternativa é exclusiva deste cenário, e justifica os benefícios, ainda maiores na categoria de depleção de fósseis.

Tabela 5. 10: Categorias de impacto das alternativas III-A a III-H

Categoria de Impacto	Unidade	III-A	III-B	III-C	III-D	III-E	III-F	III-G	III-H
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq	126,72	130,43	83,90	127,06	128,02	125,71	129,13	127,70
Toxicidade humana	kg 1,4-DB eq	31,09	30,81	54,96	32,13	31,00	31,98	30,91	35,96
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	0,14	0,13	0,30	0,14	0,13	0,14	0,13	0,17
Ocupação de solo agrícola	m ² a	13,04	13,03	33,38	14,28	13,04	14,01	13,04	19,73
Depleção de fósseis	kg óleo eq	43,61	46,28	24,47	44,66	44,54	43,40	45,34	42,64

As **Figuras 5.7, 5.8 e 5.9** apresentam os valores das categorias discutidas, tanto individualmente, quanto em associação.

Figura 5.7: Perfil de impacto para a categoria mudanças climáticas

Figura 5.8: Perfil de impacto para a categoria depleção de fósseis

Figura 5. 9: Comparação entre os perfis de impacto para as categorias mudanças climáticas e depleção de fósseis

Quanto a categoria de toxicidade humana, destacam-se nos cenários III-A e III-B as perdas de fósforo ocorridas no processo como um todo. Quanto ao cenário III-C, está associada aos processos que envolvem consumo de cavaco para atendimento da demanda adicional proposta nesta simulação. A **Figura 5.10** apresenta os resultados dos perfis de impacto das categorias.

Figura 5. 10: Perfil de impacto para a categoria toxicidade humana

Quanto aos impactos associados a ecotoxicidade terrestre, ressalta-se a contribuição gerada pela queima de biomassa no cenário III-A (100% energia da rede). Esse efeito aparece, dada a participação de energia de biomassa no grid brasileiro que é de 6,60% (BEN, 2011), e por meio desta, da perda de defensivos agrícolas como Diuron e Carbofuran.

Destaca-se no cenário III-B novamente as perdas de Diuron via biomassa do grid brasileiro, efeito semelhante ao verificado no cenário III-A. Além disto, associa-se ao resultado perdas de fósforo ocorridas no processo de beneficiamento deste minério.

No cenário III-C, destaca-se o impacto propiciado pelo fósforo associado ao plantio e ao cultivo de madeira para geração de cavaco, além de defensivos como o Diuron.

A **Figura 5.11** apresenta os perfis de impacto dos cenários estudados para a categoria ecotoxicidade terrestre.

Figura 5. 11: Perfil de impacto para a categoria exotoxicidade terrestre

Por fim, são apresentados os valores referentes a categoria ocupação de solo agriculturável. Como era de se esperar, os maiores impactos encontram-se no cenário onde projeta-se o uso de cavaco como matriz energética para suprir as demandas da usina de beneficiamento. A **Figura 5.12** ilustra estes altos valores para o cenário III-C. A **Figura 5.13** apresenta os valores normalizados para os perfis de impacto das categorias

Figura 5. 12: Perfil de impacto para a categoria ocupação de solo agriculturável **Figura 5. 13:** Perfil de impacto com valores normalizados (tox. humana x ecotox. terrestre x ocupação de solo agriculturável)

Com os resultados apresentados, conclui-se que o cenário onde a matriz energética cavaco irá suprir toda a demanda energética da usina apresentou desempenho ambiental benéfico sob o ponto de vista de mudanças climáticas e depleção de fósseis, muito por conta da característica de reaproveitamento do calor gerado na

queima deste combustível, que pode suprir demandas por gás natural em outras plantas do complexo.

Por outro lado, os resultados também demonstraram que ao se utilizar esta opção de combustível em substituição a energia da rede concessionária, o desempenho em categorias relacionadas a impactos sob a toxicidade (humana e terrestre) pior do ponto de vista ambiental, principalmente por associação ao uso de defensivos agrícolas no cultivo da madeira. Outra categoria impactada, esta de madeira direta, é a ocupação de solo agriculturável, uma vez que será necessário áreas para o plantio e cultivo da madeira que fornecerá o cavaco excedente (aporte de cavaco como combustível na usina de beneficiamento).

Mais uma vez, a técnica da Avaliação do Ciclo de Vida se mostrou eficaz no fornecimento de informações para o processo de tomada de decisão.

6. Conclusões

Os desenvolvimentos efetuados tornaram possível identificar por meio do diagnóstico proporcionado pela ACV que os impactos ambientais mais relevantes associados à produção de fosfato bicálcico residem na importação de enxofre e na fabricação de ácido fosfórico. Na busca de alternativas energéticas para a eletricidade adquirida junto a rede, e por conter os seus impactos ambientais, este trabalho também estudou oportunidades para a redução da energia elétrica adquirida da concessionária.

A partir de uma ação conjunta realizada por todos os envolvidos na iniciativa, projetou-se, com base nesses mesmos resultados, três focos de ações de melhoria de desempenho. O primeiro deles – de revisão a partir da implementação de critério econômico-ambiental – tornou possível empreender uma hierarquização dos fornecedores de enxofre para a unidade industrial. Os próximos trabalhos a serem realizados em consonância com o tema deverão definir, a partir de critérios pré-estabelecidos, a quantidade de fornecedores que integrará cada arranjo a ser testado.

O segundo foco de ação atuou em propostas de fechamento de circuito de efluentes de processo. Neste caso, considerou-se a possibilidade de recirculação de 90% dos efluentes das plantas químicas, em comparação com a situação real operada na dimensão espacial estudada. Foram identificadas melhorias no cenário proposto para categorias de eutrofização e toxicidade (terrestre e em águas doces), além da redução de 25% de água bruta captada. Em contrapartida, cargas ambientais associadas a fabricação do agente neutralizador proposto trouxeram impactos ambientais ao ciclo de vida deste novo cenário, no que tange as categorias de mudanças climáticas e depleção de fósseis.

Da mesma forma, foram simuladas algumas matrizes energéticas que fossem capazes de suprir certa quantidade de energia elétrica pré-determinada adquirida junto à concessionária. Os resultados demonstraram que a utilização de biomassa mostrou-se ser a melhor alternativa para o caso estudado, não apenas em virtude de suprir a demanda projetada, mas por possibilitar a geração de calor em excesso,

que pode ser direcionado para outras etapas do processamento. Para a outra matriz energética testa, não foi possível obter esta fonte adicional de energia.

Por fim, observe-se que a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida possibilitou introduzir de maneira satisfatória, proativa e consistente a variável ambiental no processo de tomada de decisão gerencial da organização.

7. Recomendações e Trabalhos Futuros

Com vistas a continuidade das atividades que encerram este projeto, recomenda-se ações futuras que desencadeiem na manutenção dos resultados obtidos, bem como no alcance de novos desafios.

Vale ressaltar que, pela complexidade das operações existentes na unidade industrial estudada, restam ainda flancos para avanços em estudos referentes a avaliações acerca do desempenho ambiental deste processamento.

Recomenda-se a realização de uma avaliação sistêmica de todo o processo. Os cenários apresentados foram avaliados de maneira individualizada, sem qualquer ponto de influência entre si. Sugere-se agora que os próximos passos visem ajustar as aderências e integração entre eles. A evolução desta integração visa aperfeiçoar as condições do processamento com o aporte da variável ambiental, buscando o melhor resultado possível.

Por fim, prevê-se também que esta integração de cenários bem como a otimização das avaliações venham a refletir em termos tecnológicos e econômicos e, portanto, dever-se-á ser otimizada uma revisão mais ampla do processo, incluindo estes vieses.

8. Referências Bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ABNT NBR ISO 14040: **Gestão Ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida: definição de objetivo e escopo e Análise de Inventário**. São Paulo: ABNT, 2009a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ABNT NBR ISO 14044: **Gestão Ambiental, Avaliação do Ciclo de Vida: requisitos e orientações**. São Paulo: ABNT, 2009b.

ALTHAUS, H-J.; HISCHIER, R.; OSSES, M.: **Life Cycle Inventories os Chemicals. Ecoinvent report n.º 08**. 541-542 p. Ecoinvent Centre. Dübendorf, 2007.

ANDERY, P. A.; **Concentração de apatita do carbonatito de Jacupiranga, Estado de São Paulo**. Tese de doutorado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 1967.

BAUMANN H.; TILLMAN A.M.: **The hitchhiker's guide to LCA**. Suécia: Studentlitteratur AB, 2004.

BECKER, P.: **Phosphates and phosphoric acid**. Marcel Dekker. New York, 1983, 585 p.

BOCK, B. J.; HARMON, D. L.; BRAND JUNIOR, R. T.; SCHNEIDER, J. E. **Fat and calcium level effects on finishing steer performance digestion and metabolism**. Journal of Animal Science, Champaign, v. 69, n. 5, p. 2211- 2224, May 1991.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Balanço Energético Nacional (BEN) – Ano Base 2011**. Brasília, 2012. 282p.

BRENTROP, F.; KÜSTERS, J.; KUHLMANN, H., LAMMEL, J.: **Application of the Life Cycle Assessment methodology to agricultural production: an example of sugar beet production with different forms of nitrogen fertilizers**. 221-223 p. European Journal of Agronomy 14. 2001.

BRENTROP, F.; KÜSTERS, J.; LAMMEL, J.; BARRACLOUGH, P.; KUHLMANN, H.: **Environmental impact assessment of agricultural production systems using life cycle assessment (LCA) methodology II. The application to N fertilizer use in winter wheat production systems**. 265-279 p. European Journal of Agronomy 20. 2004.

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

CEDERBERG, C., MEYER, D., FLYSJO, A. **Life cycle inventory of greenhouse gas emissions and use of land and energy in Brazilian beef production**. The Swedish Institute for Food and Biotechnology, Gothenburg, Sweden. 2009

CEDERBERG, C., PERSSON, M., NEOVIUS, K., MOLANDER, S., CLIFT, R. **Including carbon emissions from deforestation in the carbon footprint of Brazilian beef**. Environ. Sci. Technol. 2010.

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

CHEHEBE, J.R.B.: **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

CONRAD, J.H.; McDowell, L.R.; Ellis, G.L.; et al., **Mineral para ruminantes em pastejo em regiões tropicais**. Dept. of Animal Science, University of Florida, Gainesville. 1985. 90 p.

DEUTSCHE BANK. **Laudo de Avaliação da Vale Fertilizantes S.A.** 2011

DOKA, G.: **Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Part II – Landfills – Underground deposits – Landfarming Ecoinvent report n.º 13**. 140 p. Ecoinvent Centre. Dübendorf, 2009.

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.

GALOPIM DE CARVALHO, A. M. Geologia Sedimentar. Vol. III. **Rochas Sedimentares**. Âncora, Lisboa, 2006. 332 p.

GOEDKOOP, M., et. al. **ReCiPe 2008 - a life cycle assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and endpoint level**. First Edition. Netherlands: Ministerie van Volkshuisvesting, 2013.

HANSEN, A.P.: **Análise do efeito em termos de desempenho ambiental da substituição de eteno de origem fóssil por equivalente renovável na produção de poliestireno**. 229 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

HAVLIN, J.L., J.D. BEATON, S.L. TISDALE, W.L. NELSON. **Soil Fertility and Fertilizers**. 7th Ed. Pearson Prentice Hall, N.J. 2005.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: **Produção da Pecuária Municipal 2009, 2010 e 2011**. Brasília, 2012.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: **Produção da Pecuária Municipal 2012**. Brasília, 2013.

KETZIEN, G.T. **Modern Sulfuric Acid Practice. Proceedings**. Fertilizer Society. London, 1974. nº140.

KOWALSKI, Z.; KULCZYCKA, J.; SKOWRON, G.; SOBCZAK, A.: **Comparative evaluation of calcium feed phosphate production methods using life cycle assessment**. 2007.

KULAY, L, A.: **Desenvolvimento de modelo de análise de ciclo de vida adequado às condições Brasileiras: aplicação ao caso do Superfosfato Simples**. 153 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KULAY, L, A.: **Uso da análise de ciclo de vida para comparação do desempenho ambiental das rotas úmida e térmica de produção de fertilizantes fosfatados**. 314 p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

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.

- LUTGENS, F.K.; TARBUCK, E.J.: **The Atmosphere**. 14-17 p. Prentice Hall, 6th ed. 1995.
- MARTINHO, H.M.; KULAY, L.: **Evaluation of the Dicalcium Phosphate process with a view to environmental performance improvement identification**. CILCA 2013 – 5th International Conference on Life Cycle Assessment. Mendoza, Argentina. 2013.
- MARTINHO, H.M.; KULAY, L.: **Incorporation of Life Cycle Management in producing Dicalcium Phosphate: A Brazilian experience**. LCM 2013 – 6th International Conference on Life Cycle Management. Gothenburg, Sweden. 2013.
- MANJARE, S.; MOHITE, R.: **Application Life Cycle Assessment to Diammonium Phosphate Production**. 256-265 p. Advanced Materials Research Vols. 354-355. 2012.
- MCMURRY, J.; FAY, R. C. **Chemistry**. 4th Ed. Prentice Hall. 2004. pp. 841–2.
- MOGENSEN, L.; HERMANSEN, J.E.; HALBERG. N.; DALGAARD, R. VIS, J.C.; SMITH, B.G.: **Sustainability in the food industry. Chapter 5: Life cycle assessment across the Food Supply Chain**. Ed. C. Baldwin, Iowa, USA, 2009
- MONTEIRO, M. F.: **Avaliação do Ciclo de Vida do Fertilizante Superfosfato Simples**. 177 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2008.
- MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N.: **Fundamentals of engineering Thermodynamics**. 770-772 p. John Wiley & Sons, Inc, 5th ed. 2006.
- MOURAD, A.L.; GARCIA, E.E.; VILHENA, A.: **Avaliação do ciclo de vida: princípios e aplicações**. Campinas: CETEA; ITAL, 2002.
- MÜLLER, H. Sulfuric Acid and Sulfur Trioxide. In: Ulmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Weinheim, Graphischer Betrieb Konrad Triltsch, 5th edition. 1994. 644-647 p. (Volume A 25).
- NIE, S., GAO, W., CHEN, Y., SUI, P., ENEJI, A. E.: **Use of life cycle assessment methodology for determining phytoremediation potentials of maize-based cropping systems in fields with nitrogen fertilizer over-dose**. 1530-1534 p. Journal of Cleaner Production 18, 2010.
- OGINO, A.; ORITO, H.; SHIMADA, K.; HIROOKA, H.: **Evaluating environmental impacts of the Japanese beef cow–calf system by the life cycle assessment method**. 424-432 p. Animal Science Journal 78, 2007.
- PEREIRA, S.W.: **Análise Ambiental do Processo Produtivo de Pisos Cerâmicos. Aplicação de Avaliação do Ciclo de Vida**. 123 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- PRÉ CONSULTANTS. **Methodological Approach Manual**. SimaPro, 7.0 – v. 7.3. 2010. Amersfoort, Netherlands.
- RIBEIRO, P.H.: **Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados**. 343 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ROSA, I. V.: Suplementação mineral de bovinos sob pastejo. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE FORRAGEIRAS E PASTAGENS**, 1994, Campinas. Anais... [S.l.]: Colégio Brasileiro de Nutrição Animal, [1994]. p. 213-243

ROSATI, A.F.R.: **Efeito do fosfato bicálcico ou monobicálcico sobre a digestibilidade ruminal do feno de coast-cross**. 62 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia – Universidade de São Paulo – Piraçununga, 2009.

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). 1997. 61-64 p.

SANTIN, J. C.: **FÓSFORO: ORIGEM, IMPORTÂNCIA E USOS**. Palestra realizada na FEICORTE – Feira Internacional da Cadeia Produtiva da Carne. 17 a 21 de junho de 2013. São Paulo.

SANTOS, C.: **Prevenção à Poluição Industrial: Identificação de Oportunidades, Análise dos Benefícios e Barreiras**. 287 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SINDIRAÇÕES Sindicato Nacional da Indústria de Alimentação Animal: **Setor de Alimentação Animal – Boletim Informativo do Setor**. 2013

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.

SILVA, A.L.R.T.: **Desenvolvimento de fatores de normalização de impactos ambientais regionais para Avaliação de Ciclo de Vida de produtos no Estado de São Paulo**. 138 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

SILVA, G.A.; KULAY, L. A.: **Application of Life Cycle Assessment to the LCA Case Studies Single Superphosphate Production**. 209-214 p. Journal of Life Cycle Assessment, 2003

SILVA, G.A.; KULAY, L.A.: **Avaliação do Ciclo de Vida**. In: VILELA JUNIOR, A.; DEMAJOROVIC, J. “Modelos de ferramentas de gestão ambiental: desafios e perspectivas para organizações”. São Paulo. Editora Senac, 2006.

SILVA, G.A. Disciplina PQI 5849: **Fundamentos da Proteção Ambiental e Segurança de Processos Industriais**. Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

SLACK, A.V.: **Phosphoric acid**. Marcel Dekker. V.1 part 1. New York, 1968, 503p.

TRAINA, F.: **Sulphuric acid catalyst fundamental and kinetic aspects adiabatic reator optimization**. In Encontro Técnico Ácido Sulfúrico. São Paulo. PETROFERTIL/ABIQUIM. 1984 V.2. 175 p.

TOKARNIA, C. H.; DÖBEREINER, J. & MORAES, S. S.: **Situação atual e perspectiva da investigação sobre nutrição mineral em bovinos de corte no Brasil**. Pesquisa Veterinária Brasileira, Rio de Janeiro, V.8, n.1/2, p. 1-16, jan./ jun. 1988.

TOKARNIA, C. H.; DÖBEREINER, J.; PEIXOTO, P. V.: **Deficiências minerais em animais de fazenda, principalmente bovinos em regime de campo**. Pesquisa Veterinária Brasileira, Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p. 127-138, jul./set. 2000.

TREWIN, N. H.; DAVIDSON, R. G.: **Lake-level changes, sedimentation and faunas in a Middle Devonian basin-margin fish bed**. Journal of the Geological Society 156 (3): 535–548. 1999.

VALE FERTILIZANTES S.A. – **Processo de produção de fosfato bicálcico** – Unidade Mineral de Cajati (SP). Descritivo de processo. Documento interno. 2008.

VALE FERTILIZANTES S.A. – **Desempenho Econômico e Operacional. 1T13**. 2013.

WERF, H. M. G; PETIT, J; SANDERS, J.: **The environmental impacts of the production of concentrated feed: the case of pig feed in Bretagne**. 153-177 p. Agricultural Systems, 2005.

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 07/05/2014

ZUMDAHL, S. S.: **Chemical Principles** 6th Ed. Houghton Mifflin Company. 2009. A22. ISBN 0-618-94690-X.

APÊNDICES

APÊNDICE A.1 – Inventário do processo de extração de rocha fosfática

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
phosphatic rock, 4.5% P2O5, in mining/BR U	1	ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Observação: Foram desconsideradas, por critério de contribuição mássica cumulativa, as entradas da tecnosfera de emulsificantes anfóteros, emulsificantes catiônicos e aniônicos, explosivos, cordéis e detonadores elétricos e não elétricos. Critério de alocação: mássico.
gravel	0,1163115	ton	
oil sludge, from mining/BR U	0,0000015	ton	
Resources			
Phosphorus, 18% in apatite, 4% in crude ore, in ground	2,9688	ton	
Occupation, mineral extraction site	0,0144	m²a	
Occupation, construction site	0,0011	m²a	
Transformation, from pasture and meadow	0,00072	m²	
Transformation, to mineral extraction site	0,00072	m²	
Transformation, from mineral extraction site	0,00072	m²	
Transformation, to pasture and meadow	0,00072	m²	

Water, river	0 m ³	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Admitiu-se não haver consumo de água no processo de extração de rocha fosfatada.
--------------	------------------	--

Electricity/heat		
Diesel, burned in diesel-electric generating set*/BR U	49,62 MJ	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Consumo de diesel para geração de energia: $c = 1,375 \text{ L/t RF } 4,5\%$ minerada. Expressando isso em termos energéticos: $E = 1,375 \text{ L} * 8620 \text{ kcal/L} *$ $4,186 \text{ kJ/kcal}/1000 \text{ kJ/MJ} =$ 49,6145MJ.

Emissions to air		
Particulates, unspecified	8,22 kg	Dado secundário (Banco de Dados Ecolnvent).

Final waste flows		
Mineral waste, from mining	1,8524341 ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Representa as perdas de material estéril do processo de mineração.

Waste to treatment		
Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	0,0036 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Representa as perdas de resíduos diversos do processo de mineração.

APÊNCIDE A.2 – Inventário do processo de britagem de rocha fosfática

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
phosphatic rock, 4.5%P ₂ O ₅ , at grinding/BR U	1	ton	
Materials/fuels			
phosphatic rock, 4.5% P ₂ O ₅ , at transportation/BR U	1,05	ton	
Raw water, at transportation*/BR U	0,0002126	m ³	<p>Valor do consumo de água é dado primário fornecido por Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Acrescentou-se a este as cargas ambientais decorrentes do transporte do fluido, obtidas em dados secundários (Banco de Dados Ecoinvent).</p> <p>Admitiu-se ainda, com base nas informações prestadas pela organização, que a água empregada na britagem (aspersores) não recebe tratamento preliminar.</p> <p>Além disso, considerou-se ainda que a água fosse totalmente incorporada à rocha britada, seguindo assim para a etapa seguinte de processamento. Esta condição leva a não geração de perdas líquidas no processo.</p>

Electricity/heat			
Electricity 2011, medium voltage, at grid/ BR	1,99	kWh	<p>Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).</p> <p>Valor correspondente ao consumo efetivo da moagem da rocha (de 1,9558 kwh/t rocha) ao qual se adicionou a fração atribuída ao setor, da energia consumida pelas bombas de captação de água bruta. Esta parcela foi determinada por meio de ponderação entre o volume de água consumido pela moagem e o total de água consumido pela unidade.</p>

Emissions to air			
Particulates, unspecified	low. pop.	0,05	<p>EPA (1995) - Environmental protection Agency. Mineral Products Industry. Phosphate rock processing. Chapter 11. 1995.</p> <p>Tendo em vista a referencia de EPA (1995) para moagem de rocha fosfatada a úmido, considerou-se emissão nula de MP.</p>

Waste to treatment			
Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	0,0018	ton	<p>Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).</p> <p>Usados para representar resíduos diversos do processo de britagem encaminhados para aterro industrial.</p>

APÊNDICE A.3 – Inventário do processo de beneficiamento de rocha fosfática

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
phosphate rock, 32.2% P2O5, concentrated, at plant/BR U	1	ton	Dado primário: Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Critério de alocação: mássico.
Limestone, from calcite, at plant/BR U	4,2792	ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Limestone, from magnetite, at plant/BR U	0,3024	ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
solid waste, for coprocessing, at plant/BR	0,0000172	ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
oil sludge, as fuel, at plant/BR	0,0000137	ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Resources			
Defoamer	1,1875	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar agentes depressores.
Auxiliary materials	0,8586	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar agentes coletores.
Auxiliary materials	0,668	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar corretores de pH.
Auxiliary materials	0,0041	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar floculantes.
Materials/fuels			
phosphatic rock, 4.5% P2O5 milled, at transportation/BR U	9,2445	ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).

Raw water, at transportation**/BR U	28,414 m ³	<p>Valor de consumo obtido a partir de dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).</p> <p>Admitiu-se que a água utilizada na usina de beneficiamento mineral não recebe qualquer forma de tratamento prévio a sua utilização.</p> <p>Além disso, considerou-se uma distância de 500 metros de transporte entre a ETA e a usina de beneficiamento.</p>
-------------------------------------	-----------------------	---

Electricity/heat		
Electricity 2011, medium voltage, at grid/ BR	126,71 kWh	<p>Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente ao consumo efetivo de energia elétrica da usina de beneficiamento em 2011, correspondente a 73.769.729,63 kWh para a produção de 582.193 toneladas de concentrado.</p>
Electricity, natural gas, at combined cycle plant, best technology*/BR U	0 kWh	<p>Cenário III: banco de dados introduzido no sistema para efeito de modelagem da geração eletricidade a ser consumida pela usina a partir de queima de gás natural.</p>

Electricity, at cogen 6400kWth, wood, emission control, allocation energy*/BR U	0 kWh	<p>Cenário III: banco de dados introduzido no sistema para efeito de modelagem da geração eletricidade a ser consumida pela usina a partir de queima de biomassa na forma de cavacos de pinheiro (~ lenha com 40% de umidade).</p> <p>Observação: A consideração dessa alternativa predispõe que o calor gerado pelo sistema possa ser utilizado de maneira alternativa para processos de secagem na usina de beneficiamento mineral (em substituição à fornalha 300kW) e na planta de fosfato bicálcico para secagem do produto.</p>
Electricity 2011, medium voltage, at grid/ BR	27,53 kWh	<p>Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).</p> <p>Valor correspondente à fração atribuída ao setor de beneficiamento da energia consumida pelas bombas de captação de água bruta. Esta parcela foi determinada por meio de ponderação entre o volume de água consumido pela usina e o total.</p>
Wood chips, from industry, hardwood, burned in furnace 300kW/BR U	260,5 MJ	<p>O consumo de cavaco de eucalipto. Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).</p> <p>Admitiu-se para conversa desse material e energia um PCI = 2500 kcal/kg.</p> <p>Assim sendo: Energia = $24.8921 * 2400 * 4.186$</p>

/1000 = 260,4958 MJ.

Heat, at cogen 6400kWth, wood, emission control, allocation energy*/BR U	0	MJ	
Diesel, combusted in industrial boiler/BR	0,2528	L	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Emissions to air			
Heat, waste	0	MJ	
Particulates, unspecified	0,0195	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Emissions to water			
Solids, inorganic	6,0118	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar perdas liquidas de rejeitos inorgânicos não apatíticos.
Emissions to soil			
Iron	580,536	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar perdas na forma de sólidos suspensos de compostos de magnetita para o solo.
Non-apatitic minerals	1352,6202	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar perdas na forma de sólidos suspensos de rejeitos inorgânicos não apatíticos para o solo.

Calcium	1729,7374 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar perdas na forma de sólidos suspensos de calcita para o solo.
---------	--------------	--

Waste to treatment		
Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	0,0859 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar resíduos diversos do processo de concentração encaminhados para aterro industrial.

APÊNDICE A.4 – Inventário do processo de importação de enxofre

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Sulfur, at transportation/BR U	1	ton	
Materials/fuels			
Sulfur, from Russia, at transportation/BR U	0,52	ton	
Sulfur, from Qatar (Doha), at transportation/BR U	0,03	ton	
Sulfur, from UEA (Abu Dhabi), at transportation/BR U	0,11	ton	
Sulfur, from Canadá, at transportation/BR U	0,1	ton	
Sulfur, from Germany, at transportation/BR U	0,15	ton	
Sulfur, from Italy, at transportation/BR U	0,06	ton	
Sulfur, from USA (Houston), at transportation/BR U	0,03	ton	

APÊNDICE A.5 – Inventário do processo de importação de enxofre da Alemanha

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Sulfur, from Germany, at transportation/BR U	0,15	ton	
Materials/fuels			
Sulfur, from Germany (Cloppenburg-Diepholz), at transportation/BR U	0,075	ton	
Sulfur from Germany, at transportation/BR U	0,075	ton	

APÊNDICE A.6 – Inventário do processo de transporte de enxofre (Alemanha até Cajati)

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Sulfur, from Germany (Cloppenburg-Diepholz), at transportation/BR U	1	ton	<p>Observação:</p> <p>Trecho: Diepholz (RDA) - Frankfurt (RDA) - Hamburg (RDA) - Santos (BR) - Cajati (BR)</p> <p>Admitiu-se como primeira aproximação não haver perdas de enxofre durante o transporte.</p> <p>No entanto, estas são estimadas, para um modelo mais rigoroso em:</p> <p>Ferrovário: 2% (por trecho)</p> <p>Transoceânico: 5%</p> <p>Rodoviário: 1%</p>
Materials/fuels			
Transport, freight, rail/RER U	317	tkm	Diepholz (RDA): Frankfurt (RDA)
Transport, freight, rail/RER U	496	tkm	Frankfurt (RDA): Hamburg (RDA)
Transport, transoceanic freight ship/OCE U	10505	tkm	Hamburg (RDA): Santos (BR): 5.672 milhas náuticas (= 10.505 km)
Transport, lorry 7.5-16t, EURO4/RER U	225	tkm	Santos (BR): Cajati (BR)
Secondary sulphur, at refinery/RER U	1	ton	

APÊNDICE A.7 – Inventário do processo de produção de ácido sulfúrico

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Sulfuric acid, 100% H ₂ SO ₄ , at plant/BR U	1	ton	Alocação realizada apenas entre H ₂ SO ₄ e vapor, por critério energético. Entalpia padrão de formação do H ₂ SO ₄ = -1.209 kJ/mol = 12.336,73 MJ/t.H ₂ SO ₄ (PERRY, 2010). Logo, considerando-se como critério de alocação, a energia disponível, tanto no H ₂ SO ₄ como no vapor de água saturado, teremos: $f(\text{H}_2\text{SO}_4) = 12.336,73 / (12.336,73 + 4.146,54) = 0,748$ $f(\text{Steam}) = 4.146,54 / (12.336,73 + 4.146,54) = 0,252$
Steam, high pressure, 42bar- 400C, at plant/BR U	4,147	GJ	Produção de vapor de alta pressão (P = 42bar T = 400°C): 4,147GJ/t H ₂ SO ₄ Entalpia = 3.214 kJ/kg vapor (40 kgf/cm ² - 400°C) Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (2011)
Sulphur sludge, at plant/BR U	6,732	kg	
Oil sludge I, at plant/BR U	0,0125	kg	
V ₂ O ₅ catalyst, at plant/BR U	0,1084	kg	
Waste I, for coprocessing/BR U	0,0156	kg	
Resources			

Air	2,969424 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Consumo de ar = $2,47452 \text{ m}^3/\text{t H}_2\text{SO}_4$ $dAr = 1,2 \text{ kg/m}^3$ (nível do mar) (LUTGENS & TARBUCK, 1995). Lutgens, Frederick K. and Edward J. Tarbuck (1995) The Atmosphere, Prentice Hall, 6th ed., pp14-17, ISBN 0-13-350612-6.
Auxiliary materials	0,3696 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar material filtrante.
catalyst, at plant	0,048 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar catalisador 1.
catalyst, at plant	0,0869 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar catalisador 2.
Water, cooling, unspecified natural origin/kg	0,61272 ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).

Materials/fuels

Sulfur, at transportation/BR U	0,3287 ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
deionised water, at transportation/BR U	0,1603 ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente a água desmineralizada para processo Assumiu-se para tanto $dH_2O = 1,00 \text{ t/m}^3$.
deionised water, at transportation/BR U	0,8748 ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente a água

deionised water, at transportation/BR U	0,6127 ton	desmineralizada para caldeira. Assumiu-se para tanto $dH_2O = 1,00$ t/m ³ . Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente a água desmineralizada para torre de resfriamento Assumiu-se para tanto $dH_2O = 1.00$ t/m ³ .
---	------------	--

Electricity/heat		
Electricity, at cogeneration/BR U	18,36 kWh	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Electricity 2011, medium voltage, at grid/ BR	1,915 kWh	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente ao consumo efetivo da planta de H_2SO_4 (1,785 kWh/t H_2SO_4) ao qual se adicionou a fração atribuída ao setor, da energia consumida pelas bombas de captação de água bruta. Esta parcela foi determinada por meio de ponderação entre o volume de água consumido pela planta de H_2SO_4 e o total de água consumido pela unidade.
Diesel, burned in diesel-electric generating set*/BR U	10,595 MJ	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Consumo de diesel para geração de energia: $c = 0,2936$ L/t H_2SO_4 Expressando isso em termos energético: $E = 0,2936 \text{ L} * 8620 \text{ kcal/L} * 4,186 \text{ kJ/kcal/1000 kJ/MJ} = 10.595 \text{ MJ}$

Diesel, combusted in industrial boiler/BR	0,0614 L	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente ao consumo de diesel como combustível auxiliar durante parada anual da unidade de cogeração para manutenção programada.
Residual fuel oil, combusted in industrial boiler/BR	0,322 L	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Fluxo de produto empregado em substituição ao óleo BPF para efeito de modelagem da presente etapa do sistema de produto. Consumo: $c = 0,0003114 \text{ t}$ Assumiu-se para tanto $d = 0,967 \text{ t/m}^3$
Steam, medium pressure, 7bar - 200C, to H ₂ SO ₄ plant/BR U	977,41 MJ	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Ver balanço de vapor.

Emissions to air

Sulfur dioxide	1,5289 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
----------------	-----------	---

Waste to treatment

Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	0,078 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar resíduos diversos do processo de produção de H ₂ SO ₄ encaminhados para aterro industrial.
---	----------	--

APÊNDICE A.8 – Inventário do processo de produção de ácido fosfórico

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Phosphoric acid, 70% H ₃ PO ₄ , at plant/BR U	1	ton	Observação: Alocação realizada por critério mássico entre produtos com real valor agregado.
Calcium sulphate, at plant/BR U	4,7714	ton	
Oil sludge II, at plant/BR U	0,0387	kg	
Waste II, for coprocessing/BR U	0,0546	kg	
Resources			
Water, cooling, unspecified natural origin/kg	1,17807	ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Auxiliary materials	0,8686	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar material anti-empedante.
Defoamer	1,2154	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar material anti-espumante.
Defoamer	1,6872	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar material anti-espumante.
Auxiliary materials	80,3468	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar material neutralizador de efluente.
catalyst, at plant	22,3595	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar material aditivo de reação.

Diatomite	0,0346 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar diatomita.
-----------	-----------	--

Materials/fuels		
sulfuric acid, 100% H ₂ SO ₄ , at transportation/BR U	2,8105 ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
phosphate rock I, 32.2% P ₂ O ₅ , concentrated dry, at transportation/BR U	3,2254 ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Raw water, at transportation***/BR U	16,0814 m ³	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
deionised water, at transportation/BR U	1,1781 ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente a água desmineralizada para torre de resfriamento. Assumiu-se para tanto dH ₂ O = 1,00 t/m ³

Electricity/heat		
Electricity 2011, medium voltage, at grid/ BR	18,63 kWh	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Electricity, at cogeneration/BR U	110,08 kWh	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente ao consumo efetivo da planta de produção de H ₃ PO ₄ , ao qual se adicionou a fração atribuída ao setor, da energia consumida pelas bombas de captação de água bruta. Esta parcela foi determinada por meio de ponderação entre o volume de água consumido pela planta de H ₃ PO ₄ e o total de água

consumido pela unidade.

Diesel, combusted in industrial boiler/BR	3,7979 L	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente ao consumo de diesel como combustível auxiliar de processo.
Steam, low pressure, 2,5bar - 150C, to H3PO4 plant/BR U	649,51 MJ	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Ver balanço de vapor.
Steam, medium pressure, 15bar - 300C, to H3PO4 plant/BR U	3389,9 MJ	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Ver balanço de vapor.

Emissions to air

Hydrogen fluoride	0,0023 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
-------------------	-----------	---

Emissions to water

Fluoride	3,10527 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Admitiu-se taxa de remoção de 90% na ETEL.
Phosphate	2,78115 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Admitiu-se taxa de remoção de 90% na ETEL.
Waste to treatment		Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	0,2419 kg	Usados para representar resíduos do processo de produção de H ₃ PO ₄ encaminhados para aterro industrial.

APÊNDICE A.9 – Inventário do processo de produção de ácido fosfórico

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Fosfato bicalcico, at plant/BR U	1	ton	
Waste III, for coprocessing/BR U	0,000019	ton	
Resources			
Auxiliary materials	30,385	kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Materials/fuels			
phosphate rock II, 32.2% P2O5, concentrated dry, at transportation/BR U	0,03765	ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Phosphoric acid, 70% in H2O, at transportation/BR U	0,45392	ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Limestone, crushed, at transportation/BR U	0	ton	Alternativa de suprimento de calcário em substituição (ou ao menos, complementação) ao calcário calcítico gerado na usina de beneficiamento.
Limestone, from calcite crushed, at transportation/BR U	0,62288	ton	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Raw water, at transportation***/BR U	0,53934	m3	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
Electricity/heat			
Electricity, at cogeneration/BR U	32,28	kWh	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).

Electricity 2011, medium voltage, at grid/ BR	14,06 kWh	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente ao consumo efetivo da produção de fosfato bicálcico (de 13,34 kWh/t FBC) ao qual se adicionou a fração atribuída ao setor da energia consumida pelas bombas de captação de água bruta. Esta parcela foi determinada por meio de ponderação entre o volume de água consumido pela planta fosfato bicálcico, e o total de água consumida pela unidade.
Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW*/BR U	732,17 MJ	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente a um volume de 19,2951 m ³ de gás natural (que foi usado para efeito de modelagem do sistema de produto). PCI GN = 9.065 kcal/m ³ . $E = 19,2951 \text{ m}^3 * 9.065 \text{ kcal/m}^3 * 4,186 \text{ kJ/kcal} / (1.000 \text{ kJ/MJ}) = 732,173 \text{ MJ/t FBC}.$
Diesel, combusted in industrial boiler/BR	1,2491 l	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente ao consumo de diesel como combustível auxiliar de processo.
Wood chips, from industry, hardwood, burned in furnace 300kW/BR U	692,16 MJ	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Valor correspondente a um volume de 0,06614 t de cavaco de pinheiro (que foi usado para efeito de modelagem do sistema de produto). PCI Cavaco (cavaco de pinheiro ~ lenha com 40% umidade): 2.500 kcal/kg $E = 0,06614 \text{ t} * 1.000 \text{ kg/t} * 2.500$

$$\text{kcal/kg} * 4,186\text{kJ/kcal}/(1.000 \text{ kJ/MJ}) = 692,155 \text{ MJ/t FB}$$

Steam, medium pressure, 7bar - 200C, to dicalcium phosphate plant/BR U	121,29 MJ	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Ver balanço de vapor.
--	-----------	---

Heat, at cogen 6400kWth, wood, emission control, allocation energy*/BR U	0 MJ
--	------

Emissions to air		
------------------	--	--

Particulates, unspecified	0,1116 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011).
---------------------------	-----------	--

Waste to treatment		
--------------------	--	--

Disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill/CH U	0,4532 kg	Dado primário Vale Fertilizantes S.A. (ano base: 2011). Usados para representar resíduos diversos do processo de produção de fosfato bicálcico encaminhados para aterro industrial.
---	-----------	--

APÊNDICE A.10 – Inventário do cultivo e obtenção de cavaco de madeira

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Diesel, burned in building machine*/BR U	1	MJ	Global
Materials/fuels			
Lubricating oil, at plant*/BR U	0,000514	kg	
Building machine/RER/I U	1,34E-07	p	
Diesel, at refinery/BR	0,02747	l	Observação: Consumo de diesel = 0,0234 kg Densidade diesel = 0,852 kg/L Expressão do consumo em termos volumétrico V = 0,02747 L
Emissions to air			
Ammonia	4,67E-07	kg	
Benzo(a)pyrene	7,01E-10	kg	
Cadmium	2,34E-10	kg	
Carbon dioxide, fossil	0,073	kg	
Carbon monoxide, fossil	0,000266	kg	
Chromium	1,17E-09	kg	
Copper	3,97E-08	kg	
Dinitrogen monoxide	0,0000028	kg	
Dioxin, 2,3,7,8	1,4E-15	kg	
Tetrachlorodibenzo-p-			
Heat, waste	1,06	MJ	
Methane, fossil	0,00000375	kg	
Nickel	1,64E-09	kg	
Nitrogen oxides	0,00103	kg	
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	0,000121	kg	

PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	7,85E-08	kg
Particulates, < 2.5 um	0,0000943	kg
Selenium	2,34E-10	kg
Sulfur dioxide	0,0000236	kg
Zinc	2,34E-08	kg
Particulates, > 10 um	0,00000628	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	0,00000419	kg

Waste to treatment		
Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U	0,000514	kg

APÊNDICE A.11 – Inventário do consumo de diesel nas movimentações internas de máquinas e equipamentos

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Diesel, burned in diesel-electric generating set*/BR U	1	MJ	Global
Materials/fuels			
Diesel, at refinery/BR	0,02747	L	Observação: Consumo original: $c = 0,0234 \text{ kg diesel / MJ}$ Considerando que a densidade do diesel $d = 0,852 \text{ kg/L}$ então o consumo, expresso em base volumétrica será de: $c' = 0,0234/0,852 = 0,02747 \text{ L/MJ}$
Lubricating oil, at plant/RER U	0,000067	kg	Rough estimation with data for cogen 200 kWe
Diesel-electric generating set production 10MW/RER/I U	1,85E-10	p	Estimation
Emissions to air			
Heat, waste	1,06	MJ	Calculation
Benzene	0,00000002	kg	Extrapolation
Benzo(a)pyrene	1E-10	kg	Extrapolation
Carbon dioxide, fossil	0,073	kg	Literature
Carbon monoxide, fossil	0,00068	kg	Literature
Dinitrogen monoxide	0,000006	kg	Literature
Mercury	4,67E-10	kg	Literature on content in diesel
Methane, fossil	1,67E-07	kg	Environmental report
Nitrogen oxides	0,00138	kg	Environmental report
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified	0,0000924	kg	Environmental report

origin

Particulates, < 2.5 um	0,00017	kg	Literature
Sulfur dioxide	0,0000601	kg	Environmental report
Cadmium	2,34E-10	kg	Literature for automobile emissions
Copper	3,97E-08	kg	Literature for automobile emissions
Chromium	1,17E-09	kg	Literature for automobile emissions
Chromium VI	2,34E-12	kg	Literature for automobile emissions, 0.2% share of Cr VI, basic uncertainty estimated = 10
Nickel	1,64E-09	kg	Literature for automobile emissions
Selenium	2,34E-10	kg	Literature for automobile emissions
Zinc	2,34E-08	kg	Literature for automobile emissions

Waste to treatment

Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U	0,000067	kg	Rough estimation
--	----------	----	------------------

APÊNDICE A.12 – Inventário do processo de aquecimento a diesel de caldeira

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Diesel, combusted in industrial boiler/BR	1	L	<p>Observação:</p> <p>Para efeito de modelagem da geração de energia via queima de diesel, partiu-se da base de dados US-LCI como referência.</p> <p>Esta abordagem não expressa o resultado da combustão em termos de energia. Isso ocorre pelo fato de os fluxos energéticos serem internos ao sistema de produto e assim, tanto sua geração como seu consumo não circulam pelas fronteiras do sistema como fluxo elementar (nos casos em que isso pode ocorrer, apresenta-se apenas a energia não consumida como fluxo elementar).</p> <p>Assim, o que aparecem indicados são os fluxos elementares de saída associados à mesma base e que aparecem listados abaixo, tanto na forma de emissões atmosféricas, como para a água.</p>
Materials/fuels			
Diesel, at refinery/BR	1	L	
Emissions to air			
Arsenic	6,648E-08	kg	
Beryllium	4,986E-08	kg	
Cadmium	4,986E-08	kg	
Carbon dioxide, fossil	2,727	kg	

Carbon monoxide, fossil	0,00060031	kg
Chromium	4,986E-08	kg
Copper	9,972E-08	kg
Dioxin, 2,3,7,8	1,662E-12	kg
Tetrachlorodibenzo-p-		
Hydrogen chloride	8,3807E-05	kg
Lead	1,4958E-07	kg
Manganese	9,972E-08	kg
Mercury	4,986E-08	kg
Methane, fossil	6,1048E-06	kg
Methane, dichloro-, HCC-30	5,3599E-07	kg
Nickel	4,986E-08	kg
Nitrogen oxides	1,3227E-05	kg
Nitrogen oxides	0,0028727	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	0,00011972	kg
Ethene, tetrachloro-	9,141E-09	kg
Phenols, unspecified	4,0386E-07	kg
Radioactive species, unspecified	0,10827	kBq
Selenium	2,493E-07	kg
Sulfur oxides	0,0005986	kg
VOC, volatile organic compounds	0,00002408	kg
Zinc	6,648E-08	kg

Emissions to water

Chloride	7,1124E-09	kg
Copper, ion	3,5562E-08	kg
Iron	3,5562E-08	kg
Oils, unspecified	5,3343E-07	kg
Suspended solids, unspecified	1,0669E-06	kg

APÊNDICE A.13 – Inventário do processo de supressão de madeira para cavaco

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Hardwood, stand establishment / tending / site development, under bark/BR U	1	m ³	Europe
Resources			
Occupation, traffic area, road embankment	20,7	m ² .a	
Transformation, from forest, extensive	0,138	m ²	
Transformation, to traffic area, road embankment	0,138	m ²	
Materials/fuels			
Diesel, burned in building machine*/BR U	5,75	MJ	
Gravel, crushed, at mine/CH U	132	kg	
Power sawing, without catalytic converter/RER U	0,053	hr	
Transport, lorry 3.5-16t, fleet average/RER U	6,62	tkm	

APÊNDICE A.14 – Inventário do processo de consumo de gás natural na geração de eletricidade

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Natural gas, burned in combined cycle plant, best technology*/BR U	1	MJ	Europe
Materials/fuels			
Gas combined cycle power plant, 400MWe/RER/I U	2,2E-12	p	uncertainty of life time
Natural gas, high pressure, at consumer*/BR U	1	MJ	
Sodium hydroxide, 50%vv H ₂ O, production mix*, at plant/BR	0,000002	kg	
Hydrochloric acid, at plant/BR U	0,0000025	kg	
ETAC Water*, deionised, at plant/BR U	0,5	kg	range of values from different references
Emissions to air			
Heat, waste	0,525	MJ	heating value and efficiency
Nitrogen oxides	0,0000255	kg	measurement, single CC power plant
Carbon monoxide, fossil	0,0000022	kg	measurement, single CC power plant
Carbon dioxide, fossil	0,056	kg	composition of natural gas
Sulfur dioxide	0,0000005	kg	composition of natural gas
Particulates, < 2.5 um	0,0000005	kg	estimate from range of values from different references
Dinitrogen monoxide	0,000001	kg	estimate from range of values from different references
Mercury	3E-11	kg	basic uncertainty for heavy metal; trace element in natural gas
Dioxin, 2,3,7,8	2,9E-17	kg	rough estimate, high uncertainty

Tetrachlorodibenzo-p-

Methane, fossil	0,000001	kg	range of values from different references
Acetaldehyde	8E-10	kg	rough estimate, high uncertainty
Benzo(a)pyrene	5,29E-13	kg	US EPA 1998, high uncertainty reported qualitatively therein
Benzene	9,26E-10	kg	US EPA 1998, high uncertainty reported qualitatively therein
Butane	9,26E-07	kg	US EPA 1998, high uncertainty reported qualitatively therein
Acetic acid	1,21E-07	kg	rough estimate, high uncertainty
Formaldehyde	3,31E-08	kg	US EPA 1998, high uncertainty reported qualitatively therein
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	8E-09	kg	rough estimate, high uncertainty
Pentane	0,00000115	kg	US EPA 1998, high uncertainty reported qualitatively therein
Propane	7,05E-07	kg	US EPA 1998, high uncertainty reported qualitatively therein
Propionic acid	1,6E-08	kg	rough estimate, high uncertainty
Toluene	1,5E-09	kg	US EPA 1998, high uncertainty reported qualitatively therein
Acenaphthene	7,93E-13	kg	US EPA 1998, high uncertainty reported qualitatively therein
Ethane	0,00000137	kg	US EPA 1998, high uncertainty reported qualitatively therein
Hexane	7,93E-07	kg	US EPA 1998, high uncertainty reported qualitatively therein

Waste to treatment			
--------------------	--	--	--

Disposal, residue from cooling tower, 30% water, to sanitary landfill/CH U	0,000001	kg	Lognormal
--	----------	----	-----------

APÊNDICE A.15 – Inventário do processo de queima de gás natural em fornalhas

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW*/BR U	1	MJ	Europe
Materials/fuels			
Natural gas, burned in industrial furnace >100kW*/BR U	1,05	MJ	uncertainty of efficiency factor / utilization ratio

APÊNDICE A.16 – Inventário do processo de queima de gás natural em fornalhas

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Natural gas, burned in industrial furnace >100kW*/BR U	1	MJ	Europe
Materials/fuels			
Natural gas, high pressure, at consumer*/BR U	1	MJ	
Electricity 2011, low voltage, at grid/BR	0,00111	kWh	range of electricity for pumps etc., different literature
Industrial furnace, natural gas/RER/I U	2,8E-09	p	uncertainty of life time and extrapolation to range of capacity
Emissions to air			
Heat, waste	1,1	MJ	uncertainty of operation supply energy and heating value
Acetaldehyde	1E-09	kg	rough estimate, high uncertainty
Benzo(a)pyrene	1E-11	kg	rough estimate, high uncertainty
Benzene	0,0000004	kg	rough estimate, high uncertainty
Butane	0,0000007	kg	rough estimate, high uncertainty
Methane, fossil	0,0000002	kg	rough estimate, high uncertainty
Carbon monoxide, fossil	0,0000021	kg	calculated based on (SVGW 2002)
Carbon dioxide, fossil	0,056	kg	composition of natural gas
Acetic acid	0,00000015	kg	rough estimate, high uncertainty
Formaldehyde	0,0000001	kg	rough estimate, high uncertainty
Mercury	3E-11	kg	trace element in natural gas
Dinitrogen monoxide	0,0000001	kg	rough estimate, high uncertainty
Nitrogen oxides	0,0000179	kg	calculated based on (SVGW 2002)
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	0,00000001	kg	rough estimate, high uncertainty
Particulates, < 2.5 um	0,00000002	kg	literature
Pentane	0,0000012	kg	rough estimate, high uncertainty
Propane	0,0000002	kg	rough estimate, high uncertainty

Propionic acid	0,00000002	kg	rough estimate, high uncertainty
Sulfur dioxide	0,00000055	kg	composition of natural gas
Dioxin, 2,3,7,8	3E-17	kg	rough estimate, high uncertainty
Tetrachlorodibenzo-p-			
Toluene	0,0000002	kg	rough estimate, high uncertainty

APÊNDICE A.17 – Inventário do processo de queima de gás natural em fornalhas

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Natural gas, high pressure, at consumer*/BR U	1	MJ	Europe
Materials/fuels			
Natural gas, burned in industrial furnace >100kW*/BR U	0,00167	MJ	Environmental report of Italian company
Electricity 2011, medium voltage, at grid/ BR	0,000072	kWh	Environmental report of Italian company
Natural Gas, at plant/BR	0,0272	m ³	Leakage estimated for EU
Pipeline, natural gas, high pressure distribution network/RER/I U	7,88E-10	km	Statistics of distribution
Transport, natural gas, pipeline, long distance/RER U	0,00963	tkm	Calculated on the basis of German data
Emissions to air			
Methane, fossil	0,0000109	kg	Calculated based on gas mix and leakage
Ethane	4,03E-07	kg	Calculated based on gas mix and leakage
Propane	9,3E-08	kg	Calculated based on gas mix and leakage
Butane	3,1E-08	kg	Calculated based on gas mix and leakage
Carbon dioxide, fossil	9,3E-08	kg	Calculated based on gas mix and leakage
NMVOG, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	1,55E-08	kg	Calculated based on gas mix and leakage

Mercury	1,55E-14	kg	Calculated based on gas mix and leakage
Heat, waste	0,000259	MJ	Environmental report of Italian company

APÊNDICE A.18 – Inventário do processo de queima de óleo combustível

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Residual fuel oil, combusted in industrial boiler/BR	1	L	<p>Observação:</p> <p>Para efeito de modelagem da geração de energia via queima de óleo combustível, partiu-se da base de dados US-LCI como referência.</p> <p>Esta abordagem não expressa o resultado da combustão em termos de energia. Isso ocorre pelo fato de os fluxos energéticos serem internos ao sistema de produto e assim, tanto sua geração como seu consumo não circularém pelas fronteiras do sistema como fluxo elementar (nos casos em que isso pode ocorrer, apresenta-se apenas a energia não consumida como fluxo elementar).</p> <p>Assim, o que aparece indicado são os fluxos elementares de saída associados à mesma base e que aparecem listados abaixo, tanto na forma de emissões atmosféricas, como para a água.</p>
Materials/fuels			
Oleo Combustivel residual, at refinery/BR	1	L	
Emissions to air			
Arsenic	1,5817E-07	kg	
Benzene	2,5643E-08	kg	
Beryllium	3,3312E-09	kg	

Cadmium	4,7691E-08	kg
Carbon dioxide, fossil	3,262	kg
Carbon monoxide, fossil	0,00063922	kg
Chromium	1,0125E-07	kg
Cobalt	7,2136E-07	kg
Dioxin, 2,3,7,8	1,7914E-12	kg
Tetrachlorodibenzo-p- Formaldehyde	3,9543E-06	kg
Hydrogen chloride	8,3807E-05	kg
Lead	1,8094E-07	kg
Manganese	3,5948E-07	kg
Mercury	1,354E-08	kg
Methane, fossil	0,00012784	kg
Methane, dichloro-, HCC- 30	5,7773E-07	kg
Naphthalene	1,354E-07	kg
Nickel	1,0125E-05	kg
Dinitrogen monoxide	1,4205E-05	kg
Nitrogen oxides	0,0070315	kg
Ethene, tetrachloro-	8,3916E-09	kg
Phenols, unspecified	4,3531E-07	kg
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	0,00024267	kg
Radioactive species, unspecified	0,099393	kBq
Selenium	8,1841E-08	kg
Sulfur oxides	0,0051155	kg
VOC, volatile organic compounds	3,5907E-05	kg

Emissions to water

Chloride	8,5811E-09	kg
Copper, ion	4,2906E-08	kg
Iron	4,2906E-08	kg

Oils, unspecified 6,4359E-07 kg

Suspended solids, 1,2872E-06 kg
unspecified

Waste to treatment	
--------------------	--

Dummy_Disposal, solid	0,0012702 kg
-----------------------	--------------

waste, unspecified, to
unspecified treatment/US

APÊNDICE A.19 – Inventário do processo de fabricação de cavaco de madeira a partir de sobras de serralherias

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Round wood, hardwood, under bark, u=70%, at forest road/BR U	1	m ³	Europe
Materials/fuels			
Diesel, burned in building machine*/BR U	72,9960784	MJ	
Hardwood, stand establishment / tending / site development, under bark/BR U	1,6078	m ³	
Hardwood, standing, under bark, in forest/RER U	1,60784314	m ³	
Power sawing, without catalytic converter/RER U	0,23796	hr	
Hardwood, allocation correction, 3/RER U	-0,68039	m ³	Calculated correction term

APÊNDICE A.20 – Inventário do processo de queima de cavaco de madeira

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Wood chips, from industry, hardwood, burned in furnace 300kW/BR U	1	MJ	Brasil
Materials/fuels			
Electricity, low voltage, at grid 2013/BR U	0,00417	kWh	general assumption
Wood chips, hardwood, from industry, u=40%, at plant/BR U	0,000238	m ³	uncertainty on energy and water content, and bulk density
Furnace, wood chips, hardwood, 300kW/CH/I U	1,81E-08	p	uncertainty on lifetime
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH U	0,0119	tkm	<p>Premissas:</p> <p>Densidade aparente dos cavacos de eucalipto: $d = 500 \text{ kg/m}^3$</p> <p>Portanto, se para a produção de 1 MJ de energia por esta via forem necessários $V = 0,000238 \text{ m}^3$ isso corresponderá a $m = 0,119 \text{ kg} = 0,000119 \text{ t}$</p> <p>Admitindo agora uma distância média de transporte de 100 km desde as fazendas de produção de eucalipto e a unidade de Cajati da Vale Fertilizantes S.A. teremos uma carga associada ao transporte de:</p> <p>$T = 0,000119 * 100 = 0,0119 \text{ t.km}$</p>
Emissions to air			

Acetaldehyde	6,1E-08	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Ammonia	0,00000173	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Arsenic	1E-09	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Benzene	0,00000091	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Benzene, ethyl-	0,00000003	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Benzene, hexachloro-	7,2E-15	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Benzo(a)pyrene	5E-10	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Bromine	0,00000006	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Cadmium	7E-10	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Calcium	0,00000585	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Carbon dioxide, biogenic	0,103	kg	uncertainty of carbon content in the wood
Carbon monoxide, biogenic	0,000048	kg	range of measuring data
Chlorine	0,00000018	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Chromium	3,96E-09	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Chromium VI	4E-11	kg	range of data
Copper	2,2E-08	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Dinitrogen monoxide	0,0000025	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions

Dioxin, 2,3,7,8	3,1E-14	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Tetrachlorodibenzo-p-Fluorine	0,00000005	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Formaldehyde	0,00000013	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Heat, waste	1,08	MJ	standard for resources
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	0,00000091	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	0,00000031	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Lead	2,5E-08	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Magnesium	0,00000036	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Manganese	0,00000017	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Mercury	3E-10	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Methane, biogenic	0,00000004	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
m-Xylene	0,00000012	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Nickel	6E-09	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Nitrogen oxides	0,000127	kg	range of measuring data
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	0,00000006	kg	range of measuring data
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1,11E-08	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Particulates, < 2.5 um	0,000046	kg	range of measuring data

Phenol, pentachloro-	8,1E-12	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Phosphorus	0,0000003	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Potassium	0,0000234	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Sodium	0,0000013	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Sulfur dioxide	0,0000025	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Toluene	0,0000003	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions
Zinc	0,0000003	kg	extrapolation, based on measuring data of other emissions

Waste to treatment			
--------------------	--	--	--

Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to municipal incineration/CH U	0,000125	kg	homogeneous fuel
Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to landfarming/CH U	0,000125	kg	homogeneous fuel
Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to sanitary landfill/CH U	0,00025	kg	homogeneous fuel

APÊNDICE A.21 – Inventário do processo de transmissão de eletricidade em alta tensão

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Electricity 2011, high voltage, production BR, at grid/BR	1	kWh	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity
Materials/fuels			
Electricity (2011), production mix/BR	1,0103	kWh	Specific losses of network estimated based on statistics
Transmission network, long-distance/UCTE/I U	3,17E-10	km	Based on consumption statistics
Transmission network, electricity, high voltage/CH/I U	8,44E-09	km	Based on consumption statistics
Emissions to air			
Heat, waste	0,035075	MJ	Estimations based on losses
Ozone	0,0000045	kg	Standard deviation based on variation reported in literature
Dinitrogen monoxide	0,000005	kg	Standard deviation based on variation reported in literature
Emissions to soil			
Heat, waste	0,001846	MJ	Estimations based on losses

APÊNDICE A.22 – Inventário do processo de transmissão de eletricidade em média tensão

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Electricity 2011, medium voltage, at grid/ BR	1	kWh	Brasil
Materials/fuels			
Electricity (2011), production mix/BR	1,0233	kWh	Specific losses of network estimated based on statistics
Sulphur hexafluoride, liquid, at plant/RER U	6,8412E-09	kg	Assumed with data of German statistics
Transmission network, electricity, medium voltage/CH/I U	3,24E-08	km	Based on consumption statistics
Emissions to air			
Heat, waste	0,046142	MJ	Estimations based on losses
Sulfur hexafluoride	6,8412E-09	kg	Assumed with data of German statistics
Emissions to soil			
Heat, waste	0,037753	MJ	Estimations based on losses

APÊNDICE A.23 – Inventário do processo de transmissão de eletricidade em baixa tensão

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Electricity 2011, low voltage, at grid/BR	1	kWh	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity
Materials/fuels			
Electricity (2011), medium voltage, at grid/ BR	1,1116	kWh	Specific losses of network estimated based on statistics
Sulphur hexafluoride, liquid, at plant/RER U	3,9544E-09	kg	Assumed with data of German statistics
Distribution network, electricity, low voltage/CH/I U	2,94E-07	km	Based on consumption statistics
Emissions to air			
Heat, waste	0,10046	MJ	Estimations based on losses
Sulfur hexafluoride	3,9544E-09	kg	Assumed with data of German statistics
Emissions to soil			
Heat, waste	0,30139	MJ	Estimations based on losses

APÊNDICE A.24 – Inventário do processo de produção da matriz elétrica brasileira

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Electricity 2011, production mix/BR	1	TJ	Brasil – BEN 2011 Observação: Considerou-se para efeito de modelagem que os 6,5% de eletricidade importada fossem adquiridos na forma de hidroeletricidade junto ao Paraguai, os quais foram gerados na usina hidroelétrica de Itaipu.
Materials/fuels			
Electricity, hard coal, at power plant/UCTE U	0,013	TJ	Fonte: BEN (2011)
Electricity, natural gas, at power plant - BR	0,068	TJ	Fonte: BEN (2011)
Electricity, hydropower, at reservoir power plant/BR U	0,805	TJ	Fonte: BEN (2011)
Electricity nuclear power plant UCPTE U	0,027	TJ	Fonte: BEN (2011)
Electricity, at wind power plant/RER U	0,004	TJ	Fonte: BEN (2011)
Electricity power from bagasse, sugarcane, at fermentation plant - BR	0,047	TJ	Fonte: BEN (2011)
Heavy fuel oil, burned in power plant/RER U	0,036	TJ	Fonte: BEN (2011)

APÊNDICE A.25 – Inventário do processo de cogeração de energia

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Electricity, at cogeneration/BR U	39,367	kWh	Observação: Alocação realizada por critério energético.
Steam, medium pressure, 7bar - 200C*, to node 1/BR U	0,478	GJ	
Electricity/heat			
steam high pressure, 42bar - 400C, at transportation/BR U	1	GJ	Observação: Produção específica de vapor de alta pressão (42 kgf/cm ² e 400°C) = 828.993 t / 642.457 t H ₂ SO ₄ . Produção específica de vapor de alta pressão (42 kgf/cm ² e 400°C) = 1,2902 t / t. H ₂ SO ₄ produzida. Energia associada ao vapor = 4,147 GJ / t H ₂ SO ₄ .
Emissions to air			
Heat, waste	0,38	GJ	

APÊNDICE A.26 – Inventário do processo de produção de eletricidade a partir de queima de cavaco

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Electricity, at cogen 6400kWth, wood, emission control, allocation energy*/BR U	1	kWh	SWITZERLAND
Materials/fuels			
Lubricating oil, at plant*/ BR U	1,3865E-05	kg	general assumption
Ammonia, liquid, at regional storehouse - BR	3,4664E-08	kg	general assumption
Chemicals organic, at plant/GLO U	2,4265E-05	kg	general assumption
Chlorine, liquid, production mix, at plant - BR	1,3865E-06	kg	general assumption
Sodium chloride, powder, at plant - BR	1,7332E-05	kg	general assumption
ETAC Water*, deionised, at plant/BR U	0,0033269	kg	general assumption
Wood chips, hardwood, from industry, u=40%, at plant/BR U	0,0012175	m3	
Cogen unit 6400kWth, wood burning, common components for heat+electricity/CH/I U	4,092E-09	p	uncertainty on lifetime and material
Cogen unit 6400kWth, wood burning, building/CH/I U	1,023E-09	p	uncertainty on lifetime and material
Urea, as N, at regional storehouse - BR	0,00011329	kg	general assumption

Cogen unit 6400kWth, 4,4E-08 p essentially uncertainty of assignment
wood burning, of reference system
components for electricity
only/CH/I U

Emissions to air			
Heat, waste	4,18922727	MJ	own estimation, based on uncertainty of upper heating value and electricity production
Carbon dioxide, biogenic	0,41596	kg	uncertainty of carbon content in the wood
Nitrogen oxides	0,000186	kg	measurements and assumption, based on literature
Particulates, < 2.5 um	2,1136E-05	kg	measurements
Carbon monoxide, biogenic	2,9591E-05	kg	measurements
Methane, biogenic	1,8346E-06	kg	extrapolation
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	2,5786E-06	kg	extrapolation
Sulfur dioxide	1,0526E-05	kg	extrapolation
Dinitrogen monoxide	0,000093	kg	measurements and assumption, based on literature
Acetaldehyde	2,5786E-07	kg	extrapolation
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	3,8468E-06	kg	extrapolation
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	1,3105E-05	kg	extrapolation
Arsenic	4,2273E-09	kg	extrapolation
Benzo(a)pyrene	2,1136E-09	kg	extrapolation
Benzene	3,8468E-06	kg	extrapolation
Bromine	2,5364E-07	kg	extrapolation
Calcium	0,00002473	kg	extrapolation

Cadmium	2,9591E-09	kg	extrapolation
Chlorine	7,6091E-07	kg	extrapolation
Chromium	1,674E-08	kg	extrapolation
Chromium VI	1,6909E-10	kg	range of data
Copper	9,3E-08	kg	extrapolation
Dioxin, 2,3,7,8	1,3105E-13	kg	extrapolation
Tetrachlorodibenzo-p-			
Benzene, ethyl-	1,2682E-07	kg	extrapolation
Fluorine	2,1136E-07	kg	extrapolation
Formaldehyde	5,4955E-07	kg	extrapolation
Benzene, hexachloro-	3,0436E-14	kg	extrapolation
Mercury	1,2682E-09	kg	extrapolation
Potassium	9,8918E-05	kg	extrapolation
Magnesium	1,526E-06	kg	extrapolation
Manganese	7,2286E-07	kg	extrapolation
Sodium	5,4955E-06	kg	extrapolation
Ammonia	7,1864E-05	kg	extrapolation
Nickel	2,5364E-08	kg	extrapolation
Phosphorus	1,2682E-06	kg	extrapolation
PAH, polycyclic aromatic	4,65E-08	kg	extrapolation
hydrocarbons			
Lead	1,0526E-07	kg	extrapolation
Phenol, pentachloro-	3,4241E-11	kg	extrapolation
Toluene	1,2682E-06	kg	extrapolation
m-Xylene	5,0727E-07	kg	extrapolation
Zinc	1,2682E-06	kg	Extrapolation

Waste to treatment			
--------------------	--	--	--

Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U	1,3865E-05	kg	general assumption
--	------------	----	--------------------

Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration/CH U	1,3865E-05	kg	general assumption
Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 2/CH U	3,3269E-06	m3	general assumption
Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to municipal incineration/CH U	0,000558	kg	homogeneous fuel
Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to landfarming/CH U	0,000558	kg	homogeneous fuel
Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to sanitary landfill/CH U	0,0011202	kg	homogeneous fuel

APÊNDICE A.27 – Inventário do processo de produção de eletricidade a partir da queima de gás natural

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Electricity, natural gas, at combined cycle plant, best technology*/BR U	1	kWh	Europe
Materials/fuels			
Natural gas, burned in combined cycle plant, best technology*/BR U	6,26	MJ	estimated uncertainty of average efficiency

APÊNDICE A.28 – Inventário do processo de produção de calor a partir da queima de cavaco

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Heat, at cogen 6400kWth, wood, emission control, allocation energy*/BR U	1	MJ	SWITZERLAND
Materials/fuels			
Lubricating oil, at plant*/BR U	3,8787E-06	kg	general assumption
Ammonia, liquid, at regional storehouse - BR	9,6967E-09	kg	general assumption
Chemicals organic, at plant/GLO U	6,7877E-06	kg	general assumption
Chlorine, liquid, production mix, at plant - BR	3,8787E-07	kg	general assumption
Sodium chloride, powder, at plant - BR	4,8484E-06	kg	general assumption
ETAC Water*, deionised, at plant/BR U	0,00093065	kg	general assumption
Wood chips, hardwood, from industry, u=40%, at plant/BR U	0,00034057	m ³	uncertainty on energy and water content, and bulk density
Cogen unit 6400kWth, wood burning, common components for heat+electricity/CH/I U	1,1447E-09	p	uncertainty on lifetime and material
Cogen unit 6400kWth, wood burning, building/CH/I U	2,8617E-10	p	uncertainty on lifetime and material
Urea, as N, at regional storehouse - BR	3,1692E-05	kg	general assumption
Emissions to air			

Heat, waste	1,17188657	MJ	own estimation, based on uncertainty of upper heating value and electricity production
Carbon dioxide, biogenic	0,11636	kg	uncertainty of carbon content in the wood
Nitrogen oxides	5,2031E-05	kg	measurements and assumption, based on literature
Particulates, < 2.5 um	5,9126E-06	kg	measurements
Carbon monoxide, biogenic	8,2777E-06	kg	measurements
Methane, biogenic	5,1322E-07	kg	extrapolation
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	7,2134E-07	kg	extrapolation
Sulfur dioxide	2,9445E-06	kg	extrapolation
Dinitrogen monoxide	2,6016E-05	kg	measurements and assumption, based on literature
Acetaldehyde	7,2134E-08	kg	extrapolation
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	1,0761E-06	kg	extrapolation
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	3,6658E-06	kg	extrapolation
Arsenic	1,1825E-09	kg	extrapolation
Benzo(a)pyrene	5,9126E-10	kg	extrapolation
Benzene	1,0761E-06	kg	extrapolation
Bromine	7,0952E-08	kg	extrapolation
Calcium	6,9178E-06	kg	extrapolation
Cadmium	8,2777E-10	kg	extrapolation
Chlorine	2,1286E-07	kg	extrapolation
Chromium	4,6828E-09	kg	extrapolation
Chromium VI	4,7301E-11	kg	range of data
Copper	2,6016E-08	kg	extrapolation

Dioxin, 2,3,7,8	3,6658E-14	kg	extrapolation
Tetrachlorodibenzo-p-			
Benzene, ethyl-	3,5476E-08	kg	extrapolation
Fluorine	5,9126E-08	kg	extrapolation
Formaldehyde	1,5373E-07	kg	extrapolation
Benzene, hexachloro-	8,514E-15	kg	extrapolation
Mercury	3,5476E-10	kg	extrapolation
Potassium	2,7671E-05	kg	extrapolation
Magnesium	4,2689E-07	kg	extrapolation
Manganese	2,0221E-07	kg	extrapolation
Sodium	1,5373E-06	kg	extrapolation
Ammonia	2,0103E-05	kg	extrapolation
Nickel	7,0952E-09	kg	extrapolation
Phosphorus	3,5476E-07	kg	extrapolation
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1,3008E-08	kg	extrapolation
Lead	2,9445E-08	kg	extrapolation
Phenol, pentachloro-	9,5785E-12	kg	extrapolation
Toluene	3,5476E-07	kg	extrapolation
m-Xylene	1,419E-07	kg	extrapolation
Zinc	3,5476E-07	kg	extrapolation

Waste to treatment

Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration/CH U	3,8787E-06	kg	general assumption
Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration/CH U	3,8787E-06	kg	general assumption
Treatment, sewage, to wastewater treatment, class 2/CH U	9,3065E-07	m ³	general assumption

Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to municipal incineration/CH U	0,00015609 kg	homogeneous fuel
Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to landfarming/CH U	0,00015609 kg	homogeneous fuel
Disposal, wood ash mixture, pure, 0% water, to sanitary landfill/CH U	0,00031337 kg	homogeneous fuel

APÊNDICE A.29 – Inventário do processo de produção de água no processo

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Process water, at plant/BR U	1	kg	BRAZIL
			<p>Premissas:</p> <p>a) Considerou-se para efeito de calculo que $d(H_2O) = 1,0 \text{ t/m}^3$</p> <p>b) Considerou-se uma perda de 11,40% de água na Estação de Tratamento de Água (ETA) em função de seu tratamento e adequação a padrões de consumo em planta industrial. Dados obtidos de literatura $[P = (0,12886/(1,12886))*100\% = 11,40\%]$</p>
wastewater from ETA, for ETE/BR U	0,12886	kg	<p>Premissa:</p> <p>a) Admitiu-se que agua perdida no processo seria encaminhada a ETE para tratamento e adequação de padrões de qualidade, antes de ser disposta em corpo receptor (Von Sterling, 2009).</p>
Resources			
Water, river	1,12866	L	
Materials/fuels			
Electricity, at cogeneration/BR U	0,00039	kWh	
Chlorine, liquid, production mix, at plant/BR U	0,0000001	kg	Literature
Hydrogen peroxide, 50% in H ₂ O, at plant/BR U	0,00000088	kg	Literature

Ozone, liquid, at plant/BR U	3,3333E-06	kg	Literature, approximation for WAC (aluminium polychlorid)
Charcoal, at plant/BR U	0,00000417	kg	Literature
Aluminium sulphate, powder, at plant/BR U	0,00000633	kg	Literature
Pump station/CH/I U	2,0568E-11	p	Literature
Water storage/CH/I U	2,0568E-11	p	Literature
Water works/CH/I U	1,1907E-11	p	Literature

Emissions to air

Heat, waste	0,001404	MJ	Literature
Emissions to water			
Aluminium	1,2948E-06	kg	
Chlorine	0,0000001	kg	Estimation for chemical (Cl ₂) use
Chloride	5,0352E-06	kg	Estimation for chemical (WAC) use

Waste to treatment

Disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration/CH U	0,00000417	kg	Charcoal disposal
Treatment, sewage, unpolluted, to wastewater treatment, class 3/CH U	1,7656E-05	m ³	Internal use

APÊNDICE A.30 – Inventário do processo de produção de água deionizada

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Deionised water, at plant/BR U	1,055854	kg	<p>Premissas:</p> <p>a) Para efeito desta modelagem considerou-se que o volume de água de entrada na ETA não poderia ser alterado, dado que outros consumos e gerações foram medidos ou estimados a partir deste total;</p> <p>b) O volume de água deionizada produzido pela ETA será de 117 kg;</p> <p>c) Partindo-se de relações de balanço determinou-se que para cada 123 kg de água alimentada na ETA (total que corresponde a somatória dos volumes tratado pela ETA - de 28 kg - e recirculado do processo pós-uso - de 95 kg) exatos 4,88% correspondem a perdas de processo para a ETE.</p> <p>Assim sendo:</p> <p>Wastewater ETA = $6 \times 1,11/123 = 0,054146$ kg</p> <p>Water deionized = $117 \times 1,11/123 = 1,055854$ kg</p>
wastewater from ETAC, for ETE/BR U	0,054146	kg	

Materials/fuels		
industrial water, at transportation/BR U	1,11	kg
Hydrochloric acid, at plant/BR U	0,00024	kg
Sodium hydroxide, 50% in	0,00012	kg

CV calculated from range of the reported values

CV calculated from range of resin and raw water

CV calculated from range of resin and

H ₂ O, production mix, at plant - BR			raw water
Electricity, medium voltage, at grid 2013/BR U	0,00045	kWh	CV calculated from range of the reported values
Water treatment plant, deionisation/CH/I U	9E-11	p	Estimated with weak data on plant operation

Emissions to air

Heat, waste	0,00162	MJ	Calculated from electricity demand
Carbon dioxide, biogenic	0,00023		Calculated from data of chemical demand
		kg	

Emissions to water

Chloride	0,00023		Calculated from data of chemical demand
		kg	
Sodium, ion	0,00007		Calculated from data of chemical demand
		kg	

APÊNDICE A.31 – Inventário do processo elementar de transporte de água bruta

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Raw water, at transportation*/BR U	1	m ³	
Resources			
Water, river	1	m ³	
Electricity/heat			
Transport, crude oil pipeline, onshore/RER U	1,6	tkm	Observação: Admitiu-se uma distancia de 1.600 m entre a captação e a unidade de britagem da rocha fosfática.

APÊNDICE A.32 – Inventário do processo de produção de calcário calcítico

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Limestone, from calcite crushed, for mill/BR U	1	kg	
Materials/fuels			
Limestone, from calcite, at plant/BR U	1	kg	
Conveyor belt, at plant/RER/I U	2,78E-08	m	
Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U	0,00000612	kg	
Electricity 2011, medium voltage, at grid/ BR	0,00051	kWh	
Raw water, at transportation*****/BR U	0,0293	L	
Emissions to air			
Heat, waste	0,00184	MJ	
Particulates, < 2.5 um	8,71E-07	kg	
Particulates, > 10 um	0,00000871	kg	
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	0,00000784	kg	

APÊNDICE A.33 – Inventário do processo de lubrificação industrial

Aspecto Ambiental	Qtd.	Und.	Observações
Lubricating oil, at plant*/ BR U	1	kg	Europe
Materials/fuels			
Diesel, at regional storage/RER U	1,561	kg	Observação: Consumo de diesel = 1,33 kg Densidade diesel = 0,852 kg/L Expressão do consumo em termos volumétrico V = 1,5610 L
Electricity, medium voltage, at grid 2013/BR U	0,333	kWh	Estimated with data from a large chem. plant
Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW/BR U	2	MJ	Estimated with data from a large chem. plant
Chemical plant, organics - BR	4E-10	p	Estimation
Emissions to air			
Heat, waste	1,2	MJ	Calculated from electricity input
NM/OC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	0,01	kg	Estimation